

# Regelung eines zweiachsigen elastischen Roboters

Jianqi Wang

Forschungsbericht Nr. 17/96

Meß-, Steuer- und Regelungstechnik

**Übersicht:** In dem vorliegenden Forschungsbericht wird die Regelung eines zweiachsigen elastischen Roboterarms vorgestellt. Dazu werden die Verstärkung sowie die Pol- und Nullstellen eines linearisierenden Modells des Roboters zunächst analysiert. Anschließend wird die Beschränkung der Regelgüte des elastischen Roboterarms bei einer Regelung mittels exakter Linearisierung des Momente/Winkelverhaltens des Gelenkes geprüft. Abschließend werden zwei Regler für den zweiachsigen elastischen Roboterarm vorgestellt. Bei einem der Regler handelt es sich um einen Fuzzy-Regler. Um die Anzahl der Eingangsgrößen des Fuzzy-Reglers zu verringern, wird eine Hilfsgröße durch Kombination der Zustandsvariablen des Gelenks über einen PD-Gelenkregler generiert.

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

# Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	II
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Modell eines zweigliedrigen elastischen Roboterarms und dessen Eigenschaften</b>	<b>2</b>
<b>3 Beschränkung der Regelgüte des linearisierenden Reglers</b>	<b>9</b>
<b>4 Regelung eines zweigliedrigen elastischen Roboterarms</b>	<b>13</b>
4.1 Zusammenfassung der Literatur . . . . .	13
4.2 Position und Geschwindigkeit des Armendes . . . . .	14
4.3 Regelung mit einem PD-Gelenkregler und Rückführung der Geschwindigkeit des Armendes . . . . .	15
<b>5 Fuzzy-Regelung des elastischen Roboters</b>	<b>23</b>
5.1 Regelung des Oberarms . . . . .	24
5.2 Regelung des Unterarms . . . . .	27
5.3 Simulationsstudien . . . . .	29
<b>6 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>34</b>
<b>7 Literaturverzeichnis</b>	<b>35</b>

# Nomenklatur

## Skalare Größen

$e_i$	Differenz zwischen Ist- und Sollwinkel des $i$ -ten Gelenkes
$G_{ij}(s)$	Übertragungsfunktion vom $j$ -ten Eingang auf den $i$ -ten Ausgang
$i$	Index
$k$	$k$ -ter Abtastpunkt
$k_i^\omega$	Verstärkungsfaktor von $\omega_i$
$k_i^d, k_{di}$	Differenzierbeiwerte des $i$ -ten PD-Gelenkreglers
$k_i^p, k_{pi}$	Proportionalbeiwerte des $i$ -ten PD-Gelenkreglers
$l_i$	$i$ -te Armlänge
$n_i, n_i^r$	Integral
$p_x^i$	$x$ -Koordinate des Armendes des $i$ -ten Arms
$p_y^i$	$y$ -Koordinate des Armendes des $i$ -ten Arms
$t$	Zeit
$T$	Abtastperiodendauer
$u_i$	Moment des $i$ -ten Gelenkmotors
$u_{i,j}$	Mittelpunkt der Zugehörigkeitsfunktion von $u_i$ zur $j$ -ten Fuzzy-Menge
$u_i^0$	Ausgang des $i$ -ten PD-Gelenkreglers
$u_{i,j}^0$	Mittelpunkte der Zugehörigkeitsfunktion von $u_i^0$ zur $j$ -ten Fuzzy-Menge
$u_i^\omega$	Ausgang des $i$ -ten Dämpfungsreglers
$X_i, \hat{X}_i, Y_i, \hat{Y}_i$	Koordinatenachsen
$y_i$	elastische Deformation des $i$ -ten Arms
$y_i'$	partielle Ableitung von $y_i$ nach räumlicher Variable
$\alpha_i, \alpha_i^r$	Winkel des Armendes des $i$ -ten Arms
$\Delta\alpha_i$	Einfluß der Armelastizitäten auf die Position des Armendes des $i$ -ten Arms
$\delta_{ij}$	$j$ -te elastische Koordinate des $i$ -ten Arms
$\mu$	Zugehörigkeitsfunktion
$\mu_i(u_j(t))$	Zugehörigkeit von $u_j(t)$ zur $i$ -ten Fuzzy-Menge
$\omega_i$	Winkelgeschwindigkeit des Armendes des $i$ -ten Arms
$\Delta\omega_i$	Einfluß der Armelastizitäten auf die Winkelgeschwindigkeit des Armendes des $i$ -ten Arms
$\Delta\omega_j^i$	Mittelpunkte der Zugehörigkeitsfunktion von $\Delta\omega_i$ zur $j$ -ten Fuzzy-Menge
$\phi_{ij,e}$	Wert der $j$ -ten Eigenfunktion des $i$ -ten Arms am Armende
$\phi_{ij,e}'$	Wert der Ableitung von $\phi_{ij,e}$
$\theta_i$	$i$ -ter Gelenkwinkel
$\theta_{id}$	Sollwert von $\theta_i$

## Vektoren und Matrizen

$B(\mathbf{q})$	Trägheitsmatrix
$B_{\theta\theta}, B_{\theta\delta}, B_{\delta\theta}, B_{\delta\delta}$	Untermatrizen von $B(\mathbf{q})$
$C$	Ausgangsmatrix
$D$	Dämpfungsmatrix
$D_e$	Untermatrix von $D$
$\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$	Vektor der Coriolis- und Zentrifugalkräfte
$\mathbf{h}_\theta(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}), \mathbf{h}_\delta(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$	Untervektoren von $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$
$I$	Einheitsmatrix
$K$	Steifigkeitsmatrix
$K_d$	Matrix der Differenzierbeiwerte
$K_e$	Untermatrix von $K$
$K_p$	Matrix der Proportionalbeiwerte
$\mathbf{q}$	Vektor der verallgemeinerten Koordinaten
$\mathbf{q}_0$	Vektor der verallgemeinerten Koordinaten am Arbeitspunkt
$\mathbf{q}_d$	Sollwert von $\mathbf{q}$
$\Delta\mathbf{q}$	Positionsvektor des linearisierten Modells
$Q$	Eingangsbelegungsmatrix
$\mathbf{u}$	Vektor der Gelenkmomente
$\mathbf{u}_0$	Vektor der Gelenkmomente am Arbeitspunkt
$\Delta\mathbf{u}$	Eingangsvektor des linearisierten Modells
$\mathbf{y}$	Vektor der Positionen des fernen Armendes
$\delta$	Vektor der elastischen Koordinaten
$\Delta\delta$	elastische Koordinaten des linearisierten Modells
$\gamma$	neuer Eingang des Reglers mittels exakter Linearisierung
$\theta$	Vektor der Gelenkwinkel
$\Delta\theta$	starre Koordinaten des linearisierten Modells
$\theta_d$	Sollwert von $\theta$
$\Delta\theta_d$	Eingangsvektor des linearisierten Modells

## Operatoren

$\frac{d}{dt}$	Ableitung nach der Zeit $t$
$\frac{\partial}{\partial q}$	partielle Ableitung nach $q$
$\Sigma$	Summation

# 1 Einleitung

Um das Verhältnis von der Nutzlast zu dem Eigengewicht eines Roboters zu vergrößern, können Roboter in Leichtbauweise gebaut werden. Das führt zu den strukturellen Elastizitäten des Robotersystems, die in manchen Fällen, z.B. bei Putzrobotern, auch erwünscht sind. Die Elastizitäten des Robotersystems haben großen Einfluß auf dessen Dynamik. Für einen einachsigen elastischen Roboterarm haben Fraser und Daniel (1991) die Verstärkung sowie die Pol- und Nullstellen analysiert. Ein mehrgliedriger elastischer Roboterarm ist ein komplexes nichtlineares System. In Abschnitt 2 des vorliegenden Forschungsberichts wird das von De Luca und Siciliano (1991) vorgestellte Modell eines zweigliedrigen elastischen Roboterarms zunächst linearisiert. Dann werden die Verstärkung, Pol- und Nullstellen des linearisierten Modells analysiert.

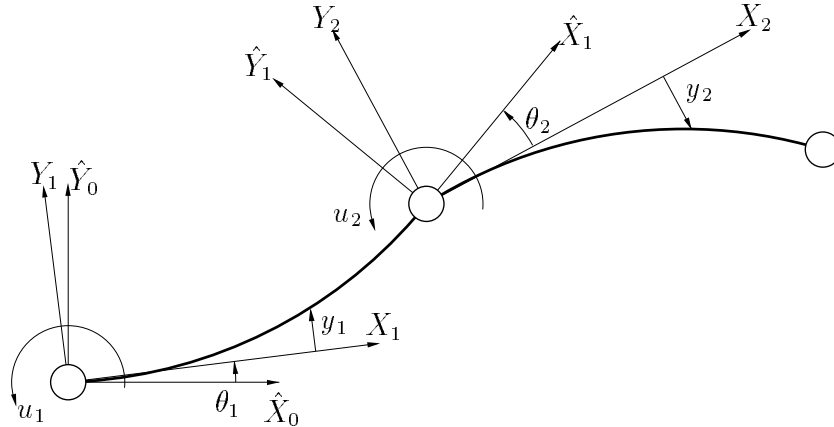
Regelungskonzepte mittels exakter Ein-, Ausgangslinearisierung werden bereits erfolgreich zur Regelung starrer Roboter (Tarn u.a. 1984) und bei Robotern mit elastischen Gelenken (Spong 1987) angewandt. Weil elastische Roboter Nichtphasenminimumsysteme darstellen, kann dieser Regler nicht zur Regelung der Endeffektorposition der elastischen Roboter eingesetzt werden (De Luca u.a. 1989). Obwohl das Verfahren der exakten Linearisierung des Momente/Winkelverhaltens des Gelenks zur Regelung der elastischen Roboter angewandt wird (De Luca und Siciliano 1993), werden die elastischen Schwingungen des Systems nicht ausreichend gedämpft. In Abschnitt 3 wird die Beschränkung der Regelgüte eines zweigliedrigen elastischen Roboterarms bei Anwendung dieses Regelungskonzeptes diskutiert.

Die Regelung von elastischen Robotern ist in den letzten Jahren immer häufiger Gegenstand der Forschung geworden. Verschiedene Methoden wurden für die Regelung von elastischen Robotern entwickelt (Bremer und Pfeiffer 1995, Cannon, Jr. und Schmitz 1984, Cordes 1992, De Luca und Siciliano 1993, Khorrani u.a. 1995, Moudgal u.a. 1994, Pfeiffer 1989, Singh und Schy 1986a,b). Alle diese Regler sind auf der Basis der verallgemeinerten Koordinaten oder der Beschleunigung des Endeffektors ausgelegt worden. In Abschnitt 4 wird die Literatur über die Regelung elastischer Roboter zunächst zusammengefaßt. Dann wird ein Regler für einen zweigliedrigen elastischen Roboter vorgestellt. Dieser Regler besteht aus einem PD-Gelenkregler und der Rückführung der Geschwindigkeit des Armendes.

In Abschnitt 5 wird ein Fuzzy-Regler für einen zweigliedrigen elastischen Roboter vorgestellt. Um die Anzahl der Eingangsgrößen des Fuzzy-Reglers zu verringern, wird zuerst eine Hilfegröße durch Kombination der Zustandsvariablen des Gelenks über einen PD-Gelenkregler generiert. Der Fuzzy-Regler für den Roboter hat als eine Eingangsgröße diese Hilfegröße. Als andere Eingangsgröße wird für den Fuzzy-Regler der Einfluß der Armelastizitäten auf die Geschwindigkeit des Armendes gewählt. Eine Zusammenfassung und ein Ausblick schließen den Forschungsbericht ab.

## 2 Modell eines zweigliedrigen elastischen Roboterarms und dessen Eigenschaften

In Bild 2.1 ist der schematische Aufbau eines planaren, zweigliedrigen elastischen Roboterarms skizziert.



**Bild 2.1:** Zweigliedriger elastischer Roboterarm (De Luca und Siciliano 1991)

Er wird über zwei Motoren angetrieben, die jeweils in den Gelenken die Momente  $u_1(t)$  und  $u_2(t)$  als Eingänge des Systems aufbringen. Neben der Starrkörperbewegung, die durch die beiden Winkel  $\theta_1$  und  $\theta_2$  definiert ist, werden zwei elastische Freiheitsgrade pro elastischem Glied betrachtet, die durch die elastischen Koordinaten  $\delta_{11}$  und  $\delta_{12}$  (Arm 1) bzw. durch  $\delta_{21}$  und  $\delta_{22}$  (Arm 2) repräsentiert werden. Für diesen Roboterarm wird das folgende Modell von De Luca und Siciliano (1991) vorgestellt:

$$\mathbf{B}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{Q}\mathbf{u}. \quad (2.1)$$

$\mathbf{q}$  ist dabei der Vektor der verallgemeinerten starren und elastischen Koordinaten. Er kann wie folgt in die starre und elastische Bewegung unterteilt werden:

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ \boldsymbol{\delta} \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

$\boldsymbol{\theta}$  und  $\boldsymbol{\delta}$  sind dabei die Vektoren der starren und elastischen Koordinaten und ergeben sich zu

$$\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \quad \theta_2]^T, \quad (2.3)$$

$$\boldsymbol{\delta} = [\delta_{11} \quad \delta_{12} \quad \delta_{21} \quad \delta_{22}]^T. \quad (2.4)$$

Die sonstigen Matrizen und Vektoren in Gl. (2.1) besitzen folgende Bedeutung:

$B(\mathbf{q})$	:	Trägheitsmatrix,
$\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$	:	Vektor der Coriolis- und Zentrifugalkräfte,
$D$	:	Dämpfungsmatrix,
$K$	:	Steifigkeitsmatrix,
$Q$	:	Eingangsbelegungsmatrix und
$\mathbf{u} = [u_1(t), u_2(t)]^T$	:	Eingangsvektor.

Entsprechend können  $B(\mathbf{q})$ ,  $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ ,  $D$ ,  $K$  und  $Q$  wie folgt unterteilt werden:

$$B(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} B_{\theta\theta}(\mathbf{q}) & B_{\theta\delta}(\mathbf{q}) \\ B_{\delta\theta}(\mathbf{q}) & B_{\delta\delta}(\mathbf{q}) \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_\theta(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \\ \mathbf{h}_\delta(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

$$D = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & D_e \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

$$K = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & K_e \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

$$Q = \begin{bmatrix} I \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad (2.9)$$

Bei der Modellbildung verwenden De Luca und Siciliano (1991) die geometrisch lineare Balkentheorie. Dieses Modell kann nur für die Simulation einer langsamen Bewegung benutzt werden, weil bei schnellen rotatorischen Bewegungen Zentrifugalkräfte zu einer erhöhten Biegesteifigkeit führen, die nur durch die geometrisch nichtlineare Balkentheorie berücksichtigt werden kann.

Fraser und Daniel (1991) analysieren die Pol- und Nullstellen eines einachsigen elastischen Roboterarms und die Polstellen eines zweigliedrigen elastischen Roboterarms mit dem Ergebnis, daß alle Nullstellen der Übertragungsfunktion zwischen Gelenkmoment und Gelenkwinkel des einachsigen elastischen Arms auf der imaginären Achse der  $s$ -Ebene liegen. Dagegen liegen einige Nullstellen der Übertragungsfunktion vom Gelenkmoment auf die Endeffektorposition in der rechten  $s$ -Halbebene. Es ist noch nicht klar, wo sich die Nullstellen eines zweigliedrigen elastischen Roboterarms befinden. Dieses Problem wird in diesem Forschungsbericht diskutiert.

Um die Pol- und Nullstellen des oben vorgestellten Modells des Roboterarms zu ermitteln, wird eine Linearisierung des stark nichtlinearen Modells aus Gl. (2.1) vorgenommen.

Dies geschieht durch eine Taylorreihenentwicklung mit Abbruch nach dem ersten Glied. Es ergibt sich:

$$\begin{aligned} & \mathbf{B}(\mathbf{q}) \Big|_{\mathbf{q}_0} \Delta \ddot{\mathbf{q}} + \left[ \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \Big|_{\mathbf{q}_0, \dot{\mathbf{q}}_0} + \mathbf{D} \right] \Delta \dot{\mathbf{q}} \\ & + \left[ \frac{\partial (\mathbf{B}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}})}{\partial \mathbf{q}} \Big|_{\mathbf{q}_0} + \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial \mathbf{q}} \Big|_{\mathbf{q}_0, \dot{\mathbf{q}}_0} + \mathbf{K} \right] \Delta \mathbf{q} = \mathbf{Q} \Delta \mathbf{u}, \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C} \Delta \mathbf{q}. \quad (2.11)$$

Dabei bezeichnen die neuen Variablen  $\Delta \mathbf{q}$  und  $\Delta \mathbf{u}$  die Abweichungen des Vektors  $\mathbf{q}$  vom Arbeitspunkt  $\mathbf{q}_0$  sowie des Vektors  $\mathbf{u}$  vom Eingangsvektor am Arbeitspunkt  $\mathbf{u}_0$ :

$$\Delta \mathbf{q} = \mathbf{q} - \mathbf{q}_0, \quad (2.12)$$

$$\Delta \mathbf{u} = \mathbf{u} - \mathbf{u}_0. \quad (2.13)$$

$\mathbf{y}$  ist der Systemausgang und  $\mathbf{C}$  ist die Ausgangsbelegungsmatrix.

Weil der Schulterwinkel  $\theta_1$  im Modell (2.1) nicht auftritt, werden die Verstärkung, Pol- und Nullstellen des Systems (2.10)-(2.11) mit

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

oder

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \phi_{11,e} & \phi_{12,e} & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \phi_{11,e} & \phi_{12,e} & \phi_{21,e} & \phi_{22,e} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

an den Arbeitspunkten  $[0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$ ,  $[0, \frac{\pi}{2}, 0, 0, 0, 0]^T$  und  $[0, \pi, 0, 0, 0, 0]^T$  diskutiert. Bei der Diskussion werden die von De Luca und Siciliano (1991) gegebenen Armparameter benutzt.

In Tabelle 2.1 werden die Verstärkung, Pol- und Nullstellen des Roboterarms am Arbeitspunkt  $[0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$  dargestellt, wenn  $\mathbf{C}$  entsprechend Gl. (2.14) gewählt wird. Dabei sind  $G_{11}(s)$ ,  $G_{12}(s)$ ,  $G_{21}(s)$  und  $G_{22}(s)$  die Übertragungsfunktionen von  $u_1$  auf  $\theta_1$ , von  $u_2$  auf  $\theta_1$ , von  $u_1$  auf  $\theta_2$  und von  $u_2$  auf  $\theta_2$ . Daraus ergeben sich folgende Aussagen:

1. Wie bei dem einachsigen elastischen Roboterarm liegen alle Polstellen und Nullstellen der Übertragungsfunktionen von  $u_1$  auf  $\theta_1$   $G_{11}(s)$  und von  $u_2$  auf  $\theta_2$   $G_{22}(s)$  auf der imaginären Achse oder in der linken  $s$ -Halbebene.
2. Die Kopplungsübertragungsfunktion  $G_{12}(s)$  ist gleich  $G_{21}(s)$ . Es existieren einige Nullstellen in der rechten  $s$ -Halbebene. Das heißt, die Kopplungsteilsysteme sind Nichtphasenminimumsysteme.



**Tabelle 2.1:** Verstärkungen, Pol- und Nullstellen des Roboterarms mit Dämpfung am Arbeitspunkt  $[0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$  mit  $\mathbf{C}$  nach Gl. (2.14).

Übertragungsfunktion		$G_{11}(s)$	$G_{12}(s)$	$G_{21}(s)$	$G_{22}(s)$
Verstärkung		9,7802	-4,4849	-4,4849	2628,8
Index	Polstellen	Nullstellen	Nullstellen	Nullstellen	Nullstellen
1	-692,63	-692,23	-189,47	-189,47	-1,73-5,65j
2	-28,7	-29,67	-4,73	-4,73	-1,73+5,65j
3	-16,26-99,95j	-16,26-99,95j	-16,28-99,95j	-16,28-99,95j	-16,25-99,95j
4	-16,26+99,95j	-16,26+99,95j	-16,28+99,95j	-16,28+99,95j	-16,25+99,95j
5	-3,93-8,18j	-0,99-4,41j			-3,37-16,4j
6	-3,93+8,18j	-0,99+4,41j			-3,37+16,4j
7	-3,31-16,23j	-3,27-16,28j	-3,46-16,28j	-3,46-16,28j	-3,33-13,83j
8	-3,31+16,23j	-3,27+16,28j	-3,46+16,28j	-3,46+16,28j	-3,33+13,83j
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
11	0		13,23	13,23	
12	0		98,13	98,13	

3. Die Übertragungsfunktionen besitzen einige übereinstimmende Pol-/Nullstellenlagen, d. h. es treten Pol-Nullstellen-Kompensationen auf. Deshalb ist das System nicht beobachtbar. Diese Aussage stimmt mit den Ergebnissen der Steuerbarkeits- und Beobachtbarkeitsanalyse des Systems ohne Dämpfung von Riege (1996) überein. Außerdem sind die Unterschiede zwischen manchen Pol- und Nullstellen sehr klein. Das Beobachtbarkeitsmaß (Degree of observability) nach Friedland (1987) ist sehr niedrig.

Um den Einfluß der Konfiguration des Roboters auf die Pol- und Nullstellen zu berücksichtigen, werden Verstärkungen, Pol- und Nullstellen des Roboterarms an den Arbeitspunkten  $[0, \frac{\pi}{2}, 0, 0, 0, 0]^T$  und  $[0, \pi, 0, 0, 0, 0]^T$  in den Tabellen 2.2 und 2.3 betrachtet, wenn  $\mathbf{C}$  gemäß Gl. (2.14) ausgewählt wird. Wird ein Vergleich zwischen den Tabellen 2.1, 2.2 und 2.3 angestellt, können die folgenden Aussagen getroffen werden:

1. Die Konfiguration des Roboters beeinflusst die Pol- und Nullstellen, allerdings nur in geringem Maße. Bei unterschiedlichen Konfigurationen ändert sich die qualitative Verteilung der Pol- und Nullstellen nicht.
2. Die Anzahl der auftretenden Pol-Nullstellenkompensationen bei unterschiedlichen Konfigurationen ist nicht gleich. Das beweist weiter, daß das Beobachtbarkeitsmaß des Systems niedrig ist.

**Tabelle 2.2:** Verstärkungen, Pol- und Nullstellen des Roboterarms mit Dämpfung am Arbeitspunkt  $[0, \frac{\pi}{2}, 0, 0, 0, 0]^T$  mit  $\mathbf{C}$  nach Gl. (2.14).

Übertragungsfunktion		$G_{11}(s)$	$G_{12}(s)$	$G_{21}(s)$	$G_{22}(s)$
Verstärkung		9,7802	-4,467	-4,467	2620,7
Index	Polstellen	Nullstellen	Nullstellen	Nullstellen	Nullstellen
1	-691,37	-690,96	-189,19	-189,19	-1,63-5,6j
2	-28,77	-29,73	-4,33	-4,33	-1,63+5,6j
3	-15,89-98,95j	-15,89-98,95j	-15,89-98,95j	-15,89-98,95j	-15,9-98,95j
4	-15,89+98,95j	-15,89+98,95j	-15,89+98,95j	-15,89+98,95j	-15,9+98,95j
5	-3,95-8,13j	-0,97-4,35j			-3,57-16,67j
6	-3,95+8,13j	-0,97+4,35j			-3,57+16,67j
7	-2,88-15,52j	-2,88-15,52j	-2,88-15,52j	-2,88-15,52j	-2,76-12,15j
8	-2,88+15,52j	-2,88+15,52j	-2,88+15,52j	-2,88+15,52j	-2,76+12,15j
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
11	0		10,67	10,67	
12	0		102,01	102,01	

**Tabelle 2.3:** Verstärkungen, Pol- und Nullstellen des Roboterarms mit Dämpfung am Arbeitspunkt  $[0, \pi, 0, 0, 0, 0]^T$  mit  $\mathbf{C}$  nach Gl. (2.14).

Übertragungsfunktion		$G_{11}(s)$	$G_{12}(s)$	$G_{21}(s)$	$G_{22}(s)$
Verstärkung		9,7802	-4,4843	-4,4843	2628,2
Index	Polstellen	Nullstellen	Nullstellen	Nullstellen	Nullstellen
1	-692,63	-692,23	-189,52	-189,52	-1,56-5,59j
2	-28,7	-29,67	-3,95	-3,95	-1,56+5,59j
3	-16,26-99,95j	-16,26-99,95j	-16,31-100,09j	-16,31-100,09j	-16,28-99,94j
4	-16,26+99,95j	-16,26+99,95j	-16,31+100,09j	-16,31+100,09j	-16,28+99,94j
5	-3,93-8,18j	-0,99-4,41j			-4,36-18,19j
6	-3,93+8,18j	-0,99+4,41j			-4,36+18,19j
7	-3,31-16,23j	-3,27-16,28j	-2,4-16,17j	-2,4-16,17j	-2,45-11,01j
8	-3,31+16,23j	-3,27+16,28j	-2,4+16,17j	-2,4+16,17j	-2,45+11,01j
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
11	0		9,06	9,06	
12	0		99,66	99,66	

**Tabelle 2.4:** Verstärkungen, Pol- und Nullstellen des Roboterarms ohne Dämpfung am Arbeitspunkt  $[0, \frac{\pi}{2}, 0, 0, 0, 0]^T$  mit  $\mathbf{C}$  nach Gl. (2.14).

Übertragungsfunktion		$G_{11}(s)$	$G_{12}(s)$	$G_{21}(s)$	$G_{22}(s)$
Verstärkung		9,7802	-4,467	-4,467	2620,7
Index	Polstellen	Nullstellen	Nullstellen	Nullstellen	Nullstellen
1	-144,27j	-144,02j	-149,91	-149,91	-12,61j
2	+144,27j	144,02j	-6,3	-6,3	12,61j
3	-100,22j	-100,22j	-100,22j	-100,22j	-100,22j
4	+100,22j	100,22j	100,22j	100,22j	100,22j
5	-15,78j	-15,78j	-15,78j	-15,78j	-17,06j
6	+15,78j	15,78j	15,78j	15,78j	17,06j
7	-8,84j	-4,43j			-5,75j
8	+8,84j	4,43j			5,75j
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
11	0		6,3	6,3	
12	0		149,91	149,91	

In der Tabelle 2.4 werden die Verstärkungen, Pol- und Nullstellen des Roboterarms ohne Dämpfung am Arbeitspunkt  $[0, \frac{\pi}{2}, 0, 0, 0, 0]^T$  angegeben, wenn  $\mathbf{C}$  entsprechend Gl. (2.14) gewählt wird. Im Vergleich mit der Tabelle 2.2 verändern sich die Eigenfrequenzen der Schwingungsmoden des Roboters nicht. Die Kopplungsteilsysteme sind ebenfalls Nichtphasenminimumsysteme. Aber sowohl alle Polstellen als auch die Nullstellen des Systems liegen auf der imaginären Achse oder auf der reellen Achse.

In der Tabelle 2.5 sind die Verstärkungen, Pol- und Nullstellen des Roboterarms mit Dämpfung am Arbeitspunkt  $[0, \frac{\pi}{2}, 0, 0, 0, 0]^T$  angegeben, wenn  $\mathbf{C}$  die Gl. (2.15) erfüllt. Anders als beim einachsigen elastischen Roboterarm liegt für den zweigliedrigen elastischen Roboterarm keine Nullstelle von  $G_{11}(s)$  und  $G_{22}(s)$  in der rechten  $s$ -Halbebene. Im Vergleich zur Tabelle 2.2 verändert sich die qualitative Verteilung der Nullstellen von  $G_{11}(s)$  und  $G_{22}(s)$  nicht. Aber  $G_{12}(s)$  ist nicht mehr gleich  $G_{21}(s)$ . Außerdem ist das Kopplungsteilsystem  $G_{21}(s)$  ein Phasenminimumsystem.

**Tabelle 2.5:** Verstärkungen, Pol- und Nullstellen des Roboterarms mit Dämpfung am Arbeitspunkt  $[0, \frac{\pi}{2}, 0, 0, 0, 0]^T$  mit  $\mathbf{C}$  nach Gl. (2.15).

Übertragungsfunktion		$G_{11}(s)$	$G_{12}(s)$	$G_{21}(s)$	$G_{22}(s)$
Verstärkung		4,9042	-8,5476	0,4372	2607,1
Index	Polstellen	Nullstellen	Nullstellen	Nullstellen	Nullstellen
1	-691,37	-689,94	-149,86	-7222,6	-1,18-14,92j
2	-28,77	-29,36	-7,86	-64	-1,18+14,92j
3	-15,89-98,95j	-15,89-98,95j	-15,89-98,95j	-15,9-99j	-15,9-98,95j
4	-15,89+98,95j	-15,89+98,95j	-15,89+98,95j	-15,9+99j	-15,9+98,95j
5	-3,95-8,13j	-1,95-6,02j			-4,57-13,57j
6	-3,95+8,13j	-1,95+6,02j			-4,57+13,57j
7	-2,88-15,52j	-2,88-15,52j	-2,88-15,52j	-2,9-15,5j	-1,27-4,87j
8	-2,88+15,52j	-2,88+15,52j	-2,88+15,52j	-2,9+15,5j	-1,27+4,87j
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
11	0		0,22-19,89j	0	
12	0		0,22+19,89j	0	

### 3 Beschränkung der Regelgüte des linearisierenden Reglers

Der Reglerentwurf für einen elastischen Roboterarm kann von drei verschiedenen Situationen ausgehen (Baruh und Tadikonda 1989):

1. Es wird die Dynamik des entsprechenden starren Roboterarms zugrunde gelegt. Der Einfluß der Armelastizitäten wird vernachlässigt (Yigit 1994).
2. Der Einfluß der Armelastizitäten wird in gewissem Maße beachtet. Die Informationen über die elastische Deformation werden bei der Regelung des Roboterarms benutzt. Die elastischen Schwingungen des Systems werden jedoch nicht ausreichend gedämpft (De Luca und Siciliano 1993).
3. Die elastischen und starren Bewegungen werden gleichzeitig geregelt (De Luca u.a. 1989, Khorrami und Jain 1993, Moudgal u.a. 1994).

Für die erste Situation haben Cetinkunt und Book (1990) die Beschränkung der Regelgüte des elastischen Roboterarms geprüft. Sie haben bewiesen, daß für den Fall eines auf der Basis der rückgeführten Gelenk-Zustandsgrößen ausgelegten Reglers die Bandbreite des geregelten zweigliedrigen elastischen Roboterarms zwei Drittel der niedrigsten Eigenfrequenz des Arms beträgt, wenn dessen beide Gelenke arretiert werden. Hier wird die Beschränkung der Regelgüte des elastischen Roboterarms in der zweiten Situation untersucht. Das Regelgesetz basiert auf der Basis einer exakten Linearisierung des Momente/Winkelverhaltens des Gelenks.

Ein Rückführgesetz mittels exakter Linearisierung des Gelenkmomente/-winkelverhaltens für den Roboterarm nach Gl. (2.1) lautet (De Luca und Siciliano 1993):

$$\mathbf{u} = [\mathbf{B}_{\theta\theta}(\mathbf{q}) - \mathbf{B}_{\theta\delta}(\mathbf{q})\mathbf{B}_{\delta\delta}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{B}_{\delta\theta}(\mathbf{q})]\boldsymbol{\gamma} + \mathbf{h}_{\theta}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{B}_{\theta\delta}(\mathbf{q})\mathbf{B}_{\delta\delta}^{-1}(\mathbf{q})[\mathbf{h}_{\delta}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{K}_e\boldsymbol{\delta} + \mathbf{D}_e\dot{\boldsymbol{\delta}}], \quad (3.1)$$

$$\boldsymbol{\gamma} = \ddot{\boldsymbol{\theta}}_d - \mathbf{K}_d(\dot{\boldsymbol{\theta}} - \dot{\boldsymbol{\theta}}_d) - \mathbf{K}_p(\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_d). \quad (3.2)$$

Dabei ist  $\boldsymbol{\theta}_d$  die Sollbahn des Roboterarms. Ferner gilt:

$$\mathbf{K}_d = \begin{bmatrix} k_{d1} & 0 \\ 0 & k_{d2} \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

$$\mathbf{K}_p = \begin{bmatrix} k_{p1} & 0 \\ 0 & k_{p2} \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

Bei der folgenden Untersuchung werden

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}}_d = 0 \quad (3.5)$$

und

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_d = 0 \quad (3.6)$$

angenommen. Nach Einsetzen von (3.1)-(3.6) in Gl. (2.1) und einigen Umformungen folgt:

$$\begin{cases} \ddot{\boldsymbol{\theta}} &= -\mathbf{K}_d \dot{\boldsymbol{\theta}} - \mathbf{K}_p \boldsymbol{\theta} + \mathbf{K}_p \boldsymbol{\theta}_d \\ \mathbf{B}_{\delta\delta}(\mathbf{q}) \ddot{\boldsymbol{\delta}} &= \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{\delta\theta}(\mathbf{q}) \mathbf{K}_d & -\mathbf{D}_e \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{\delta\theta}(\mathbf{q}) \mathbf{K}_p & -\mathbf{K}_e \end{bmatrix} \mathbf{q} \\ &- \mathbf{h}_\delta(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{B}_{\delta\theta}(\mathbf{q}) \mathbf{K}_p \boldsymbol{\theta}_d \end{cases} \quad (3.7)$$

Zur Überprüfung der Beschränkung der Regelgüte des elastischen Roboterarms durch eine exakte Linearisierung des Momente/Winkelverhaltens des Gelenkes wird Gl. (3.7) am Arbeitspunkt  $\mathbf{q}_d = [0, \theta_{2d}, 0, 0, 0, 0]^T$  linearisiert. Es ergibt sich folgende lineare Differentialgleichung:

$$\begin{cases} \Delta \ddot{\boldsymbol{\theta}} &= -\mathbf{K}_d \Delta \dot{\boldsymbol{\theta}} - \mathbf{K}_p \Delta \boldsymbol{\theta} + \mathbf{K}_p \Delta \boldsymbol{\theta}_d \\ \mathbf{B}_{\delta\delta}(\mathbf{q})|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}_d} \Delta \ddot{\boldsymbol{\delta}} &= \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{\delta\theta}(\mathbf{q}) \mathbf{K}_d & -\mathbf{D}_e \end{bmatrix} \Big|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}_d} \Delta \dot{\mathbf{q}} \\ &+ \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{\delta\theta}(\mathbf{q}) \mathbf{K}_p & -\mathbf{K}_e \end{bmatrix} - \frac{\partial [\mathbf{B}_{\delta\theta}(\mathbf{q}) \mathbf{K}_p \boldsymbol{\theta}_d]}{\partial \mathbf{q}} \right\} \Big|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}_d} \Delta \mathbf{q} \\ &- \mathbf{B}_{\delta\theta}(\mathbf{q}) \mathbf{K}_p \Big|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}_d} \Delta \boldsymbol{\theta}_d \end{cases} \quad (3.8)$$

In den Tabellen 3.1, 3.2 und 3.3 werden die Polstellen, Dämpfung und Kreisfrequenz des Systems (3.8) am Arbeitspunkt  $[0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$  für

$$1. \quad \begin{cases} k_{p1} = 0 \\ k_{d1} = 0 \\ k_{p2} = 0 \\ k_{d2} = 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

$$2. \quad \begin{cases} k_{p1} = 0, 1521 \\ k_{d1} = 0, 78 \\ k_{p2} = 0, 1521 \\ k_{d2} = 0, 78 \end{cases} \quad (3.10)$$

$$3. \quad \begin{cases} k_{p1} = 100 \\ k_{d1} = 20 \\ k_{p2} = 100 \\ k_{d2} = 20 \end{cases} \quad (3.11)$$

dargestellt. Daraus können die folgenden Aussagen abgeleitet werden:

1. Durch Veränderung von  $k_{p1}$ ,  $k_{d1}$ ,  $k_{p2}$  und  $k_{d2}$  können nur die Moden der Starrkörperbewegung verändert werden. Die Änderung hat keinen Einfluß auf die elastischen Moden. Deshalb kann die Regelgüte des Systems durch Änderung von  $k_{p1}$ ,  $k_{d1}$ ,  $k_{p2}$  und  $k_{d2}$  nur verbessert werden, wenn die Moden der Starrkörperbewegung einen dominanten Anteil an der Dynamik des Gesamtsystems besitzen.

**Tabelle 3.1:** Polstellen, Dämpfung und Kreisfrequenz des linearisierten Systems (3.8) am Arbeitspunkt  $[0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$  für  $k_{p1} = 0$ ,  $k_{d1} = 0$ ,  $k_{p2} = 0$  und  $k_{d2} = 0$ .

Index	Polstellen	Dämpfung	Kreisfrequenz
1	0	1	0
2	0	1	0
3	0	1	0
4	0	1	0
5	-0,39-2,73j	0,14	2,76
6	-0,39+2,73j	0,14	2,76
7	-2,15-12,23j	0,17	12,42
8	-2,15+12,23j	0,17	12,42
9	-3,41-16,4j	0,2	16,75
10	-3,41+16,4j	0,2	16,75
11	-16,25-99,95j	0,16	101,26
12	-16,25+99,95j	0,16	101,26

- Ein Polpaar in der Nähe der imaginären Achse ist nur schwach gedämpft. Daher ist die Regelgüte des elastischen Roboterarms durch eine exakte Linearisierung des Momente/Winkelverhaltens des Gelenkes stark eingeschränkt. Dies kann weiter durch die Analyse der Bandbreite des geregelten Roboterarms bewiesen werden.
- Die Kreisfrequenz der ersten elastischen Mode des geregelten elastischen Roboterarms durch eine exakte Linearisierung des Momente/Winkelverhaltens des Gelenkes beträgt nur 2,76 rad/s. Das heißt, die Frequenz liegt bei 0,4393 Hz. Um die Position des Endeffektors gut regeln zu können, dürfen die elastischen Moden nicht übermäßig angeregt werden. Das bedeutet, daß die Frequenz der Bewegung des geregelten elastischen Roboterarms maximal kleiner als 0,4393 Hz (kleiner als die niedrigste Eigenfrequenz des Arms 0,48 Hz (De Luca und Siciliano 1991)) sein darf. Obwohl die Informationen über die elastischen Deformationen des Arms bei der Regelung durch eine exakte Linearisierung des Momente/Winkelverhaltens des Gelenkes benutzt werden, vergrößert sich die Bandbreite des Systems nicht im Vergleich zu der Regelung durch eine einfache Rückführung von Zustandsgrößen des Gelenkes (Cetinkunt und Book 1990). Dies wurde noch durch Simulation bestätigt. In der Simulation ist der geregelte elastische Roboterarm durch eine exakte Linearisierung des Momente/Winkelverhaltens des Gelenkes instabil, wenn die Kreisfrequenz der beiden Starrkörperbewegungen 1 rad/s beträgt und für  $k_{p1} = 1$ ,  $k_{d1}=2$ ,  $k_{p2} = 4$  und  $k_{d2} = 4$  gilt.

**Tabelle 3.2:** Polstellen, Dämpfung und Kreisfrequenz des linearisierten Systems (3.8) am Arbeitspunkt  $[0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$  für  $k_{p1} = 0,1521$ ,  $k_{d1} = 0,78$ ,  $k_{p2} = 0,1521$  und  $k_{d2} = 0,78$ .

Index	Polstellen	Dämpfung	Kreisfrequenz
1	-0,39	1	0
2	-0,39	1	0
3	-0,39	1	0
4	-0,39	1	0
5	-0,39-2,73j	0,14	2,76
6	-0,39+2,73j	0,14	2,76
7	-2,15-12,23j	0,17	12,42
8	-2,15+12,23j	0,17	12,42
9	-3,41-16,4j	0,2	16,75
10	-3,41+16,4j	0,2	16,75
11	-16,25-99,95j	0,16	101,26
12	-16,25+99,95j	0,16	101,26

**Tabelle 3.3:** Polstellen, Dämpfung und Kreisfrequenz des linearisierten Systems (3.8) am Arbeitspunkt  $[0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$  für  $k_{p1} = 100$ ,  $k_{d1} = 20$ ,  $k_{p2} = 100$  und  $k_{d2} = 20$ .

Index	Polstellen	Dämpfung	Kreisfrequenz
1	-0,39-2,73j	0,14	2,76
2	-0,39+2,73j	0,14	2,76
3	-2,15-12,23j	0,17	12,42
4	-2,15+12,23j	0,17	12,42
5	-3,41-16,4j	0,2	16,75
6	-3,41+16,4j	0,2	16,75
7	-10	1	0
8	-10	1	0
9	-10	1	0
10	-10	1	0
11	-16,25-99,95j	0,16	101,26
12	-16,25+99,95j	0,16	101,26



## 4 Regelung eines zweigliedrigen elastischen Roboterarms

### 4.1 Zusammenfassung der Literatur

Wie in den Aufsätzen von Chalhoub und Ulsoy (1986), Kleemann (1989), Cetinkunt und Book (1990) und in Abschnitt 3 erwähnt, reicht der Gelenkregler für einen elastischen Arm nicht mehr aus. Die Regelungsaufgabe bei elastischen Robotern besteht deshalb neben der Regelung der Gelenkwinkel auch in einer Erhöhung der Dämpfung der Schwingungen aufgrund der Armelastizitäten, um eine gute, beispielsweise überschwingfreie Positionierung der Nutzlast zu erzielen. Es ist offensichtlich, daß der Gelenkregler auf der Messung des Gelenkwinkels und der Gelenkwinkelgeschwindigkeit basiert und den Roboter durch den Gelenkmotor regelt. Die elastischen Bewegungen lassen sich auf drei verschiedene Arten, mittels Dehnungsmeßstreifen (DMS) (Cordes 1992 und Arteaga Pérez 1995), Beschleunigungsmesser (Kotnik u. a. 1988, Khorrani und Jain 1993, Garcia-Benitez u. a. 1993, Moudgal u. a. 1994 sowie Moudgal u. a. 1995) und durch ein externes, meist optisches Positionsmeßverfahren (Cannon, Jr. und Schmitz 1984) erfassen. Außerdem kann die Dämpfung der Armelastizitäten auch durch drei verschiedene Methoden, die Gelenkmotoren (Singh und Schy 1986b, Konno und Uchiyama 1995 sowie Castelazo und Lee 1990), anders geartete Stellglieder (Shi und Atluri 1990, Sakawa und Matsuno 1986 sowie Singh und Schy 1986a) und viskoelastische Schichten (Alberts u. a. 1990), durchgeführt werden.

Entsprechend dem Entwurf der Gelenkregler kann der Reglerentwurf für die Dämpfung der Armelastizitäten mit oder ohne Hilfe des Robotermodells durchgeführt werden. Cannon, Jr. und Schmitz (1984), Singh und Schy (1986a,b) führen den Reglerentwurf auf der Basis eines linearen Modells des elastischen Roboters durch Optimierung verschiedener Gütekriterien durch. Konno und Uchiyama (1995) stellen eine Methode zum Reglerentwurf für die Dämpfung der Armelastizitäten mit Hilfe eines nichtlinearen Modells des Roboters vor. Zum Reglerentwurf mit diesen Methoden werden die Informationen über die verallgemeinerten elastischen Koordinaten benötigt, die nicht direkt meßbar sind. Deshalb müssen die verallgemeinerten elastischen Koordinaten zuerst aus den Meßwerten der Dehnung des Arms (Cordes 1992 und Arteaga Pérez 1995) oder der Position des Endeffektors (Cannon, Jr. und Schmitz 1984) berechnet werden. Kotnik u. a. (1988) legen einen Regler für die Dämpfung der Armelastizitäten durch Rückführung der Beschleunigung des Endeffektors mit Hilfe des Wurzelortskurvenverfahrens aus. Zum Vergleich stellen Kotnik u. a. (1988) auch einen Regler für die Dämpfung der Armelastizitäten durch Rückführung der Position des Endeffektors vor. Durch Lösung eines linearen optimalen Ausgangsrückführungsproblems legen Khorrani und Jain (1993) einen ähnlichen Regler aus. Dagegen realisieren Castelazo und Lee (1990) die Dämpfung der Armelastizitäten durch nichtlineare Rückführung der verallgemeinerten elastischen Koordinaten ohne Hilfe des Modells. Garcia-Benitez u. a. (1993) und Moudgal u. a. (1994) sowie

Moudgal u. a. (1995) haben ein Zweiebenen-Regelungskonzept bestehend aus einer Überwachungsregelung und einer Fuzzy-Regelung des elastischen Roboters durch Rückführung der Gelenkposition und Beschleunigung des Endeffektors diskutiert. Neben diesen aktiven Dämpfungsreglern haben Khorrami u. a. (1995) sowie Tokhi und Azad (1996) auch passive Dämpfungsregler, durch Eingangssignalverformung (Input Preshaping), entworfen.

Im Gegensatz zu externen Positionsmeßverfahren erfassen Dehnungsmeßstreifen (DMS) nur die lokalen Dehnungen. Bei mehrgliedrigen elastischen Robotern ist die Dehnung des letzten Arms normalerweise sehr klein, die Schwingung des Endeffektors hingegen sehr stark. Es ist schwierig, die Schwingung durch Rückführung dieser Dehnungen zu dämpfen. Außerdem ermöglicht die direkte Positionsmessung auch die Bestimmung der relativen Position zwischen dem Endeffektor und einem möglichen beweglichen Gegenstand in der Umgebung des Roboters sowie die Störungen, wie sie beispielsweise durch Getriebelose in das System eingebracht werden, zu kompensieren. Beschleunigungsmesser ermitteln auch globale Meßwerte. Ferner existiert ein algebraischer Durchgang vom Gelenkmoment zur Beschleunigung des Endeffektors (Khorrami und Jain 1993), den es zwischen Gelenkmoment und Endeffektorposition nicht gibt. Außerdem kann die Rückführung der Beschleunigung des Endeffektors zu einer algebraischen Schleife führen (Bondi u. a. 1988). Obwohl externe Positionsmeßverfahren viele Vorteile haben und obwohl es nicht schwerer ist, die Geschwindigkeit des Endeffektors aus seiner Position zu berechnen als die verallgemeinerten elastischen Koordinaten aus der Endeffektorposition, gibt es in der Literatur sehr wenige Berichte über die Dämpfung der Armelastizitäten durch Rückführung der Geschwindigkeit des Endeffektors. In diesem Bericht wird die Dämpfung der Armelastizität durch die Rückführung der Geschwindigkeit des Endeffektors diskutiert. Zuerst werden die Position und Geschwindigkeit des Armendes berechnet. Dann wird die Regelung des elastischen Roboterarms durch die Zusammenarbeit eines PD-Gelenkreglers und der Rückführung der Endeffektorgeschwindigkeit realisiert.

## 4.2 Position und Geschwindigkeit des Armendes

Für einen planaren elastischen Roboterarm sind die Ausgänge des optischen Positionsmeßverfahrens normalerweise die Koordinaten in  $x$ - und  $y$ -Richtung. Diese Koordinaten können nicht direkt für den Entwurf des Reglers benutzt werden. Daher muß ein neuer Ausgang definiert werden. Für einen einachsigen elastischen Roboterarm haben Fraser und Daniel (1991) sowie Aoustin u. a. (1994) die Position des Armendes als die Bogenlänge  $l\theta + w$ , die das Armende um den Anfang des Arms bewegt hat, definiert. Es ist schwierig, aus den Ausgängen des optischen Positionsmeßverfahrens diese Größe zu ermitteln und diese Definition auf mehrgliedrige elastische Roboterarme zu erweitern. Für einen zweigliedrigen planaren elastischen Roboterarm kann die Position des Endes des  $i$ -ten Arms über die Winkel

$$\alpha_i = n_i\pi + \arctan\left(\frac{p_y^i}{p_x^i}\right), \quad i = 1, 2 \quad (4.1)$$

definiert werden, die das Armende des  $i$ -ten Arms um den Ursprung des Inertialkoordinatensystems gedreht hat. Dabei ist  $n_i$  ein Integral,  $p_y^i$  und  $p_x^i$  sind die Koordinaten des Endes des  $i$ -ten Arms in  $x$ - und  $y$ -Richtung. Wegen der Kontinuität dieses Winkels bestimmen sich die  $n_i$  als Lösungen der folgenden Ungleichung:

$$\frac{-2n_i - 1}{2}\pi < \arctan\left(\frac{p_y^i}{p_x^i}\right) - \alpha_i((k-1)T) < \frac{-2n_i + 1}{2}\pi. \quad (4.2)$$

Dabei ist  $\alpha_i(kT)$  der Wert von  $\alpha_i$  zum Zeitpunkt  $t = kT$  mit der Abtastzeit  $T$ .

Wird Gl. (4.1) nach der Zeit abgeleitet, ergibt sich die Winkelgeschwindigkeit  $\omega_i$  des fernen Endes des  $i$ -ten Arms zu:

$$\omega_i = \frac{d\alpha_i}{dt} = \frac{\frac{dp_y^i}{dt}p_x^i - p_y^i\frac{dp_x^i}{dt}}{(p_y^i)^2 + (p_x^i)^2}. \quad (4.3)$$

In der Simulation können  $p_y^i$  und  $p_x^i$  ( $i = 1, 2$ ) durch die folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$p_y^1 = l_1 \sin \theta_1 + y_1 \cos \theta_1, \quad (4.4)$$

$$p_x^1 = l_1 \cos \theta_1 - y_1 \sin \theta_1, \quad (4.5)$$

$$p_y^2 = l_1 \sin \theta_1 + y_1 \cos \theta_1 + (l_2 - y_2 y_1') \sin(\theta_1 + \theta_2) + (l_2 y_1' + y_2) \cos(\theta_1 + \theta_2), \quad (4.6)$$

$$p_x^2 = l_1 \cos \theta_1 - y_1 \sin \theta_1 + (l_2 - y_2 y_1') \cos(\theta_1 + \theta_2) - (l_2 y_1' + y_2) \sin(\theta_1 + \theta_2). \quad (4.7)$$

mit:

$$y_1 = \phi_{11,e} \delta_{11} + \phi_{12,e} \delta_{12}, \quad (4.8)$$

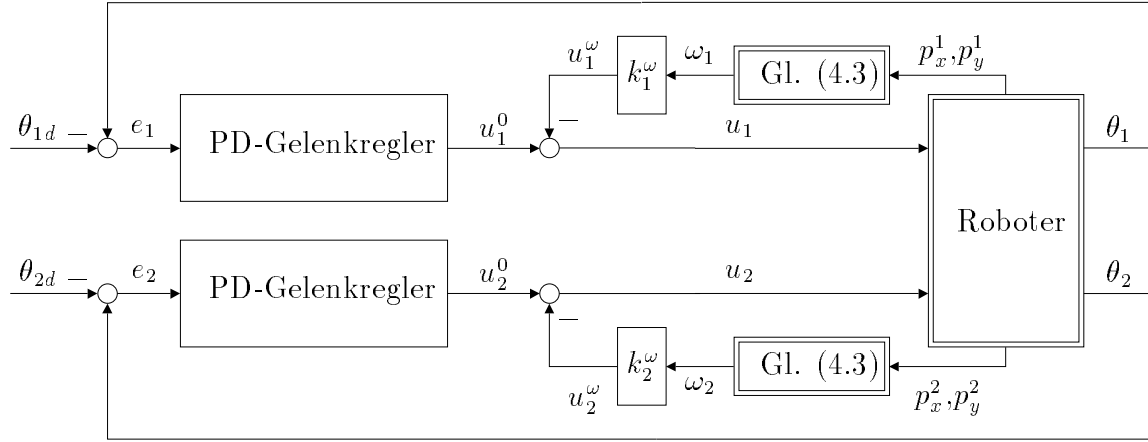
$$y_1' = \phi'_{11,e} \delta_{11} + \phi'_{12,e} \delta_{12}, \quad (4.9)$$

$$y_2 = \phi_{21,e} \delta_{21} + \phi_{22,e} \delta_{22}. \quad (4.10)$$

Dabei werden  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $\phi_{11,e}$ ,  $\phi_{12,e}$ ,  $\phi'_{11,e}$ ,  $\phi'_{12,e}$ ,  $\phi_{21,e}$  und  $\phi_{22,e}$  nach De Luca und Siciliano (1991) definiert.

### 4.3 Regelung mit einem PD-Gelenkregler und Rückführung der Geschwindigkeit des Armendes

Die Dämpfung der Armelastizität durch die Rückführung der Geschwindigkeit des Armendes wird durch Simulation eines zweigliedrigen planaren, elastischen Roboterarms überprüft. In Bild 4.1 ist der Regelkreis dargestellt.



**Bild 4.1:** Regelkreis für die Regelung eines zweigliedrigen elastischen Roboterarms

Die Parameter dieses Arms und ein Simulationsmodell werden von De Luca und Siciliano (1991) vorgestellt.

Die gewünschten Werte der Position des Schulter- und Ellbogengelenks sowie des Endeffektors sind  $\frac{\pi}{4}$  rad,  $\frac{\pi}{4}$  rad und 1,1781 rad. Die Simulation beginnt mit den Anfangsbedingungen:

$$\begin{cases} \theta_i(0) = 0 & i = 1, 2 \\ \delta_{ij}(0) = 0 & i, j = 1, 2 \\ \dot{\theta}_i(0) = 0 & i = 1, 2 \\ \dot{\delta}_{ij}(0) = 0 & i, j = 1, 2 \end{cases} \quad (4.11)$$

und erstreckt sich über eine Simulationszeit von 15 Sekunden.

Die Bilder 4.2 bis 4.10 zeigen die Simulationsergebnisse dieses Roboterarms bei Kombination des PD-Gelenkreglers und der Dämpfung der Armelastizität durch Rückführung der Geschwindigkeit des Armendes. Zum Vergleich sind die Ergebnisse der Regelung ohne Dämpfung der Armelastizitäten dargestellt. Die Rückführung der Geschwindigkeit des Armendes ist:

$$\begin{cases} u_1^\omega = k_1^\omega \omega_1 \\ u_2^\omega = k_2^\omega \omega_2 \end{cases}, \quad (4.12)$$

der PD-Gelenkregler lautet

$$\begin{cases} u_1^0 = -k_1^d \dot{\theta}_1 - k_1^p (\theta_1 - \theta_{1d}) \\ u_2^0 = -k_2^d \dot{\theta}_2 - k_2^p (\theta_2 - \theta_{2d}) \end{cases}. \quad (4.13)$$

Wenn der PD-Gelenkregler und die Rückführung der Geschwindigkeit des Armendes zusammenarbeiten, ergeben sich die Momente des Motors aus:

$$\begin{cases} u_1 = u_1^0 - u_1^\omega \\ u_2 = u_2^0 - u_2^\omega \end{cases} \quad (4.14)$$

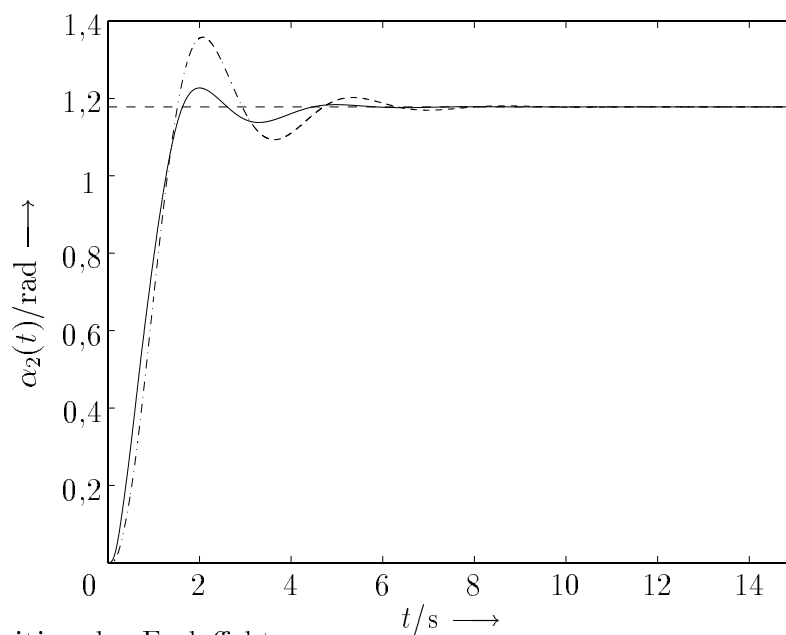
Dabei sind  $k_1^\omega$ ,  $k_2^\omega$ ,  $k_1^d$ ,  $k_2^d$ ,  $k_1^p$  und  $k_2^p$  die Reglerkonstanten. Weil der elastische Roboterarm ein Nichtphasenminimumsystem ist, können die Differenzier- und Proportionalbeiwerte der PD-Gelenkregler nur sehr klein gewählt werden. Für den betrachteten Roboterarm ist die Beschränkung des Differenzierbeiwertes für das Ellbogengelenk besonders stark (kleiner als 0,55 Nms/rad). Unter diesen Umständen kann man nur einen wenig größeren Proportionalbeiwert für den PD-Ellbogen-Gelenkregler wählen, damit der geregelte Roboterarm schnell bewegt werden kann. Bei der Simulation werden die Reglerkonstanten wie folgt gewählt, wenn der Arm ausschließlich mit den PD-Gelenkreglern geregelt wird:

$$\begin{cases} k_1^d = 4 \\ k_1^p = 4 \\ k_2^d = 0,45 \\ k_2^p = 1 \end{cases} \quad (4.15)$$

Bild 4.4 verdeutlicht, daß diese Parametrierung zu einer großen Überschwingweite führt. Wenn der Arm mit einer Kombination aus PD-Gelenkregler und Geschwindigkeitsrückführung geregelt wird, werden die Reglerkonstanten so gewählt, daß das Schulter- und Ellbogengelenk des Arms bei der Verwendung dieser Regler ebenso schnell wie bei der Regelung allein mit den PD-Gelenkreglern bewegt werden können. Die folgenden Reglerkonstanten werden gewählt:

$$\begin{cases} k_1^d = 2,6 \\ k_1^p = 4 \\ k_2^d = 0 \\ k_2^p = 1,5 \\ k_1^\omega = 1,4 \\ k_2^\omega = 0,45 \end{cases} \quad (4.16)$$

Aus den Simulationsergebnissen kann man sehen, daß die Rückführung der Geschwindigkeit des fernen Armendes nicht nur die elastische Schwingung, sondern auch das Überschwingen dämpfen kann.

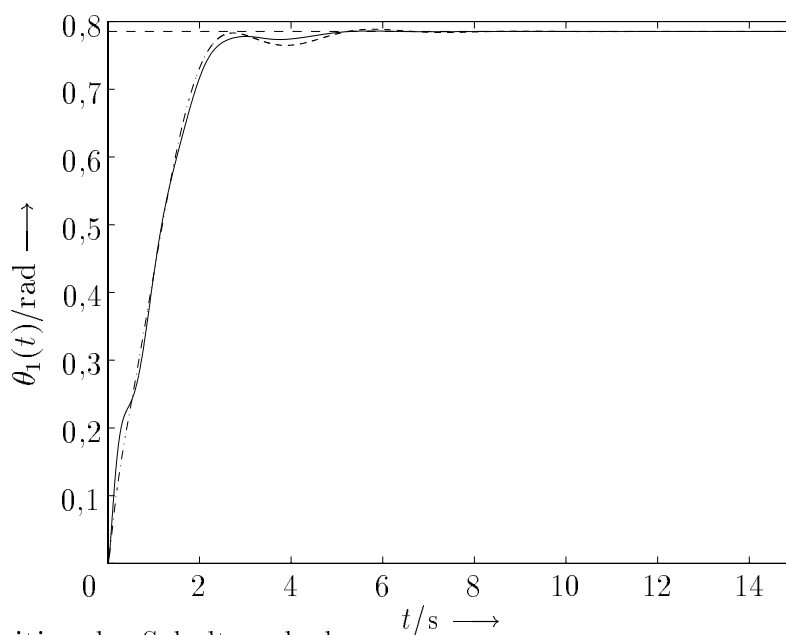


**Bild 4.2:** Position des Endeffektors

„ — — “ Sollwert

„ — “ Kombination aus PD-Gelenkregler und Geschwindigkeitsrückführung

„ - · - “ Regelung ausschließlich mit PD-Gelenkreglern

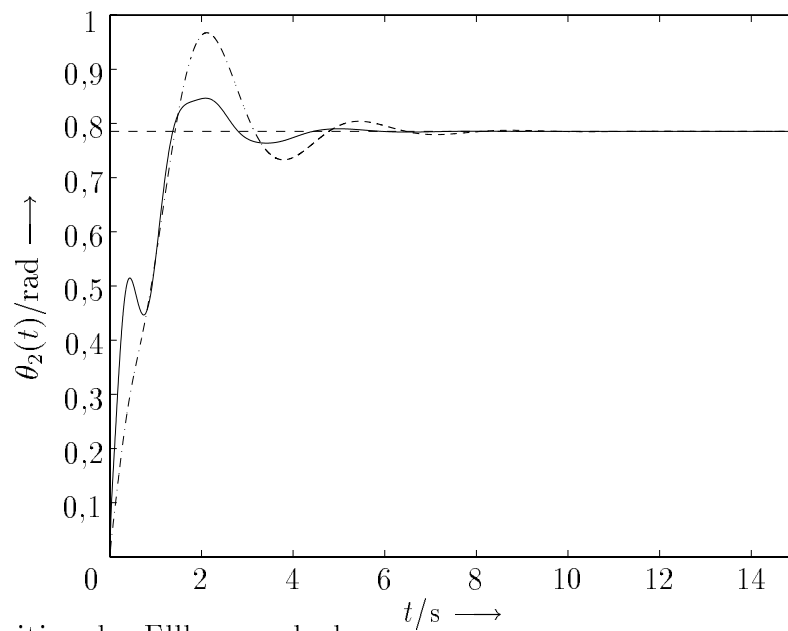


**Bild 4.3:** Position des Schultergelenks

„ — — “ Sollwert

„ — “ Kombination aus PD-Gelenkregler und Geschwindigkeitsrückführung

„ - · - “ Regelung ausschließlich mit PD-Gelenkreglern

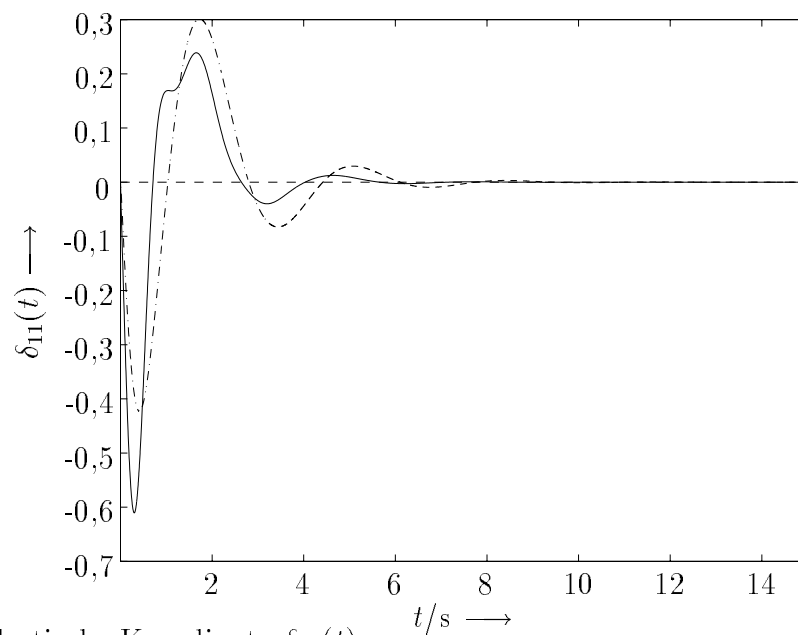


**Bild 4.4:** Position des Ellbogengelenks

„ — — “ Sollwert

„ — “ Kombination aus PD-Gelenkregler und Geschwindigkeitsrückführung

„ - - “ Regelung ausschließlich mit PD-Gelenkreglern

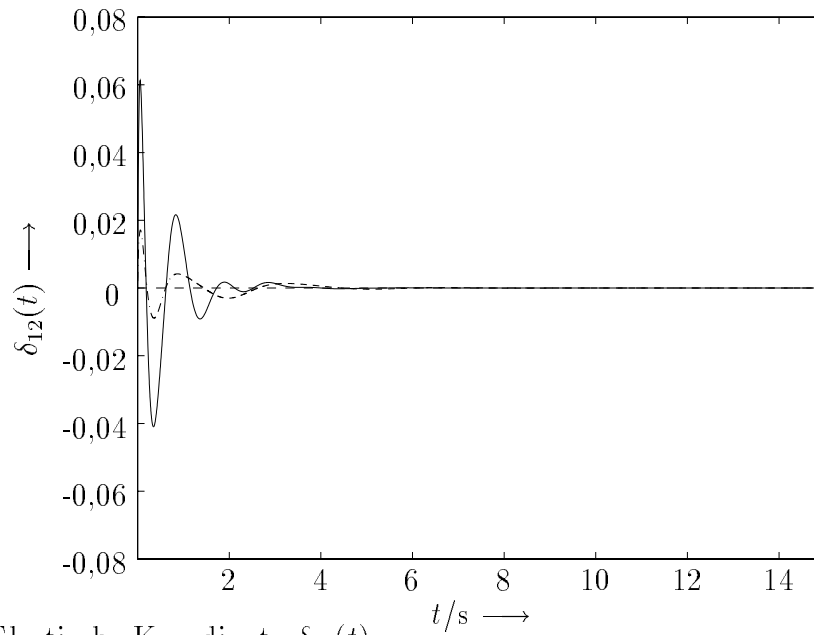


**Bild 4.5:** Elastische Koordinate  $\delta_{11}(t)$

„ — — “ Sollwert

„ — “ Kombination aus PD-Gelenkregler und Geschwindigkeitsrückführung

„ - - “ Regelung ausschließlich mit PD-Gelenkreglern

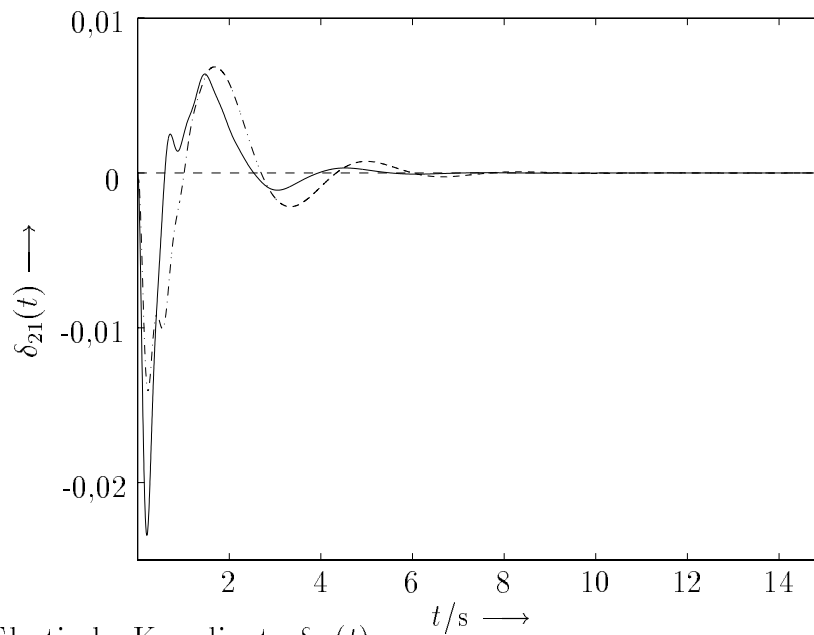


**Bild 4.6:** Elastische Koordinate  $\delta_{12}(t)$

„ — — “ Sollwert

„ — “ Kombination aus PD-Gelenkregler und Geschwindigkeitsrückführung

„ — · “ Regelung ausschließlich mit PD-Gelenkreglern



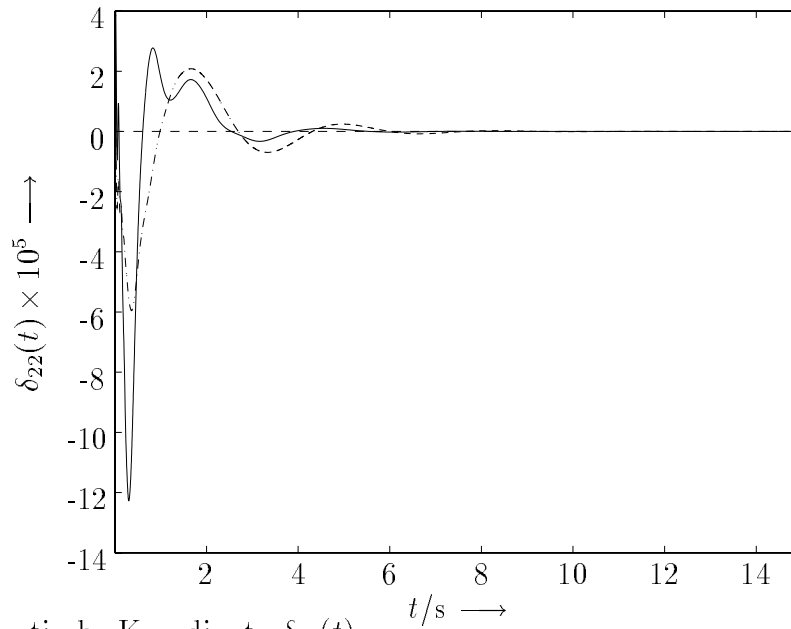
**Bild 4.7:** Elastische Koordinate  $\delta_{21}(t)$

„ — — “ Sollwert

„ — “ Kombination aus PD-Gelenkregler und Geschwindigkeitsrückführung

„ — · “ Regelung ausschließlich mit PD-Gelenkreglern



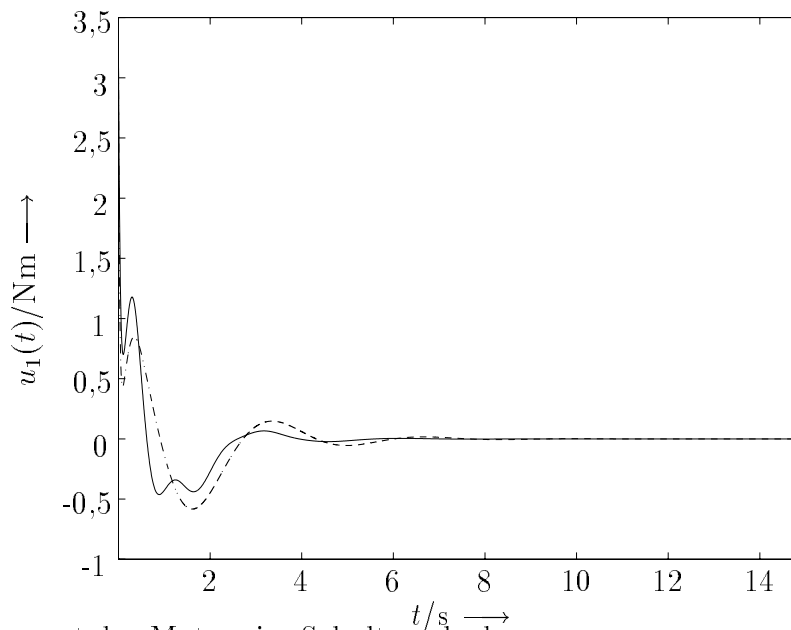


**Bild 4.8:** Elastische Koordinate  $\delta_{22}(t)$

„ — “ Sollwert

„ - - “ Kombination aus PD-Gelenkregler und Geschwindigkeitsrückführung

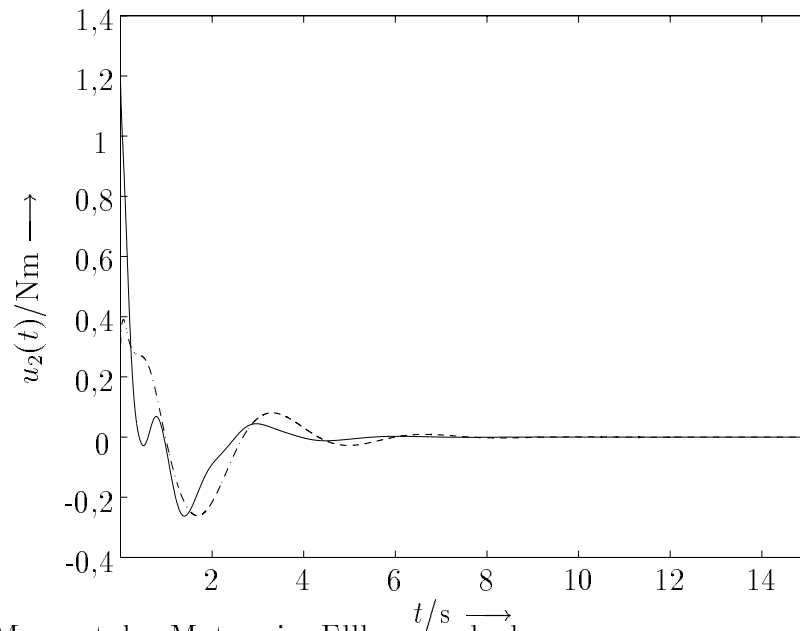
„ - · “ Regelung ausschließlich mit PD-Gelenkreglern



**Bild 4.9:** Moment des Motors im Schultergelenk

„ — “ Kombination aus PD-Gelenkregler und Geschwindigkeitsrückführung

„ - · “ Regelung ausschließlich mit PD-Gelenkreglern



**Bild 4.10:** Moment des Motors im Ellbogengelenk

„ – “ Kombination aus PD-Gelenkregler und Geschwindigkeitsrückführung

„ - - “ Regelung ausschließlich mit PD-Gelenkreglern

## 5 Fuzzy-Regelung des elastischen Roboters

Die Fuzzy-Regelung ist in den letzten Jahren immer häufiger Gegenstand der Forschung geworden. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, daß kein mathematisches Modell des zu regelnden Prozesses benötigt wird. Stattdessen werden spezielle Erfahrungen über den Prozeß in Form von regelbasiertem Wissen im Entwurf verwendet. Fuzzy-Regler eignen sich aufgrund ihrer vielen einstellbaren Parameter und ihrer eigenen nichtlinearen Charakteristik insbesondere für nichtlineare Prozesse. Deswegen werden Fuzzy-Regler häufig zur Regelung von starren Robotern (Neo und Er 1996 sowie Ohtani und Yoshimura 1996) und von Robotern mit elastischen Gelenken (Lin und Chen 1995 sowie Wang 1996) angewandt. Aber in der Literatur sind bisher nur wenige Veröffentlichungen über die Anwendung von Fuzzy-Reglern bei elastischen Robotern zu finden (Fabritz u. a. 1995, Garcia-Benitez u. a. 1993, Moudgal u. a. 1994, Moudgal u. a. 1995). Der Grund dafür ist, daß der elastische Roboterarm eine Vielzahl von Zustandsvariablen hat. Für ein solches System ist es schwierig, die Regelbasis zu ermitteln. Hier wird diese Schwierigkeit dadurch überwunden, daß Hilfsgrößen durch Kombinationen der Zustandsvariablen benutzt werden.

Der zuvor vorgestellte Regler zur Dämpfung der Schwingung des elastischen Roboterarms basiert auf der Rückführung der Geschwindigkeit des Armendes. Diese Geschwindigkeit erfaßt nicht nur den Einfluß der Armelastizitäten auf die Geschwindigkeit des Armendes, sondern auch den Einfluß der starren Bewegungen auf die Geschwindigkeit des Armendes. Dies erschwert die Einstellung der Parameter der PD-Gelenkregler. Hier wird die Dämpfung der Schwingung des elastischen Roboterarms allein durch die Rückführung des Einflusses der Armelastizitäten auf die Geschwindigkeit des Armendes erreicht.

Der Beitrag der Armelastizitäten zu der Position der Enden des ersten und zweiten Arms ergibt sich zu:

$$\Delta\alpha_1 = \alpha_1 - \theta_1, \quad (5.1)$$

$$\Delta\alpha_2 = \alpha_2 - \alpha_2^r. \quad (5.2)$$

Dabei ist:

$$\alpha_2^r = \left[ n_2^r \pi + \arctan \left( \frac{l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)}{l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)} \right) \right]. \quad (5.3)$$

$n_2^r$  ist die Lösung der folgenden Ungleichung:

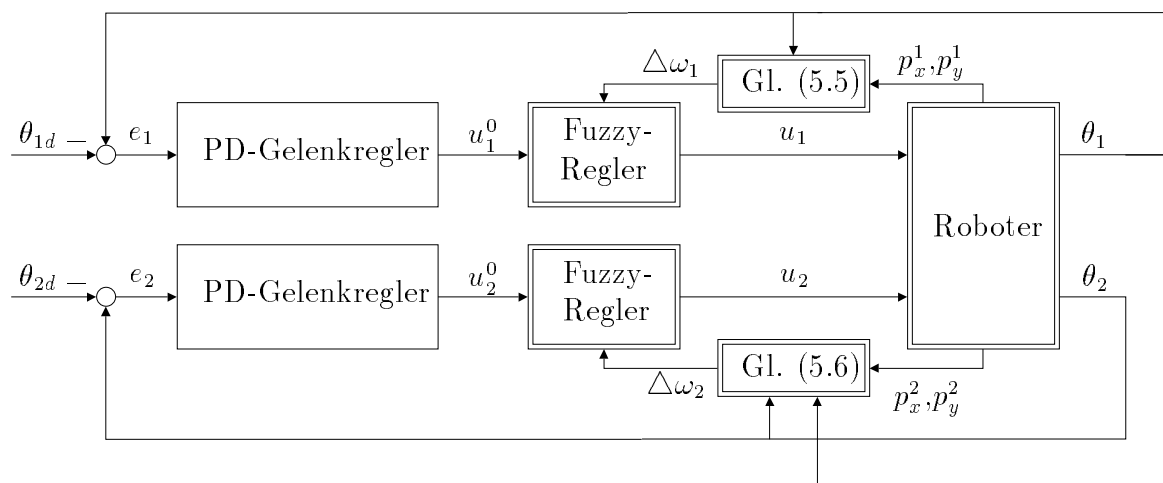
$$\frac{-2n_2^r - 1}{2} \pi < \arctan \left( \frac{l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)}{l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)} \right) - \alpha_2^r((k-1)T) < \frac{-2n_2^r + 1}{2} \pi. \quad (5.4)$$

Aus  $\Delta\alpha_1$  und  $\Delta\alpha_2$  können die folgenden Geschwindigkeiten definiert werden:

$$\Delta\omega_1 = \frac{d(\Delta\alpha_1)}{dt}, \quad (5.5)$$

$$\Delta\omega_2 = \frac{d(\Delta\alpha_2)}{dt}. \quad (5.6)$$

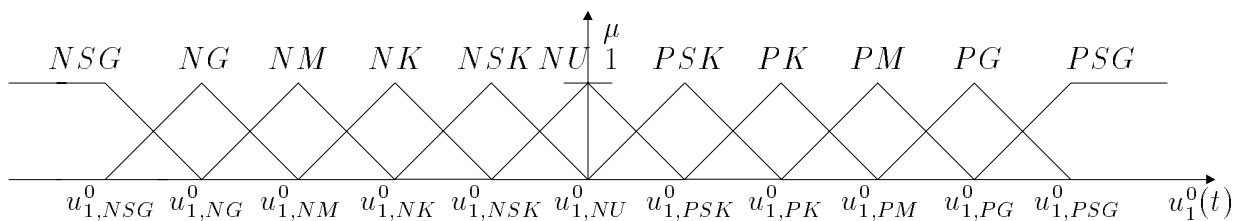
Um die Anzahl der Eingangsgrößen des Fuzzy-Reglers zu verringern, werden die Position und die Geschwindigkeit des Gelenks zuerst durch einen PD-Gelenkregler kombiniert. Der Fuzzy-Regler für den elastischen Roboterarm besitzt als eine Eingangsgröße den Ausgang des PD-Gelenkreglers  $u_i^0(t)$ . Als weitere Eingangsgröße hat der Fuzzy-Regler den Einfluss der Armelastizitäten auf die Geschwindigkeit des fernen Armendes  $\Delta\omega_i$ . In Bild 5.1 wird der Regelkreis für die Fuzzy-Regelung des Roboterarms dargestellt.



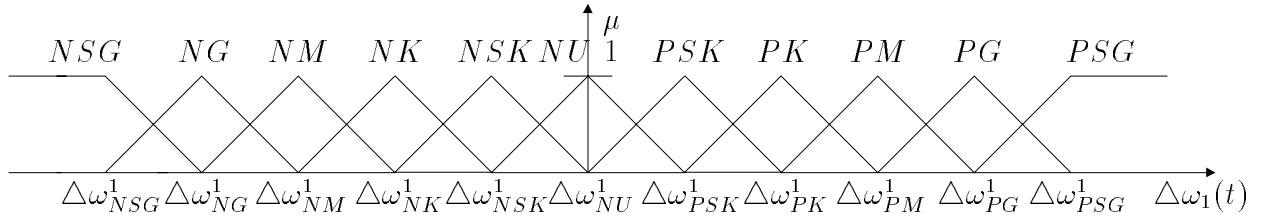
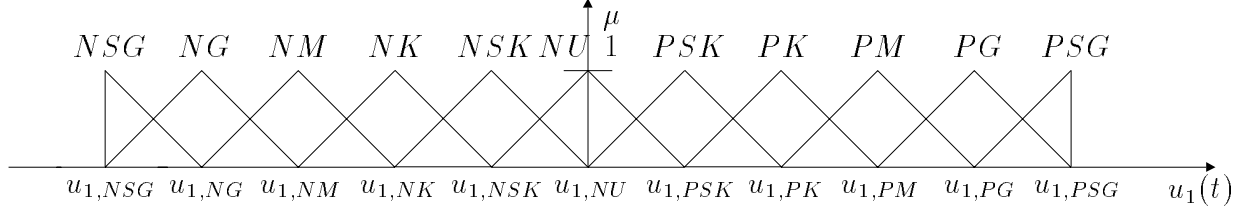
**Bild 5.1:** Regelkreis für die Fuzzy-Regelung eines zweigliedrigen elastischen Roboterarms

## 5.1 Regelung des Oberarms

Der PD-Gelenkregler für das Schultergelenk ist durch Gl. (4.13) dargestellt. Die Eingangsgrößen des Fuzzy-Reglers  $u_1^0(t)$  und  $\Delta\omega_1(t)$  und die Stellgröße  $u_1(t)$  werden durch jeweils elf linguistische Werte wiedergegeben („negativ sehr groß (NSG)“, „negativ groß (NG)“, „negativ mittel (NM)“, „negativ klein (NK)“, „negativ sehr klein (NSK)“, „etwa Null (NU)“, „positiv sehr klein (PSK)“, „positiv klein (PK)“, „positiv mittel (PM)“, „positiv groß (PG)“ und „positiv sehr groß (PSG)“). Die Zugehörigkeitsfunktionen von  $u_1^0(t)$ ,  $\Delta\omega_1(t)$  und  $u_1(t)$  sind in den Bildern 5.2 bis 5.4 dargestellt.



**Bild 5.2:** Zugehörigkeitsfunktionen für  $u_1^0(t)$

Bild 5.3: Zugehörigkeitsfunktionen für  $\Delta\omega_1(t)$ Bild 5.4: Zugehörigkeitsfunktionen für  $u_1(t)$ 

Dabei ergeben sich die Kerne der Fuzzy-Mengen zu:

$$\begin{bmatrix} u_{1,NSG}^0 \\ u_{1,NG}^0 \\ u_{1,NM}^0 \\ u_{1,NK}^0 \\ u_{1,NSK}^0 \\ u_{1,NU}^0 \\ u_{1,PSK}^0 \\ u_{1,PK}^0 \\ u_{1,PM}^0 \\ u_{1,PG}^0 \\ u_{1,PSG}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1,25 \\ -1 \\ -0,75 \\ -0,5 \\ -0,25 \\ 0 \\ 0,25 \\ 0,5 \\ 0,75 \\ 1 \\ 1,25 \end{bmatrix}, \quad (5.7)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\omega_{NSG}^1 \\ \Delta\omega_{NG}^1 \\ \Delta\omega_{NM}^1 \\ \Delta\omega_{NK}^1 \\ \Delta\omega_{NSK}^1 \\ \Delta\omega_{NU}^1 \\ \Delta\omega_{PSK}^1 \\ \Delta\omega_{PK}^1 \\ \Delta\omega_{PM}^1 \\ \Delta\omega_{PG}^1 \\ \Delta\omega_{PSG}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1,75 \\ -1,4 \\ -1,05 \\ -0,7 \\ -0,35 \\ 0 \\ 0,35 \\ 0,7 \\ 1,05 \\ 1,4 \\ 1,75 \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad (5.8)$$

Tabelle 5.1: Regelbasis

$u_1(t)$		$\Delta\omega_1(t)$										
		NSG	NG	NM	NK	NSK	NU	PSK	PK	PM	PG	PSG
$u_1^0(t)$	NSG	NU	NSK	NK	NM	NG	NSG	NSG	NSG	NSG	NSG	NSG
	NG	PSK	NU	NSK	NK	NM	NG	NSG	NSG	NSG	NSG	NSG
	NM	PK	PSK	NU	NSK	NK	NM	NG	NSG	NSG	NSG	NSG
	NK	PM	PK	PSK	NU	NSK	NK	NM	NG	NSG	NSG	NSG
	NSK	PG	PM	PK	PSK	NU	NSK	NK	NM	NG	NSG	NSG
	NU	PSG	PG	PM	PK	PSK	NU	NSK	NK	NM	NG	NSG
	PSK	PSG	PSG	PG	PM	PK	PSK	NU	NSK	NK	NM	NG
	PK	PSG	PSG	PSG	PG	PM	PK	PSK	NU	NSK	NK	NM
	PM	PSG	PSG	PSG	PSG	PG	PM	PK	PSK	NU	NSK	NK
	PG	PSG	PSG	PSG	PSG	PSG	PG	PM	PK	PSK	NU	NSK
	PSG	PSG	PSG	PSG	PSG	PSG	PSG	PSG	PG	PM	PK	PSK

$$\begin{bmatrix} u_{1,NSG} \\ u_{1,NG} \\ u_{1,NM} \\ u_{1,NK} \\ u_{1,NSK} \\ u_{1,NU} \\ u_{1,PSK} \\ u_{1,PK} \\ u_{1,PM} \\ u_{1,PG} \\ u_{1,PSG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1,25 \\ -1 \\ -0,75 \\ -0,5 \\ -0,25 \\ 0 \\ 0,25 \\ 0,5 \\ 0,75 \\ 1 \\ 1,25 \end{bmatrix}. \quad (5.9)$$

Die Regelbasis ist in Tabelle 5.1 dargestellt. Die Erstellung dieses Regelwerkes erfolgt heuristisch. Hierbei wird von Erfahrungen ausgegangen, die aus der Regelung des Roboters mit dem im Abschnitt 4 vorgestellten Regler gewonnen wurden. Das Regelwerk wird dann mit Hilfe weiterer Simulationen verfeinert.

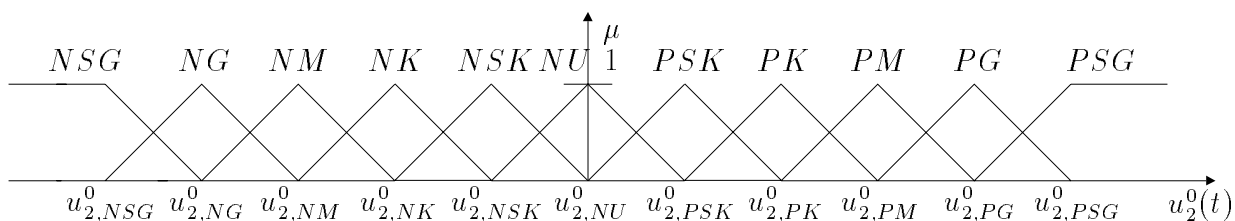
Für die Berechnung der Stellgröße wird die konjunktive Verknüpfung der Eingangsgrößen mit dem Minimumoperator berechnet und die Singleton-Fuzzifizierungsmethode, Max-Min-Inferenz und folgende Singleton-Schwerpunktmethode zur Defuzzifizierung verwendet (Lee 1990 und Preuß 1992):

$$u_1(t) = \frac{\sum_{i=NSG}^{PSG} \mu_i(u_1(t)) u_{1,i}}{\sum_{i=NSG}^{PSG} \mu_i(u_1(t))}, \quad (5.10)$$

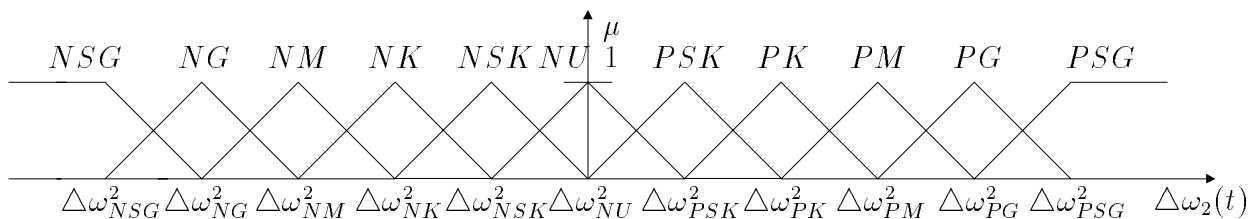
wobei  $\mu_i(u_1(t))$  der Zugehörigkeitswert der resultierten Fuzzy-Ausgangsmenge ist.

## 5.2 Regelung des Unterarms

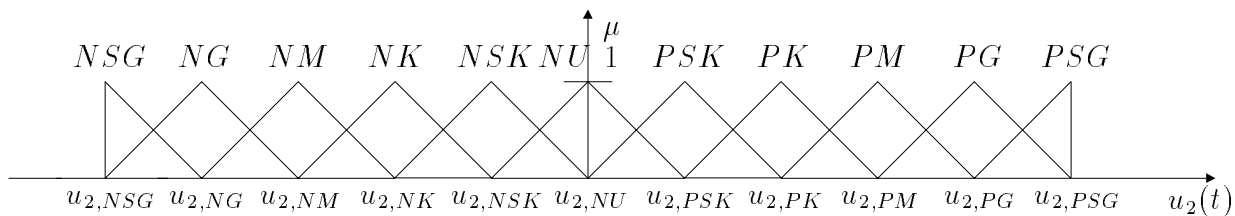
Der PD-Gelenkregler für das Ellbogengelenk ist in Gl. (4.13) dargestellt. Die Eingangsgrößen des Fuzzy-Reglers  $u_2^0(t)$  und  $\Delta\omega_2(t)$  sowie die Stellgröße  $u_2(t)$  werden durch jeweils elf linguistische Werte wiedergegeben („negativ sehr groß (NSG)“, „negativ groß (NG)“, „negativ mittel (NM)“, „negativ klein (NK)“, „negativ sehr klein (NSK)“, „etwa Null (NU)“, „positiv sehr klein (PSK)“, „positiv klein (PK)“, „positiv mittel (PM)“, „positiv groß (PG)“ und „positiv sehr groß (PSG)“). Die Zugehörigkeitsfunktionen von  $u_2^0(t)$ ,  $\Delta\omega_2(t)$  und  $u_2(t)$  sind in den Bildern 5.5 bis 5.7 dargestellt.



**Bild 5.5:** Zugehörigkeitsfunktionen für  $u_2^0(t)$



**Bild 5.6:** Zugehörigkeitsfunktionen für  $\Delta\omega_2(t)$



**Bild 5.7:** Zugehörigkeitsfunktionen für  $u_2(t)$

Dabei ergeben sich die Kerne der Fuzzy-Mengen zu:

$$\begin{bmatrix} u_{2,NSG}^0 \\ u_{2,NG}^0 \\ u_{2,NM}^0 \\ u_{2,NK}^0 \\ u_{2,NSK}^0 \\ u_{2,NU}^0 \\ u_{2,PSK}^0 \\ u_{2,PK}^0 \\ u_{2,PM}^0 \\ u_{2,PG}^0 \\ u_{2,PSG}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,375 \\ -0,3 \\ -0,225 \\ -0,15 \\ -0,075 \\ 0 \\ 0,075 \\ 0,15 \\ 0,225 \\ 0,3 \\ 0,375 \end{bmatrix}, \quad (5.11)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\omega_{NSG}^2 \\ \Delta\omega_{NG}^2 \\ \Delta\omega_{NM}^2 \\ \Delta\omega_{NK}^2 \\ \Delta\omega_{NSK}^2 \\ \Delta\omega_{NU}^2 \\ \Delta\omega_{PSK}^2 \\ \Delta\omega_{PK}^2 \\ \Delta\omega_{PM}^2 \\ \Delta\omega_{PG}^2 \\ \Delta\omega_{PSG}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,75 \\ -0,6 \\ -0,45 \\ -0,3 \\ -0,15 \\ 0 \\ 0,15 \\ 0,3 \\ 0,45 \\ 0,6 \\ 0,75 \end{bmatrix} \text{ und} \quad (5.12)$$

$$\begin{bmatrix} u_{2,NSG} \\ u_{2,NG} \\ u_{2,NM} \\ u_{2,NK} \\ u_{2,NSK} \\ u_{2,NU} \\ u_{2,PSK} \\ u_{2,PK} \\ u_{2,PM} \\ u_{2,PG} \\ u_{2,PSG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,375 \\ -0,3 \\ -0,225 \\ -0,15 \\ -0,075 \\ 0 \\ 0,075 \\ 0,15 \\ 0,225 \\ 0,3 \\ 0,375 \end{bmatrix}. \quad (5.13)$$

Als Regelbasis wird in einem ersten Schritt die gleiche wie die für die Regelung des Oberarms verwendet (s. Tabelle 5.1).

Für die Berechnung der Stellgröße wird die konjunktive Verknüpfung der Eingangsgrößen



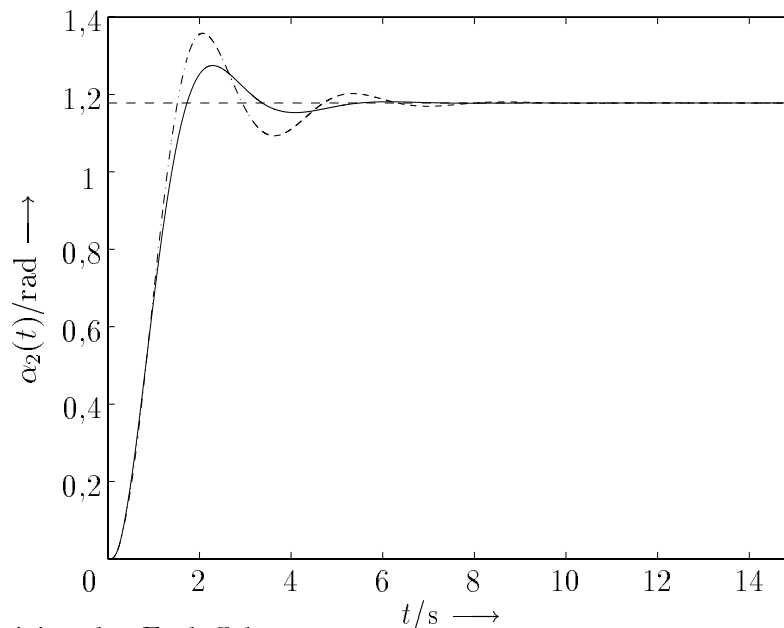
mit dem Minimumoperator berechnet und die Singleton-Fuzzifizierungsmethode, Max-Min-Inferenz und folgende Singleton-Schwerpunktmethode zur Defuzzifizierung verwendet (Lee 1990, Preuß 1992):

$$u_2(t) = \frac{\sum_{i=NSG}^{PSG} \mu_i(u_2(t)) u_{2,i}}{\sum_{i=NSG}^{PSG} \mu_i(u_2(t))}, \quad (5.14)$$

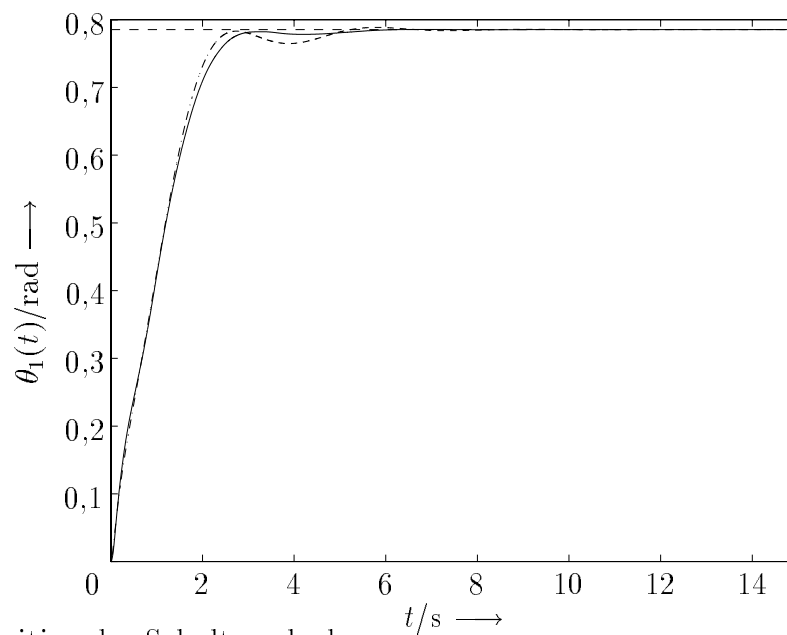
wobei  $\mu_i(u_2(t))$  der Zugehörigkeitswert der resultierten Fuzzy-Ausgangsmenge ist.

### 5.3 Simulationsstudien

Bilder 5.8 bis 5.16 zeigen die Simulationsergebnisse dieses Roboters bei der Regelung mit den Fuzzy-Reglern und bei der Regelung allein mit den PD-Gelenkreglern. In den beiden Situationen werden  $k_1^d$ ,  $k_1^p$ ,  $k_2^d$  und  $k_2^p$  nach Gl. (4.15) gewählt. Die Simulationsergebnisse verdeutlichen, daß die vorgestellten Fuzzy-Regler die elastische Schwingung dämpfen können. Außerdem haben sie einen schwächeren Einfluß auf die starre Bewegung als die im obigen Abschnitt vorgestellten Regler.



**Bild 5.8:** Position des Endeffektors  
 „ — — “ Sollwert  
 „ — “ Regelung mit den Fuzzy-Reglern  
 „ - . “ Regelung allein mit den PD-Gelenkreglern

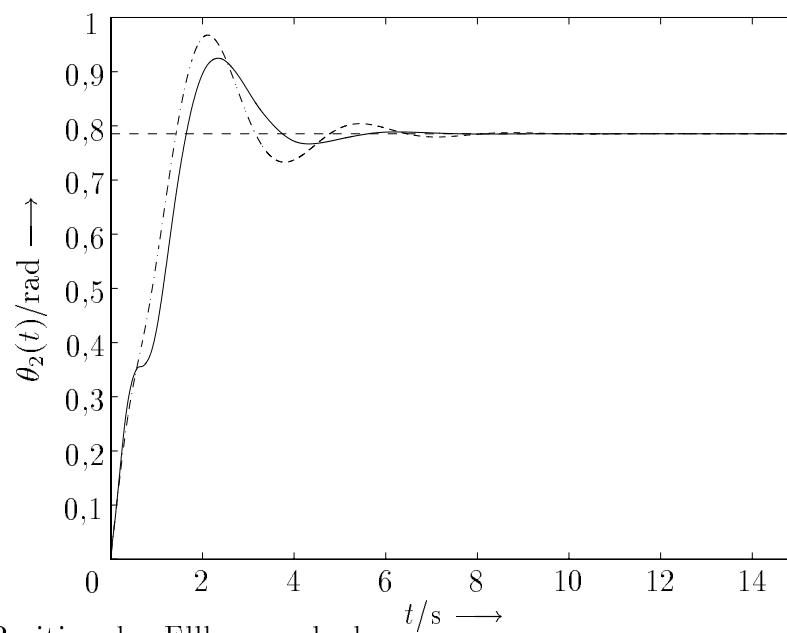


**Bild 5.9:** Position des Schultergelenks

„ — — “ Sollwert

„ — “ Regelung mit den Fuzzy-Reglern

„ - . “ Regelung allein mit den PD-Gelenkreglern

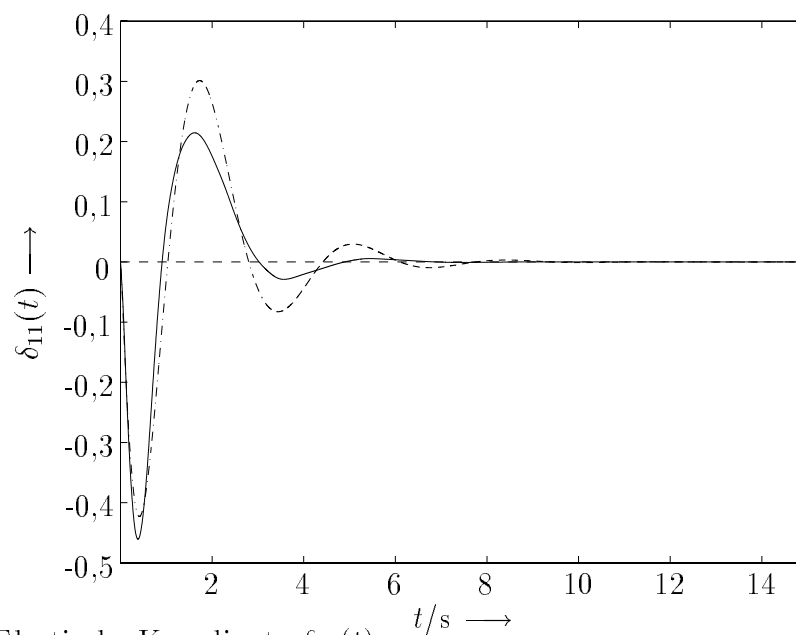


**Bild 5.10:** Position des Ellbogengelenks

„ — — “ Sollwert

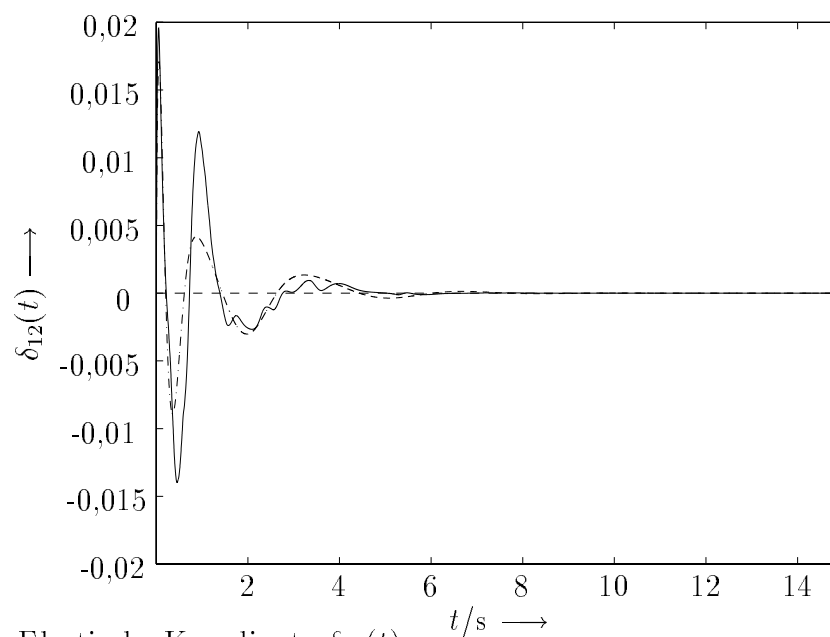
„ — “ Regelung mit den Fuzzy-Reglern

„ - . “ Regelung allein mit den PD-Gelenkreglern



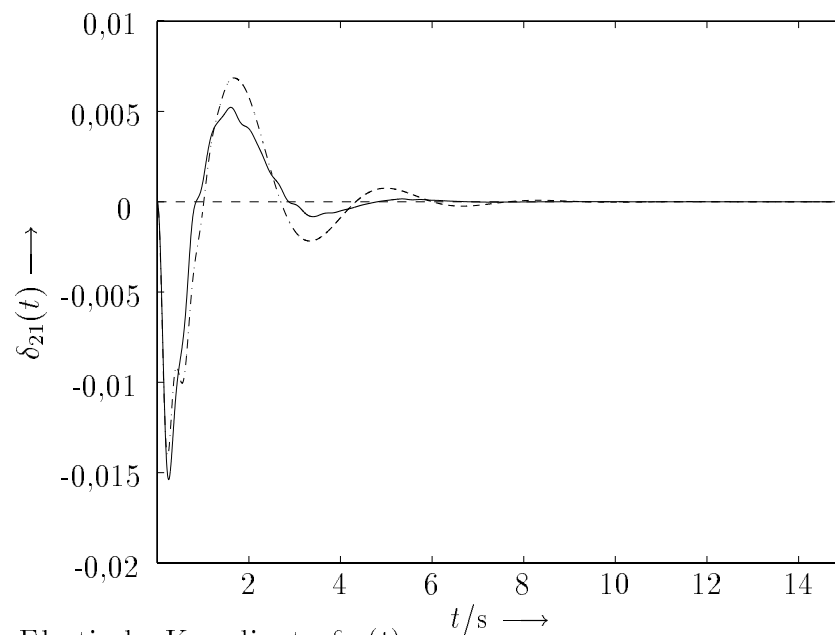
**Bild 5.11:** Elastische Koordinate  $\delta_{11}(t)$

- „ — — “ Sollwert
- „ — “ Regelung mit den Fuzzy-Reglern
- „ - - “ Regelung allein mit den PD-Gelenkreglern



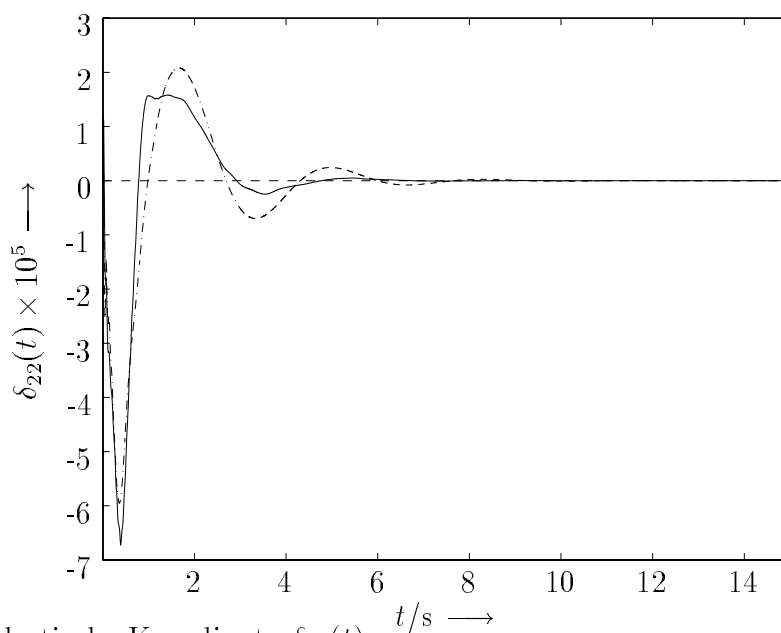
**Bild 5.12:** Elastische Koordinate  $\delta_{12}(t)$

- „ — — “ Sollwert
- „ — “ Regelung mit den Fuzzy-Reglern
- „ - - “ Regelung allein mit den PD-Gelenkreglern



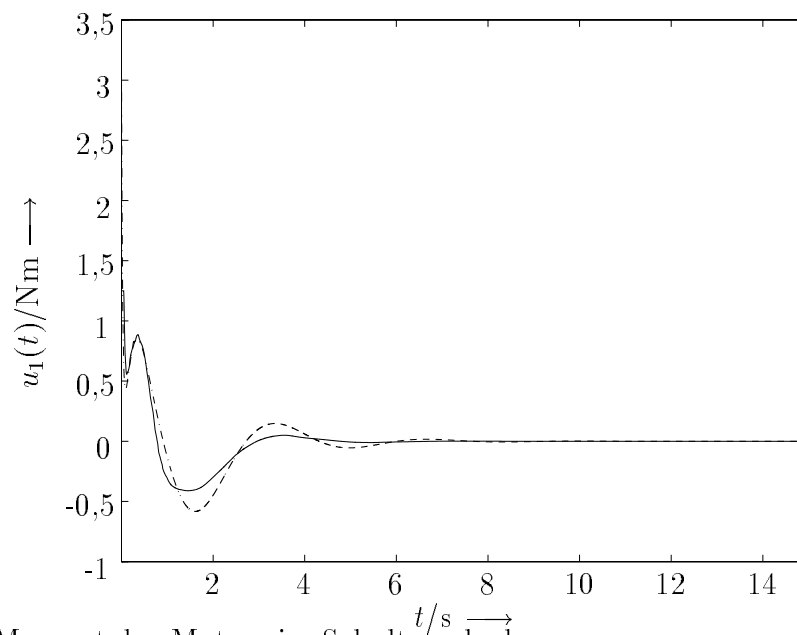
**Bild 5.13:** Elastische Koordinate  $\delta_{21}(t)$

- „ — — “ Sollwert
- „ — “ Regelung mit den Fuzzy-Reglern
- „ - - “ Regelung allein mit den PD-Gelenkreglern



**Bild 5.14:** Elastische Koordinate  $\delta_{22}(t)$

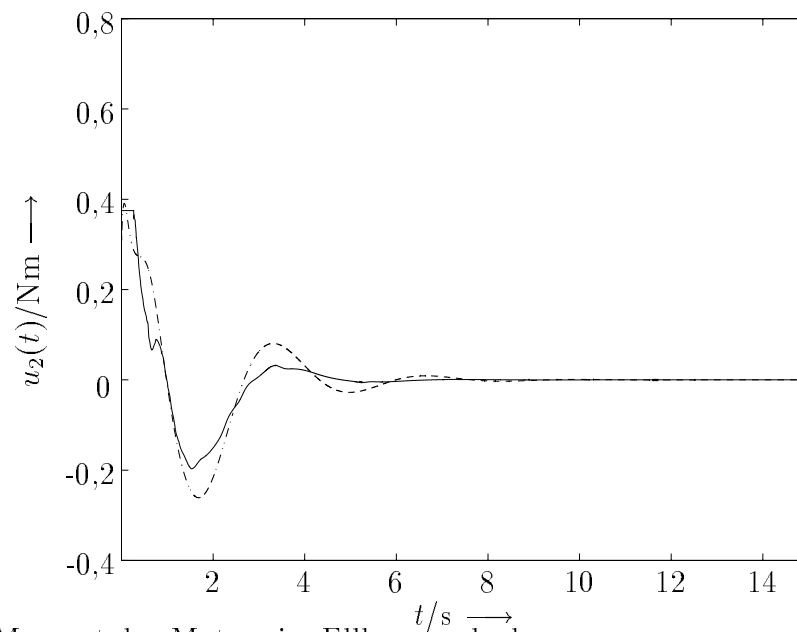
- „ — — “ Sollwert
- „ — “ Regelung mit den Fuzzy-Reglern
- „ - - “ Regelung allein mit den PD-Gelenkreglern



**Bild 5.15:** Moment des Motors im Schultergelenk

„ – “ Regelung mit den Fuzzy-Reglern

„ – “ Regelung allein mit den PD-Gelenkreglern



**Bild 5.16:** Moment des Motors im Ellbogengelenk

„ – “ Regelung mit den Fuzzy-Reglern

„ – “ Regelung allein mit den PD-Gelenkreglern

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In dem vorliegenden Forschungsbericht wird die Regelung eines zweigliedrigen elastischen Roboterarms vorgestellt. Dazu werden die Verstärkung sowie die Pol- und Nullstellen eines vereinfachten Modells des Roboters zunächst analysiert. Für einen zweigliedrigen elastischen Roboterarm gibt es Kopplungen zwischen den beiden Armen. Es handelt sich um ein Nichtphasenminimumsystem. Im Gegensatz zu dem einachsigen elastischen Roboterarm sind die Übertragungsfunktionen vom Gelenkmoment  $u_i$  auf die Position des fernen Armendes  $y_i$  des  $i$ -ten Arms die eines Phasenminimumsystems.

Dann wird die Beschränkung der Regelgüte des elastischen Roboterarms bei einem Regler mittels exakter Linearisierung des Momente/Winkelverhaltens des Gelenkes diskutiert. Obwohl die Informationen über die elastischen Deformationen des Arms bei der Regelung mittels exakter Linearisierung des Momente/Winkelverhaltens des Gelenks benutzt werden, vergrößert sich die Bandbreite des Systems nicht im Vergleich zu der Regelung durch eine alleinige Rückführung von Zustandsgrößen des Gelenkes.

Anschließend werden zwei Regler für den zweigliedrigen Roboterarm vorgestellt. Diese Regler benötigen jeweils die Geschwindigkeit des Armendes und den Einfluß der Armelastizitäten auf die Geschwindigkeit des Armendes. Beide Regler liefern bessere Ergebnisse als reine PD-Gelenkregler. Der letzte hat einen schwächeren Einfluß auf die starre Bewegung als der erste. Aber wie Bild 5.1 zeigt, geht beim letzten Regler die Dezentralität verloren.

Die vorgestellten Regler wurden ausschließlich in der Simulation getestet. Experimentelle Erprobungen der vorgestellten Regler sollen in Zukunft durchgeführt werden. Die Parameter der vorgestellten Regler wurden sicher nicht optimal eingestellt, so daß hier noch Verbesserungspotential vorhanden ist. Außerdem haben die Last und die Konfiguration des Roboters großen Einfluß auf die Regelgüte. Deshalb soll die Adaption der Reglerparameter erforscht werden. Ein weiterer Schwerpunkt künftiger Arbeiten wird die Fuzzy-Koordination für den mehrgliedrigen elastischen Roboterarm sein.

Der Verfasser dankt dem DAAD für seine Unterstützung.

## 7 Literaturverzeichnis

- Alberts, T. E., L. J. Love, E. Bayo and H. Moulin.** 1990. Experiments with end-point control of a flexible link using the inverse dynamics approach and passive damping. *Proceedings of 1990 American Control Conference*. San Diego, CA, 350-355.
- Aoustin, Y., C. Chevallereau, A. Glumineau and C. H. Moog.** 1994. Experimental results for the end-effector control of a single flexible robotic arm. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 2. 371-381.
- Arteaga Pérez, M.A.** 1995. *Zur Positionsbestimmung bei elastischen Robotern*. Forschungsbericht 9/95. MSRT. Universität Duisburg.
- Baruh, H. and S. S. K. Tadikonda.** 1989. Issues in the dynamics and control of flexible robot manipulators. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 12. 659-671.
- Bondi, P., G. Casalino and L. Gambardella.** 1988. On the iterative learning control theory for robotic manipulators. *IEEE Journal of Robotics and Automation* 4. 14-22.
- Bremer, H. and F. Pfeiffer.** 1995. Experiments with flexible manipulators. *Control Engineering Practice* 3. 1331-1338.
- Cannon, R. H., Jr and E. Schmitz.** 1984. Initial experiments on the end-point control of a flexible one-link robot. *The International Journal of Robotics Research* 3. 62-75.
- Castelazo, I. A. and H. Lee.** 1990. Nonlinear compensation for flexible manipulators. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 112. 62-68.
- Cetinkunt, S. and W. J. Book.** 1990. Performance limitations of joint variable-feedback controllers due to manipulator structural flexibility. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 6. 219-231.
- Chalhoub, N. G. and A. G. Ulsoy.** 1986. Dynamic simulation of a leadscrew driven flexible robot arm and controller. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 108. 119-126.
- Cordes, J.** 1992. *Robuste Regelung eines elastische Teleskoparmroboters*. Dissertation. Universität Bremen. Bremen.
- De Luca, A., P. Lucibello and G. Ulivi.** 1989. Inversion techniques for trajectory control of flexible robot arms. *Journal of Robotic Systems* 6. 325-344.

- De Luca, A. and B. Siciliano.** 1991. Closed-form dynamic model of planar multilink lightweight robots. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 21. 826-839.
- De Luca, A. and B. Siciliano.** 1993. Inversion-based nonlinear control of robot arms with flexible links. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 16. 1169-1176.
- Fabritz, N., G. Buch und P. Kortmann.** 1995. Fuzzy-Regelungsstrategien zur Schwingungsdämpfung eines elastischen Manipulators. *Automatisierungstechnik* 43. 379-384.
- Fraser, A. R. and R. W. Daniel.** 1991. *Perturbation Techniques for Flexible Manipulators* Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Friedland, B.** 1987. *Control System Design - An Introduction to State-Space Methods* New York: McGraw-Hill International Editions.
- Garcia-Benitez, E., S. Yurkovich and K. M. Passino.** 1993. Rule-based supervisory control of a two-link flexible manipulator. *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 7. 195-213.
- Khorrani, F. and S. Jain.** 1993. Nonlinear control with end-point acceleration feedback for a two-link flexible manipulator: experimental results. *Journal of Robotic Systems* 10. 505-530.
- Khorrani, F., S. Jain and A. Tzes.** 1995. Experimental results on adaptive nonlinear control and input preshaping for multi-link flexible manipulators. *Automatica* 31. 83-97.
- Kleemann, U.** 1989. *Regelung elastischer Roboter.* Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Konno, A. and M. Uchiyama.** 1995. Vibration suppression control of spatial flexible manipulators. *Control Engineering Practice* 9. 1315-1321.
- Kotnik, P. T., S. Yurkovich and Ü. Özgüner.** 1988. Acceleration feedback for control of a flexible manipulator arm. *Journal of Robotic Systems* 5. 181-196.
- Lee, C. C.** 1990. Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller Part I, II. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 20. 404-435.
- Lin, L. C. and C. C. Chen.** 1995. Rigid model-based fuzzy control of flexible-joint manipulators. *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 13. 107-126.
- Moudgal, V. G., W. A. Kwong, K. M. Passino and S. Yurkovich.** 1995. Fuzzy learning control for a flexible-link robot. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 3. 199-210.



- Moudgal, V. G., K. M. Passino and S. Yurkovich.** 1994. Rule-based control for a flexible-link robot. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 2. 392-405.
- Neo, S.S. and M. J. Er.** 1996. Adaptive fuzzy controllers of a robot manipulator. *International Journal of Systems Science* 27. 519-532.
- Ohtani, Y. and T. Yoshimura.** 1996. Fuzzy control of a manipulator using the concept of sliding mode. *International Journal of Systems Science* 27. 179-186.
- Pfeiffer, F.** 1989. A feedforward decoupling concept for the control of elastic robots. *Journal of Robotic Systems* 6. 407-416.
- Preuß, H. P.** 1992. Fuzzy Control - heuristische Regelung mittels unscharfer Logik. *Automatisierungstechnische Praxis* 34. 176-184.
- Riege, B.** 1996. *Zur Strukturanalyse der Modelle elastischer Handhabungssysteme.* Forschungsbericht 9/96. MSRT. Universität Duisburg.
- Sakawa, Y. and F. Matsuno.** 1986. Modelling and control of a flexible manipulator with a parallel drive mechanism. *International Journal of Control* 44. 299-313.
- Shi, G. and S. N. Atluri.** 1990. Active control of non-linear dynamic response of space-frames using piezo-electric actuators. *Computers and Structures* 34. 549-564.
- Simo, J. C. and L. Vu-Quoc.** 1987. The role of non-linear theories in transient dynamic analysis of flexible structures. *Journal of Sound and Vibration* 119. 487-508.
- Singh, S. N. and A. A. Schy.** 1986a. Control of elastic robotic systems by nonlinear inversion and modal damping. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 108. 180-189.
- Singh, S. N. and A. A. Schy.** 1986b. Elastic robot control: nonlinear inversion and linear stabilization. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* AES-22. 340-347.
- Spong, M. W.** 1987. Modeling and control of elastic joint robots. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 109. 310-319.
- Tarn, T. J., A. K. Bejczy, A. Isidori and Y. Chen.** 1984. Nonlinear feedback in robot arm control. in *23rd IEEE Conf. Decision and Control.* Las Vegas.
- Tokhi, M. O. and A. K. M. Azad.** 1996. Control of flexible manipulator systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I: Journal of Systems and Control Engineering* 210. 113-130.
- Wang, J.** 1996. *Ein Ansatz zur Regelung eines Roboters mit einem elastischen Gelenk.* Forschungsbericht 7/96. MSRT. Universität Duisburg.

- 
- Yigit, A. S.** 1994. On the stability of PD control for two-link rigid-flexible manipulator. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 116. 208-215.