

Regelung des experimentellen zweiachsigen elastischen Handhabungssystems DFM01

Mingli Bai

Forschungsbericht Nr. 10/97

Meß-, Steuer- und Regelungstechnik

Übersicht: Dieser Forschungsbericht stellt eine Regelung des im Fachgebiet MSRT vorhandenen zweiachsigen elastischen Handhabungssystems DFM01 vor. Zur Positionierung der Gelenke wird zuerst ein PD–Regler mit einer adaptiven Vorsteuerung verwendet, wobei die elastischen Deformationen nicht aktiv gedämpft werden. Um die unerwünschten Schwingungen zu unterdrücken, wird dann ein neues Regelungskonzept, die *Adaptive Erweiterte Zustandsregelung* (AEZR) vorgestellt. Dieser Regler besteht aus einem LQR–Regler und einem adaptiven Kompensator. Alle Zustände sowie die Störgrößen, die die nicht modellierte Dynamik des Systems repräsentieren, werden mit Hilfe des Strong–Tracking–Filters (STF) online geschätzt. Das vorgestellte Regelungskonzept wird zur Positionierung und Bahnverfolgung der Gelenkwinkel sowie des Endeffektors verwendet. Experimentelle Ergebnisse zeigen, daß der adaptive erweiterte Zustandsregler eine starke Robustheit bezüglich Parameterungenauigkeiten und Parameterschwankungen aufweist.

Gerhard-Mercator-Universität - GH Duisburg

Meß-, Steuer- und Regelungstechnik

Prof. Dr.-Ing. H. Schwarz

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	II
1 Einleitung	1
2 Konventionelle Regelung mit einer adaptiven Vorsteuerung	3
2.1 Reglersynthese	3
2.2 Experimentelle Ergebnisse	4
3 Adaptive Erweiterte Zustandsregelung (AEZR)	7
3.1 Regelung der Gelenkwinkel	7
3.2 Regelung des Endeffektors	8
4 Experimentelle Ergebnisse	10
4.1 Regelung der Gelenkwinkel	10
4.2 Regelung des Endeffektors	14
5 Zusammenfassung	23
6 Literatur	24

Nomenklatur

Algebraische Größen:

A_d	Systemmatrix eines zeitdiskreten Systems
B_d	Eingangsmatrix eines zeitdiskreten Systems
C_d	Ausgangsmatrix eines zeitdiskreten Systems
C_1	Ausgangsmatrix (allgemein)
EI_i	Biegesteifigkeit des i -ten Gliedes
$e(k)$	Vektor der Regelabweichungen
I_e	Trägheitsmoment des Gelenkes
I_{W_i}	Trägheitsmoment der i -ten Motorwelle
I_t	Trägheitsmoment des Endeffektors
J	Gütefunktion
K_c	Verstärkungsmatrix eines Kompensators
K_D	Rückführungsmatrix eines PD-Reglers
K_f	Rückführungsmatrix eines LQR-Reglers
K_P	Rückführungsmatrix eines PD-Reglers
K_V	Verstärkungsmatrix der Vorsteuerung
k	diskrete Zeitvariable
l_i	Länge des i -ten Gliedes
m_e	Masse des Gelenkes
m_t	Masse des Endeffektors
$p_e(\mathbf{q})$	Absolute Verschiebung des Endeffektors
$\Delta p_e(\mathbf{q})$	Änderung der absoluten Verschiebung des Endeffektors
P_R	Stationäre Lösung der zeitdiskreten Riccati-Gleichung
Q_y	nicht negativ definite Matrix
$\mathbf{q}(k)$	Vektor der verallgemeinerten Koordinaten
$\mathbf{q}_E(k)$	Vektor der elastischen verallgemeinerten Koordinaten
$\mathbf{q}_0, \dot{\mathbf{q}}_0$	Arbeitspunkte (in Vektorschreibweise)
$q_{i1}(k)$	Elastische verallgemeinerte Koordinate des i -ten Gliedes
$\Delta \mathbf{q}(k)$	Änderung der verallgemeinerten Koordinaten
$\Delta q_{i1}(k)$	Änderung der elastischen verallgemeinerten Koordinate des i -ten Gliedes
$\mathbf{R}(k)$	Kovarianzmatrix des Meßrauschsignals
\mathbf{R}_u	Positiv definite Matrix
T_s	Abtastzeit
$\mathbf{u}(k)$	Stellvektor des DFM01
$u_i(k)$	Stellgröße
$\mathbf{u}^*(k)$	Stellvektor
$\mathbf{x}_m(k)$	Zustandsvektor
$\mathbf{x}^d(k)$	Sollvektor
$x_e^d(k)$	Sollwert der x -Koordinate des Endeffektors

$\Delta x_e(k)$	Änderung der x -Koordinate der absoluten Verschiebung des Endeffektors
$\mathbf{y}_m(k)$	Ausgangsvektor
$y_e^d(k)$	Sollwert der y -Koordinate des Endeffektors
$\Delta y_e(k)$	Änderung der y -Koordinate der absoluten Verschiebung des Endeffektors
$\mathbf{z}(k)$	Störgrößenvektor
$z_i(k)$	Störgröße
$\boldsymbol{\theta}(k)$	Winkelvektor
$\boldsymbol{\theta}^d(k)$	Sollwinkelvektor
$\theta_i(k)$	Winkel des i -ten Motors
$\theta_i^d(k)$	Sollwinkel des i -ten Motors
ρ_i	gleichmäßig verteilte Masse des i -ten Gliedes

Operatoren:

$\hat{(\cdot)}$	geschätzte Größe
$\dot{(\cdot)}$	Zeitliche Ableitung

Abkürzungen:

AEZR	Adaptive Erweiterte Zustandsregelung
CRCTC	Computed Reference Computed Torque Control
DFM01	Duisburg Flexible Manipulator 01
DMS	Dehnungsmeßstreifen
LQR	Linear–Quadratisch–Regulator
STF	Strong–Tracking–Filter

1 Einleitung

In der Literatur werden zahlreiche Berichte zum Thema Regelung elastischer Roboter veröffentlicht. Die meisten Arbeiten befassen sich mit der Regelung einachsiger elastischer Handhabungssysteme (Cannon und Schmitz 1984, Bayo 1987, De Luca und Siciliano 1989, Aoustin u. a. 1994, Bai 1994, Kwon und Book 1994, Bai 1995, Chang und Jayasuriya 1995, Milford und Asokanthan 1996). Die Anzahl der Veröffentlichungen nimmt jedoch mit der Anzahl der Freiheitsgrade ab (Singh und Schy 1986, Cordes 1992, Siciliano u. a. 1992, Carusone und D'Eleuterio 1993, Yim und Singh 1995). Einige Untersuchungen zur Regelung von zweiachsigen elastischen Handhabungssystemen sind experimentell durchgeführt worden (Oakley und Cannon 1989, Carusone u. a. 1993, Khorrami u. a. 1994). Ein PID–Regler zur Positionierung der Gelenke wurde in (Oakley und Cannon 1989) entwickelt. Für die Bahnverfolgungsregelung des Endeffektors stellten Carusone u. a. (1993) ein Regelungskonzept mit Hilfe einer Zustandsrückführung samt *gain scheduling* vor. Die Input–Preshaping–Methode wurde in (Khorrami u. a. 1994) zur Regelung der Gelenke verwendet.

Um einen Regler zu entwerfen, sind exakte Modelle der elastischen Handhabungssysteme gefordert. Bei der praktischen Anwendung kann jedoch kaum ein exaktes Modell gefunden werden, da sich einige dynamische Eigenschaften, wie z. B. Reibungskräfte und die Zusatzmassenschwankungen, schwer modellieren lassen. Es sollte ein robuster Regler oder ein adaptiver Regler gewählt werden, um die wegen der Parameteränderungen und der nicht modellierten Dynamik auftretenden unerwünschten Schwingungen zu unterdrücken. Für einachsige elastische Handhabungssysteme sind einige Untersuchungen hinsichtlich adaptiver Regelungen durchgeführt worden (Rovner und Cannon 1987, Rovner und Franklin 1988, Bai 1995, Milford und Asokanthan 1996). Im Falle der mehrachsigen elastischen Handhabungssysteme wurde dieses Problem in der Literatur bisher wenig diskutiert. Lammerts u. a. (1995) stellten eine adaptive CRCTC (*Computed Reference Computed Torque Control*) Regelung für mehrachsige Handhabungssysteme vor, die sowohl elastische Glieder als auch elastische Gelenke besitzen. Im Rahmen dieses Regelungskonzepts wird angenommen, daß sich das Systemmodell dem realen Systemverhalten anpaßt, solange alle unbekannten Parameter sich bezüglich der Systemdynamik nur langsam ändern oder konstant sind. Ein anderer nichtlinearer adaptiver Regler, der die Parameterungenaugkeit korrigiert, wurde in (Yang u. a. 1997) entworfen. Die praktische Anwendbarkeit dieses Regelungskonzeptes ist allerdings sehr stark eingeschränkt, da die Sollbahn der Gelenke nicht beliebig gewählt werden darf.

Dieser Forschungsbericht stellt die adaptive Regelung des im Fachgebiet vorhandenen zweiachsigen elastischen Handhabungssystems DFM01 vor. Zuerst wird ein PD–Regler mit einer adaptiven Vorsteuerung zur Positionierung der Gelenke entwickelt, wobei die elastischen Deformationen nicht aktiv gedämpft werden. Um die unerwünschten Schwingungen zu unterdrücken, wird dann ein neues Regelungskonzept, die *Adaptive Erweiterte Zustandsregelung* (AEZR) vorgestellt, wobei der Regler aus einem LQR–Regler und ei-

nem adaptiven Kompensator besteht. Alle Zustände und die Störgrößen, die die nicht modellierte Dynamik des Systems repräsentieren, werden mit Hilfe des Strong–Tracking–Filters (STF) online geschätzt (Bai 1996, Bai und Schwarz 1997). Die AEZR wird zur Positionierung und Bahnverfolgung der Gelenke sowie des Endeffektors verwendet. Für die Bahnverfolgungsregelung des Endeffektors werden Untersuchungen mit unterschiedlichen Zusatzmassen durchgeführt. Das Problem der zeitlichen Verzögerung wird durch eine Sollbahnvorsteuerung gelöst.

Im einzelnen umfaßt dieser Forschungsbericht die folgenden Abschnitte: In Abschnitt 2 erfolgt die konventionelle Regelung (PD–Regler) mit einer adaptiven Vorsteuerung. Das neue Regelungskonzept, die Adaptive Erweiterte Zustandsregelung (AEZR), wird in Abschnitt 3 vorgestellt. Abschnitt 4 stellt die experimentellen Ergebnisse dar. Eine Zusammenfassung schließt diesen Bericht ab.

2 Konventionelle Regelung mit einer adaptiven Vorsteuerung

Die ausführliche Beschreibung des im Fachgebiet MSRT vorhandenen zweiachsigen elastischen Handhabungssystems DFM01 (siehe Bild 2.1) und die neue Methode zur Modellmodifikation und Zustandsschätzung sind in (Bai 1996) zu finden, wobei die nicht modellierte Dynamik des DFM01 als Störgröße betrachtet wird.

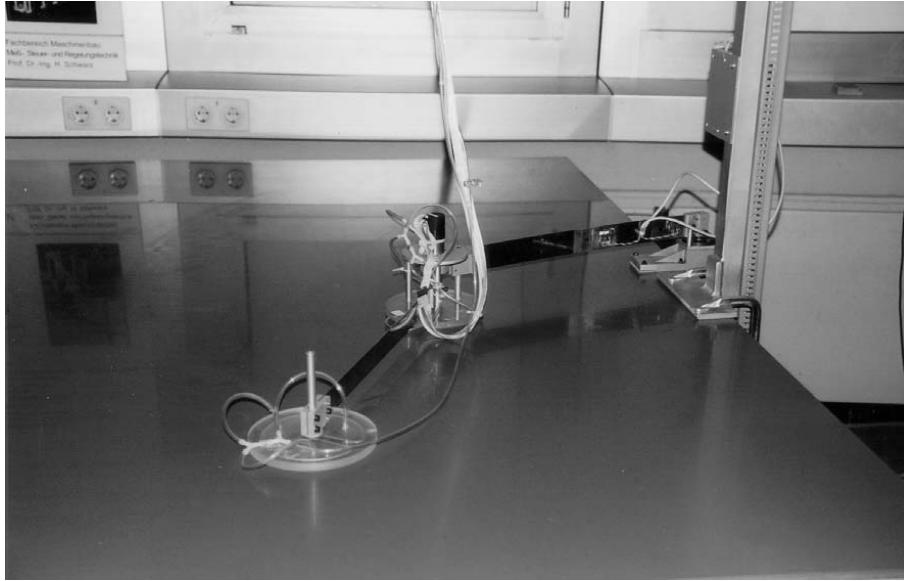


Bild 2.1: Zweiachsiges elastisches Handhabungssystem DFM01

2.1 Reglersynthese

Zur Positionierung der Gelenke wird zuerst ein konventioneller PD–Regler, verwendet, wobei die elastischen Deformationen nicht berücksichtigt werden. Ein PD–Regler $\mathbf{u}(k)$ kann in zeitdiskreter Form durch

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{K}_P \mathbf{e}(k) + \frac{\mathbf{K}_D}{T_s} (\mathbf{e}(k) - \mathbf{e}(k-1)) \quad (2.1)$$

beschrieben werden (Tzafestas 1985), wobei $\mathbf{e}(k) = \boldsymbol{\theta}^d(k) - \boldsymbol{\theta}(k)$. $\boldsymbol{\theta}^d(k)$ ist der vorgegebene Vektor des Sollwinkels, \mathbf{K}_P und \mathbf{K}_D die konstanten, diagonalen Matrizen. T_s entspricht der Abtastzeit. Gl. (2.1) kann umgeschrieben werden zu

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{K}_P(\boldsymbol{\theta}^d(k) - \boldsymbol{\theta}(k)) + \mathbf{K}_D(\dot{\boldsymbol{\theta}}^d(k) - \dot{\boldsymbol{\theta}}(k)) \quad . \quad (2.2)$$

mit

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}^d(k) = \frac{\boldsymbol{\theta}^d(k) - \boldsymbol{\theta}^d(k-1)}{T_s} \quad (2.3)$$

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}(k) = \frac{\boldsymbol{\theta}(k) - \boldsymbol{\theta}(k-1)}{T_s} \quad (2.4)$$

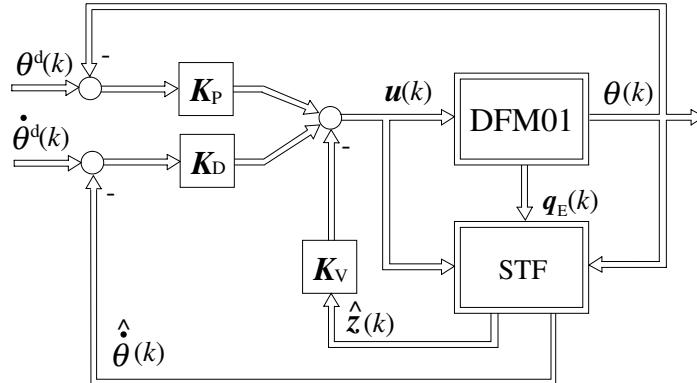
Tabelle 2.2 Parameter des DFM01

	Arm 1	Arm 2
Länge	$l_1 = 0,44 \text{ m}$	$l_2 = 0,44 \text{ m}$
gleichmäßig verteilte Masse	$\rho_1 = 0,571 \text{ kg/m}$	$\rho_2 = 0,214 \text{ kg/m}$
Biegesteifigkeit	$EI_1 = 4,934 \text{ Nm}^2$	$EI_2 = 0,463 \text{ Nm}^2$
Trägheitsmoment der Welle i	$I_{w1} = 0,0196 \text{ kgm}^2$	$I_{w2} = 0,00162 \text{ kgm}^2$
Zusatzmasse des i -ten Armes	$m_e = 0,84 \text{ kg}$	$m_t = 0,319 \text{ kg}$
Trägheitsmoment der Zusatzmasse	$I_e = 0,001256 \text{ kgm}^2$	$I_t = 0,000715 \text{ kgm}^2$

Der in Gl. (2.2) dargestellte PD-Regler wird nun durch eine adaptive Vorsteuerung $\mathbf{K}_V \mathbf{z}(k)$ modifiziert, wobei $\mathbf{z}(k) = [z_1(k), z_2(k)]^T$ dem Störgrößenvektor entspricht (Bai 1996). Die konstante diagonale Matrix \mathbf{K}_V ist die Verstärkung der adaptiven Vorsteuerung.

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{K}_P(\boldsymbol{\theta}^d(k) - \boldsymbol{\theta}(k)) + \mathbf{K}_D(\dot{\boldsymbol{\theta}}^d(k) - \dot{\boldsymbol{\theta}}(k)) - \mathbf{K}_V \mathbf{z}(k) \quad (2.5)$$

Da der Störgrößenvektor $\mathbf{z}(k)$ mit Hilfe des Strong-Tracking-Filters (STF) online ad-

**Bild 2.2:** Blockschaltbild des geschlossenen Systems

aptiv geschätzt werden kann (Bai 1996), lassen sich einige nicht modellierte dynamische Eigenschaften, wie z. B. die Reibungskräfte und die Kabelstörung durch $\mathbf{K}_V \mathbf{z}(k)$ adaptiv kompensieren. Bild 2.2 zeigt das Blockschaltbild des geschlossenen Systems, wobei $\mathbf{q}_E(k)$ den elastischen verallgemeinerten Koordinaten entspricht. Die Schätzung der nicht meßbaren Winkelgeschwindigkeiten $\dot{\boldsymbol{\theta}}(k)$ erfolgt auch mit Hilfe des STF.

2.2 Experimentelle Ergebnisse

Der in Gl. (2.2) bzw. Gl. (2.5) dargestellte Regler wird zur Positionierung der Gelenke verwendet. Der Sollwinkelvektor ist $\boldsymbol{\theta}^d(k) = [10^\circ, -10^\circ]^T$. Die Parameter des DFM01, die in dieser Arbeit verwendet werden, sind in Tabelle 2.2 aufgeführt. Die Diagonalmatrizen \mathbf{K}_P und \mathbf{K}_D werden als $\mathbf{K}_P = \text{diag}\{17, 19, 5, 73\}$ bzw. $\mathbf{K}_D = \text{diag}\{3, 44, 0, 29\}$ gewählt.

Bild 2.3 zeigt die Sprungantworten der geregelten Winkel θ_i und der entsprechenden Stellspannungen u_i ohne Vorsteuerung. Die bleibende Regelabweichung (ca. $1,4^\circ$) erklärt sich

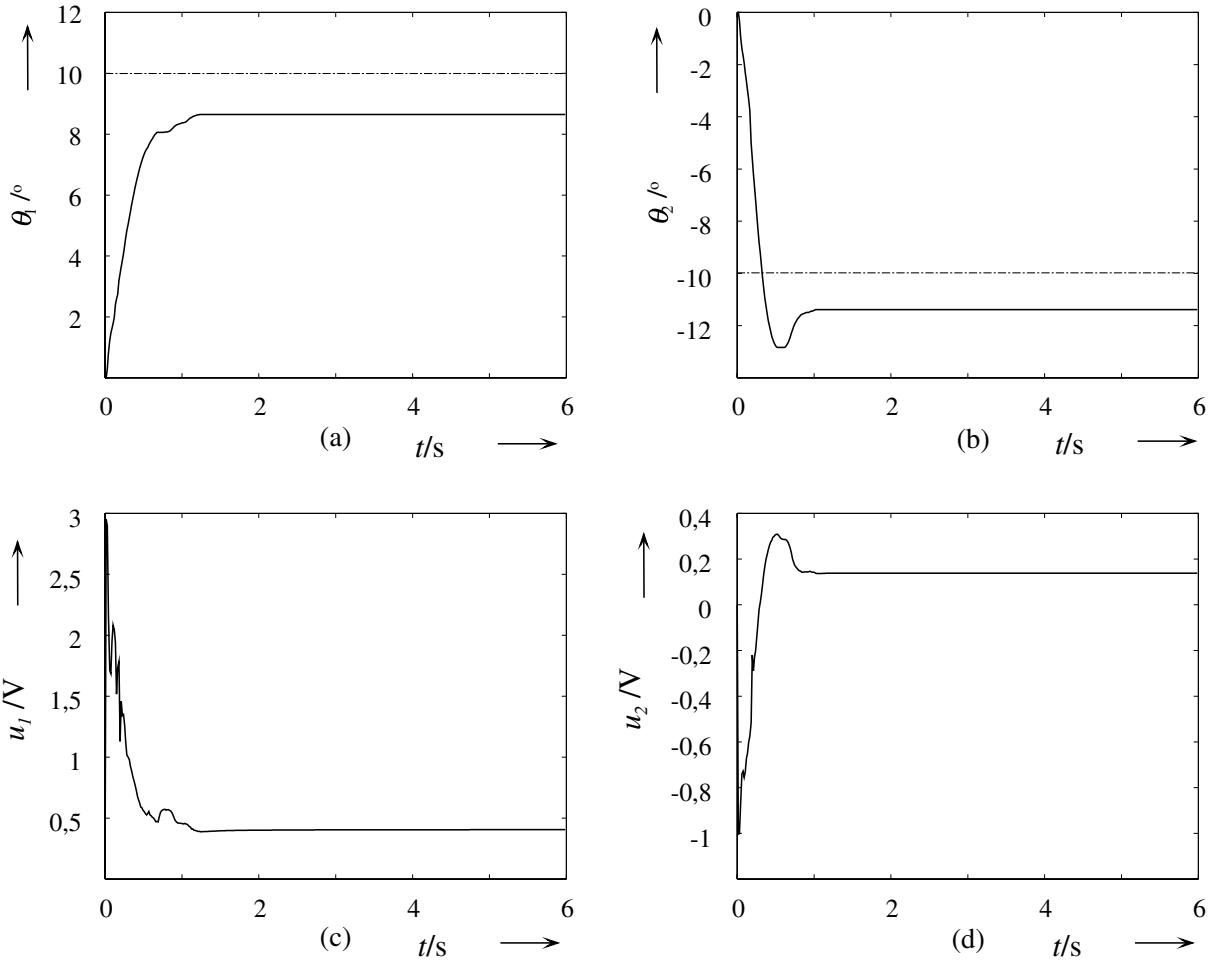


Bild 2.3: Sprungantworten des Systems mit PD-Regler ohne adaptive Vorsteuerung:
 (a), (b) Zeitverläufe der geregelten Winkel ('--' Sollwert, '-' Istwert); (c),
 (d) Zeitverläufe der Stellspannungen

über die Haftriebungskräfte, die ein zeitvariantes Verhalten besitzen und sich kaum durch eine konstante Vorsteuerung kompensieren lassen.

Bild 2.4 stellt das Regelverhalten des mit dem Regler nach Gl. (2.5) geregelten Systems vor, mit der Parametrierung von $\mathbf{K}_V = \text{diag}\{0, 85, 0, 25\}$. Die sich mit dem Regler (2.5) einstellende stationäre Genauigkeit (siehe Bilder 2.4 (a) und (b)) ist im Vergleich zu den in den Bildern 2.3 (a) und (b) dargestellten Ergebnissen deutlich besser. Eine Erklärung für die kleine Regelabweichung von θ_1 (ca. $0,2^\circ$, siehe Bild 2.4 (a)) ergibt sich aus der nicht modellierten Dynamik des DFM01, die durch die adaptive Vorsteuerung nicht komplett kompensiert wird. Es ist anzumerken, daß der geregelte Winkel θ_2 eine große Überschwingweite besitzt. Die experimentellen Studien zeigen, daß sich diese Überschwingweite durch den Regler (2.5) schwer beseitigen läßt. Die Bilder 2.4 (e) und (f) stellen die Zeitverläufe der elastischen verallgemeinerten Koordinaten dar, die durch DMS

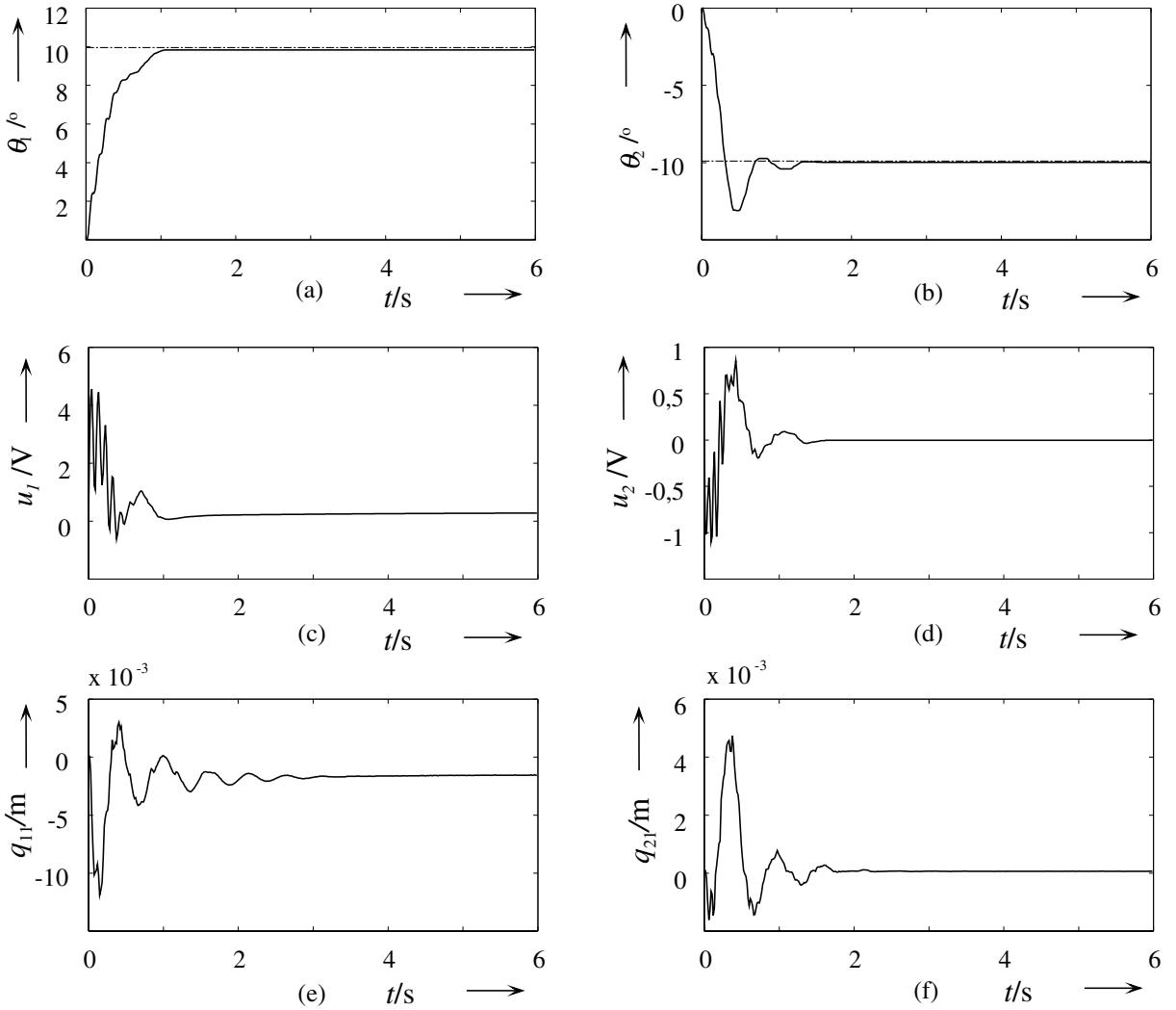


Bild 2.4: PD–Regler mit adaptiver Vorsteuerung: (a), (b) Zeitverläufe der geregelten Winkel ('--' Sollwert, '-' Istwert); (c), (d) Zeitverläufe der Stellspannungen; (e), (f) Zeitverläufe der elastischen verallgemeinerten Koordinaten

ermittelt werden. Ohne Berücksichtigung der ersten elastischen Eigenfunktionen zeigen die experimentellen Ergebnisse deutlich, daß das Regelverhalten des DFM01 schlecht ist.

3 Adaptive Erweiterte Zustandsregelung (AEZR)

In diesem Abschnitt wird zuerst ein neues Regelungskonzept, die *Adaptive Erweiterte Zustandsregelung* (AEZR), vorgestellt, wobei der Regler aus einem LQR-Regler und einem adaptiven Kompensator besteht. Alle Zustände und die Störgrößen $\mathbf{z}(k)$, die die nicht modellierte Dynamik des DFM01 repräsentieren, werden mit Hilfe des STF online geschätzt (Bai 1996). Die AEZR wird dann zur Positionierung und Bahnverfolgung der Gelenke sowie des Endeffektors verwendet.

3.1 Regelung der Gelenkwinkel

Das modifizierte linearisierte zeitdiskrete Systemmodell des DFM01 ist in (Bai 1996) gegeben und wird durch

$$\mathbf{x}_m(k+1) = \mathbf{A}_d \mathbf{x}_m(k) + \mathbf{B}_d(\mathbf{u}(k) + \mathbf{z}(k)) \quad (3.1)$$

$$\mathbf{y}_m(k) = \mathbf{C}_d \mathbf{x}_m(k) \quad (3.2)$$

mit

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_m(k) &= [\Delta \mathbf{q}(k), \Delta \dot{\mathbf{q}}(k)]^T \\ \Delta \mathbf{q}(k) &= \mathbf{q}(k) - \mathbf{q}_0 \\ \mathbf{q}(k) &= [\theta_1(k), \theta_2(k), q_{11}(k), q_{21}(k)]^T \\ \mathbf{u}(k) &= [u_1(k), u_2(k)]^T \end{aligned}$$

beschrieben, wobei \mathbf{q}_0 einem Arbeitspunkt entspricht. $\mathbf{q}(k)$ enthält den verallgemeinerten Koordinaten des DFM01, die aus starren und elastischen Koordinaten $\theta_i(k)$, $q_{ii}(k)$ bestehen. u_i ist die Eingangsspannung des i -ten Motors. Die konstanten Matrizen \mathbf{A}_d und \mathbf{B}_d sowie \mathbf{C}_d sind in (Bai 1996) zu finden. Da $\mathbf{z}(k)$ mit Hilfe des STF geschätzt werden kann, wird der Reglerentwurf durch eine Kompensation des Störvektors $\mathbf{z}(k)$ stark vereinfacht. Der Stellvektor $\mathbf{u}^*(k)$ wird nun definiert als

$$\mathbf{u}^*(k) \triangleq \mathbf{u}(k) + \mathbf{z}(k) \quad . \quad (3.3)$$

Aus den Gln. (3.1) und (3.2) erhält man

$$\mathbf{x}_m(k+1) = \mathbf{A}_d \mathbf{x}_m(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}^*(k) \quad (3.4)$$

$$\mathbf{y}_m(k) = \mathbf{C}_d \mathbf{x}_m(k) \quad . \quad (3.5)$$

Um einen Regler zu entwerfen, können alle Regelungskonzepte, die für lineare zeitinvariante Systeme geeignet sind, verwendet werden. Da alle Zustandsgrößen des durch Gln. (3.4) und (3.5) bezeichneten Modells vollständig steuerbar und beobachtbar sind, ist der Reglerentwurf mit Hilfe der Zustandsregelung möglich. Der Stellvektor $\mathbf{u}(k)$ des DFM01 kann aus Gl. (3.3) bestimmt werden

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}^*(k) - \mathbf{z}(k) \quad . \quad (3.6)$$

Um eine vorgegebene Bahn $\boldsymbol{\theta}^d(k) = [\theta_1^d(k), \theta_2^d(k)]^T$ zu verfolgen und gleichzeitig die elastischen Deformationen aktiv zu dämpfen, wird folgender Regler vorgeschlagen:

$$\boldsymbol{u}(k) \triangleq -\boldsymbol{K}_f [\boldsymbol{x}_m(k) - \boldsymbol{x}^d(k)] - \boldsymbol{K}_c \boldsymbol{z}(k) \quad , \quad (3.7)$$

wobei \boldsymbol{K}_f der Rückführungsmaßmatrix entspricht. \boldsymbol{K}_c ist die Verstärkung des Kompensators. $\boldsymbol{x}^d(k) = [\theta_1^d(k), \theta_2^d(k), 0, 0, \dot{\theta}_1^d(k), \dot{\theta}_2^d(k), 0, 0]^T$ bezeichnet den Sollvektor. $\boldsymbol{K}_f = \boldsymbol{R}_u^{-1} \boldsymbol{B}_d \boldsymbol{P}_R$ kann durch Minimierung der quadratischen Gütfunktion

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} [\boldsymbol{y}_m^T(k) \boldsymbol{Q}_y \boldsymbol{y}_m(k) + \boldsymbol{u}^{*T}(k) \boldsymbol{R}_u \boldsymbol{u}^*(k)] \quad (3.8)$$

bestimmt werden. Die Matrizen \boldsymbol{Q}_y und \boldsymbol{R}_u sind nicht negativ bzw. positiv definit. Die symmetrische, positiv definite Matrix \boldsymbol{P}_R entspricht der stationären Lösung der zeitdiskreten Riccati-Gleichung (Schwarz 1981). $\boldsymbol{x}_m(k)$ und $\boldsymbol{z}(k)$ werden mit Hilfe des STF online geschätzt.

3.2 Regelung des Endeffektors

Die AEZR kann auch zur Regelung des Endeffektors verwendet werden. Das Ziel dieser Regelung liegt in der Positionierung und Bahnverfolgung des Endeffektors und gleichzeitig der aktiven Dämpfung der elastischen Deformationen. Bei der Anwendung der AEZR muß zuerst die Ausgangsgleichung (3.5) geändert werden. Die absolute Verschiebung des Endeffektors $\boldsymbol{p}_e(\boldsymbol{q})$, eine nichtlineare Funktion der verallgemeinerten Koordinaten \boldsymbol{q} sowie die ersten elastischen verallgemeinerten Koordinaten werden hier als Ausgänge betrachtet. Durch die Linearisierung von $\boldsymbol{p}_e(\boldsymbol{q})$ ergibt sich

$$\boldsymbol{p}_e(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{p}_e(\boldsymbol{q}_0) + \frac{\partial \boldsymbol{p}_e(\boldsymbol{q})}{\partial \boldsymbol{q}} \Big|_{\boldsymbol{q}_0} (\boldsymbol{q} - \boldsymbol{q}_0) \quad . \quad (3.9)$$

Das führt auf die folgende Gleichung:

$$\begin{aligned} \Delta \boldsymbol{p}_e(\boldsymbol{q}) &\triangleq \boldsymbol{p}_e(\boldsymbol{q}) - \boldsymbol{p}_e(\boldsymbol{q}_0) = \frac{\partial \boldsymbol{p}_e(\boldsymbol{q})}{\partial \boldsymbol{q}} \Big|_{\boldsymbol{q}_0} \Delta \boldsymbol{q} \\ &\triangleq \boldsymbol{C}_e \Delta \boldsymbol{q} = [\Delta x_e, \Delta y_e]^T. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Der Ausgangsvektor wird nun definiert als

$$\boldsymbol{y}_{1m} \triangleq [\Delta x_e, \Delta y_e, \Delta q_{11}, \Delta q_{21}]^T = \boldsymbol{C}_1 \boldsymbol{x}_m \quad . \quad (3.11)$$

Die Matrix \boldsymbol{C}_1 kann unter Anwendung der Gl. (3.10) bestimmt werden. Da die Sollbahn des Endeffektors vorgegeben ist, kann $\boldsymbol{x}^d(k)$ durch die Auflösung der inversen Kinematik ermittelt werden, unter der Annahme, daß keine Elastizitäten existieren. Das Prinzip des Reglerentwurfs gleicht dem in Abschnitt 3.1 vorgestellten. Bild 3.1 zeigt das Blockschaltbild des mit Hilfe der AEZR geregelten DFM01. Es ist anzumerken, daß die Rückführungsmaßmatrix \boldsymbol{K}_f vom Arbeitspunkt abhängig sein sollte. Da die Ungenauigkeiten des linearisierten Modells (3.1) und (3.2) durch $\boldsymbol{K}_c \boldsymbol{z}(k)$ adaptiv kompensiert werden können, ist \boldsymbol{K}_f hier jedoch als konstante Matrix gewählt worden.

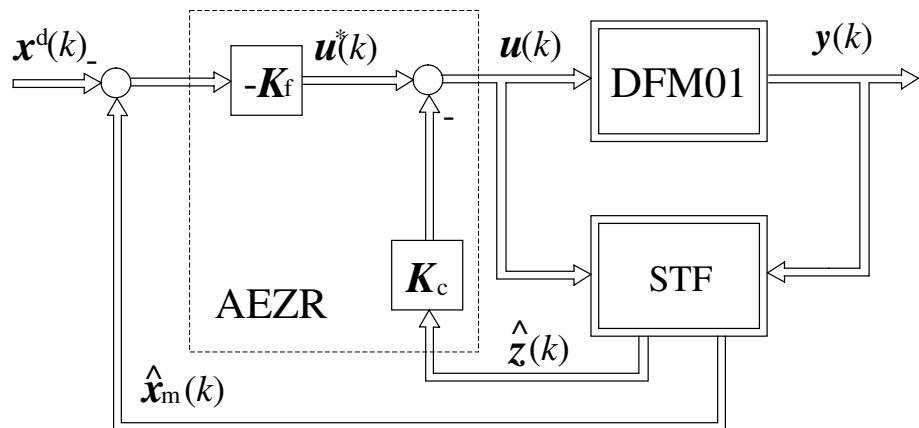


Bild 3.1: Blockschaltbild des geregelten DFM01

4 Experimentelle Ergebnisse

Die im Abschnitt 3 vorgestellte AEZR wurde am DFM01 zur Positionierung und Bahnverfolgung der Gelenke sowie des Endeffektors getestet. Die Programme wurden in der Programmiersprache C erstellt. Da die am Versuchsträgers DFM01 aufgenommenen Signale nur geringfügig verrauscht sind, wird kein Prozeßrauschen angenommen und die Kovarianzmatrix der Meßrauschesignale zu $\mathbf{R}(k) = \text{diag}\{0,0001^2, 0,0001^2, 0,0004^2, 0,0004^2\}$ gesetzt. Die Versuchsdauer beträgt 12 s mit der Abtastzeit $T_s = 15$ ms.

4.1 Regelung der Gelenkwinkel

Der Arbeitspunkt und der Anfangsvektor werden durch $\mathbf{q}_0 = \dot{\mathbf{q}}_0 = \mathbf{0}$ und $\mathbf{x}_m(0) = \mathbf{0}$ sowie $\mathbf{z}(0) = \mathbf{0}$ bestimmt. Die Positionierung der Gelenke wurde zuerst mit der Vorgabe

$$\theta_1^d = -20^\circ \quad \text{und} \quad \theta_2^d = 30^\circ \quad (4.1)$$

durchgeführt. Wählt man nun

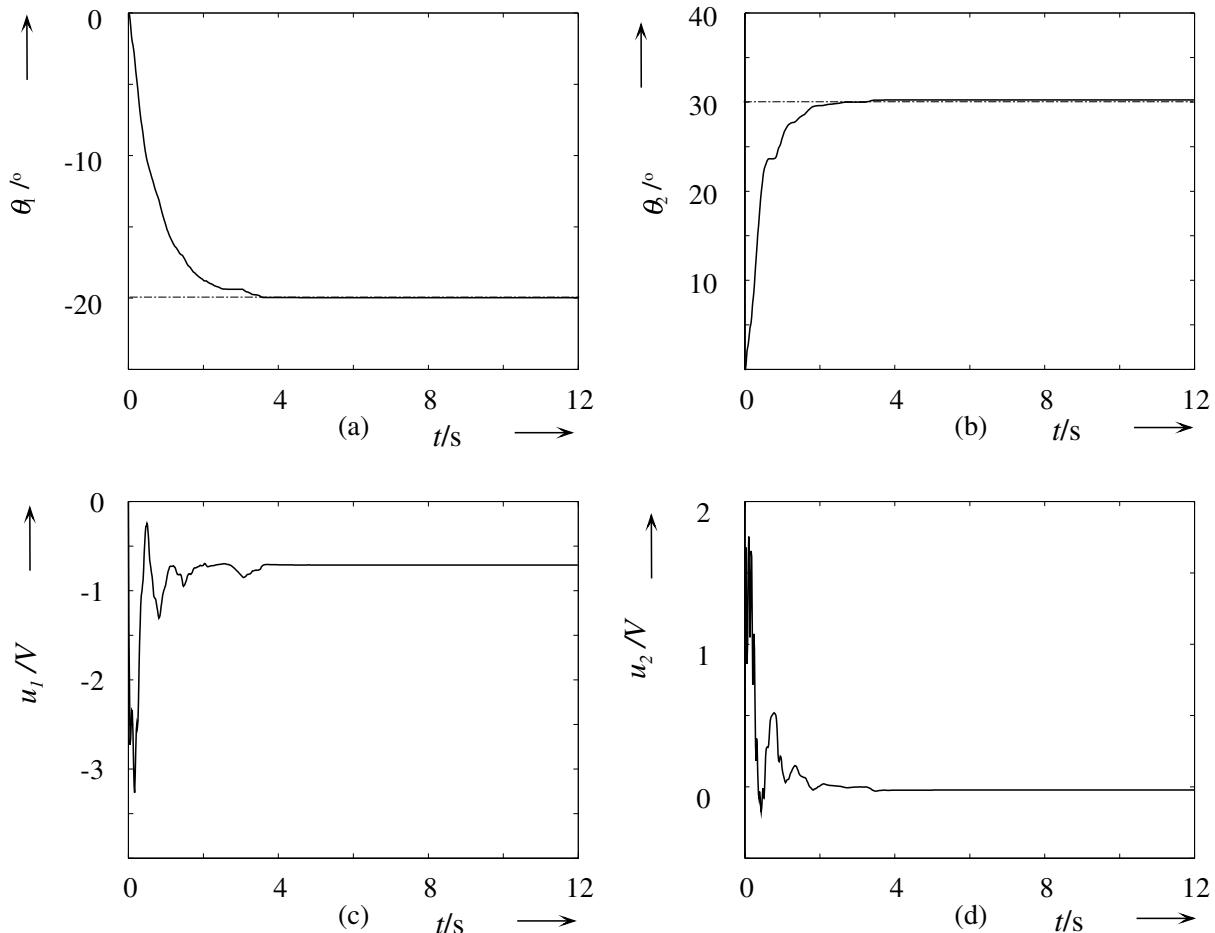


Bild 4.1: Positionierung der Gelenke (a), (b): Zeitverläufe der geregelten Winkel ('-.-' Sollwert, '-' Istwert); (c), (d): Zeitverläufe der Stellspannungen

$$\mathbf{Q}_y = \text{diag}\{0, 5, 0, 5, 0, 0\}, \text{ sowie } \mathbf{R}_u = \text{diag}\{0, 02, 0, 05\} \quad ,$$

dann ergibt sich

$$\mathbf{K}_f = \begin{bmatrix} 4,999 & 0,032 & 0,0003 & 0 & 0,095 & 0,003 & 0,182 & 0,017 \\ -0,020 & 3,162 & 0,0002 & 0,001 & -0,023 & 0,078 & 0,026 & 0,018 \end{bmatrix} . \quad (4.2)$$

Die Kompensationsmatrix \mathbf{K}_c berechnet sich zu $\mathbf{K}_c = \text{diag}\{1, 0, 38\}$. Um das Regelverhalten zu verbessern, wird $\mathbf{K}_f(1,1)$ und $\mathbf{K}_f(2,2)$ zu 4,0 bzw. 3,0 gesetzt. Bild 4.1 zeigt die am DFM01 gemessenen Antworten auf die in (4.1) gegebenen Führungssprünge. Die Winkelverläufe sind durch eine hohe stationäre Genauigkeit charakterisiert. Die online geschätzten und gemessenen Ausgänge des DFM01 werden in Bild 4.2 illustriert. Sie stimmen sehr gut überein, obwohl beide Winkel weit vom Arbeitspunkt entfernt sind. Die stationären Abweichungen der elastischen verallgemeinerten Koordinaten (ungleich Null) erklären sich durch die Ungenauigkeit der Dehnungsmeßstreifen (DMS) (siehe 4.2 (c) und (d)). Bild 4.3 zeigt die geschätzten Geschwindigkeiten der verallgemeinerten Koordinaten

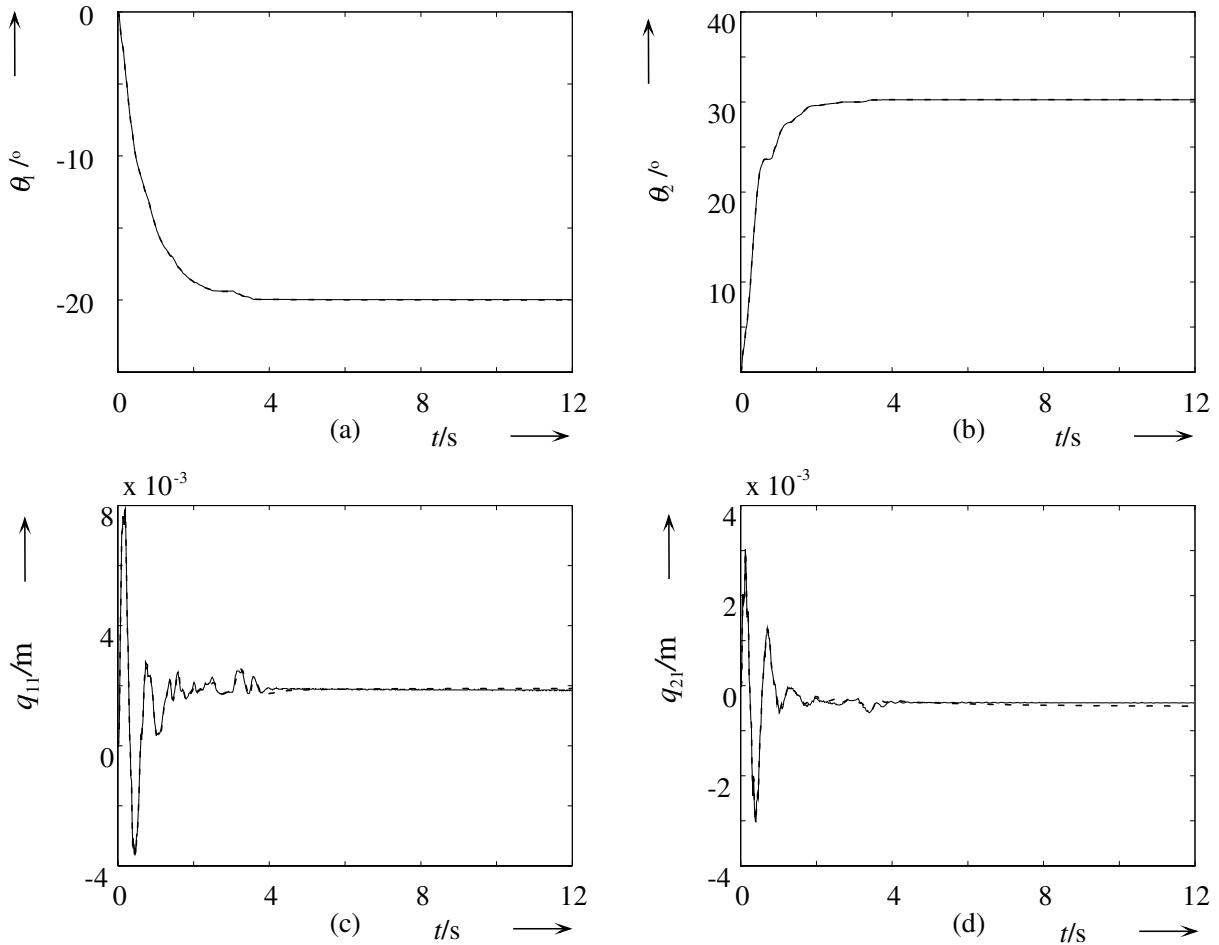


Bild 4.2: Positionierung der Gelenke (a), (b): Zeitverläufe der Winkel; (c), (d): Zeitverläufe der elastischen verallgemeinerten Koordinaten; ('-' gemessen; '- -' geschätzt)

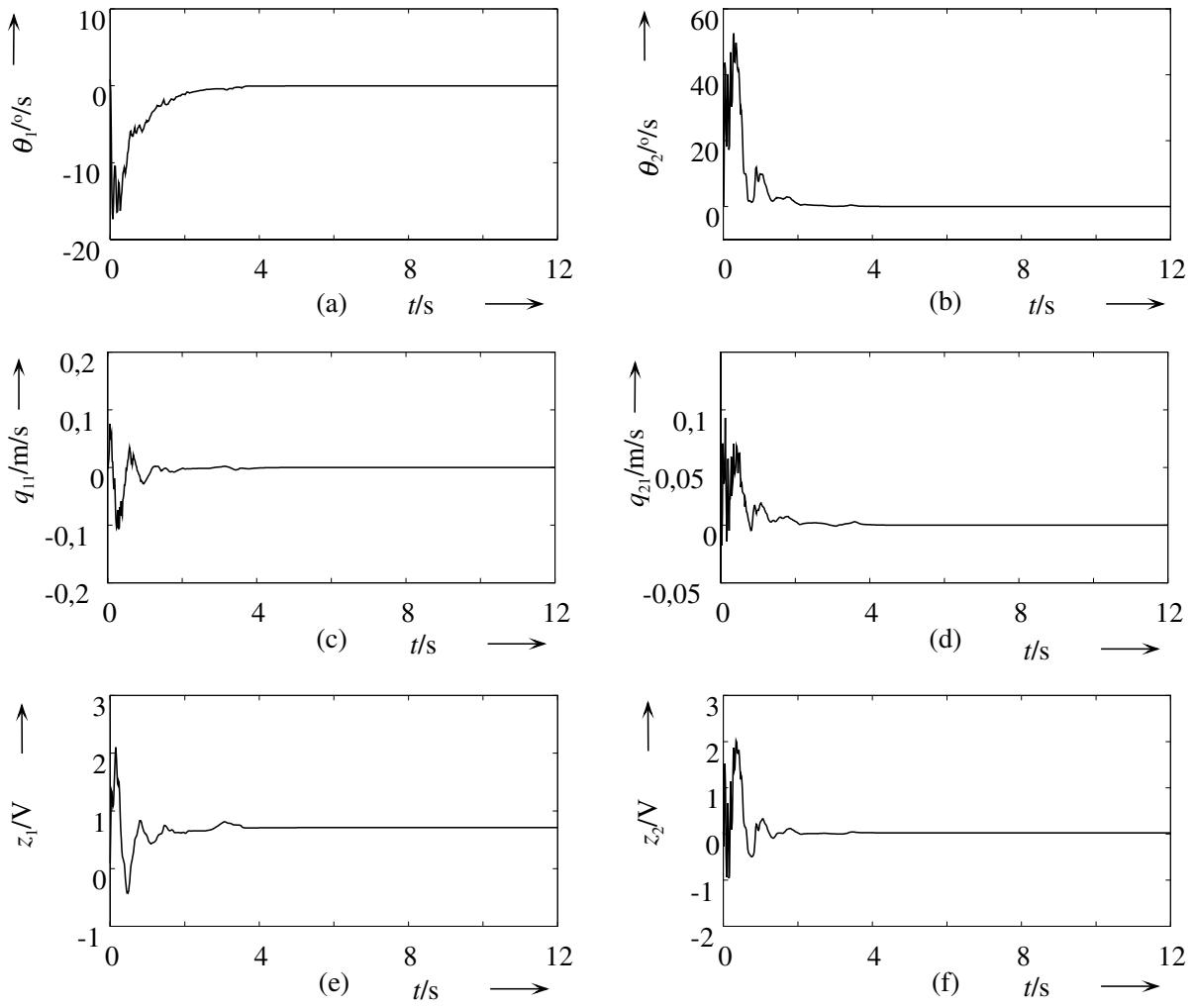


Bild 4.3: Positionierung der Gelenke (a), (b): geschätzte Winkelgeschwindigkeiten; (c), (d): geschätzte Geschwindigkeiten der elastischen verallgemeinerten Koordinaten; (e), (f): geschätzte Störgrößen

und die Störgrößen, die am DFM01 nicht messbar sind.

Als nächstes soll eine Bahnverfolgungsregelung erprobt werden mit der vorgegebenen Bahn

$$\theta_1^d(k) = 0,3491 \sin(1,0k) \quad (4.3)$$

$$\theta_2^d(k) = -0,5236 \cos(1,0k) \quad . \quad (4.4)$$

Die experimentellen Ergebnisse der Bahnfolgeregelung der Winkel sind in Bild 4.4 dargestellt. Die Abweichungen an den Spitzen (ca. 1°) erklären sich aus dem Getriebespiel bzw. der nicht modellierten Dynamik, die durch $\mathbf{K}_c \mathbf{z}(k)$ nicht komplett kompensiert werden. Es ist anzumerken, daß das Folgeverhalten eine kleine zeitliche Verzögerung besitzt. Ein wesentlicher Grund dafür ergibt sich aus dem LQR-Regler, der die Winkelgeschwindigkeiten minimiert. Diese zeitliche Verzögerung kann durch die Vergrößerung der Verstärkungsmatrix \mathbf{K}_f verringert werden. Die in Bild 4.4 dargestellten Ergebnisse

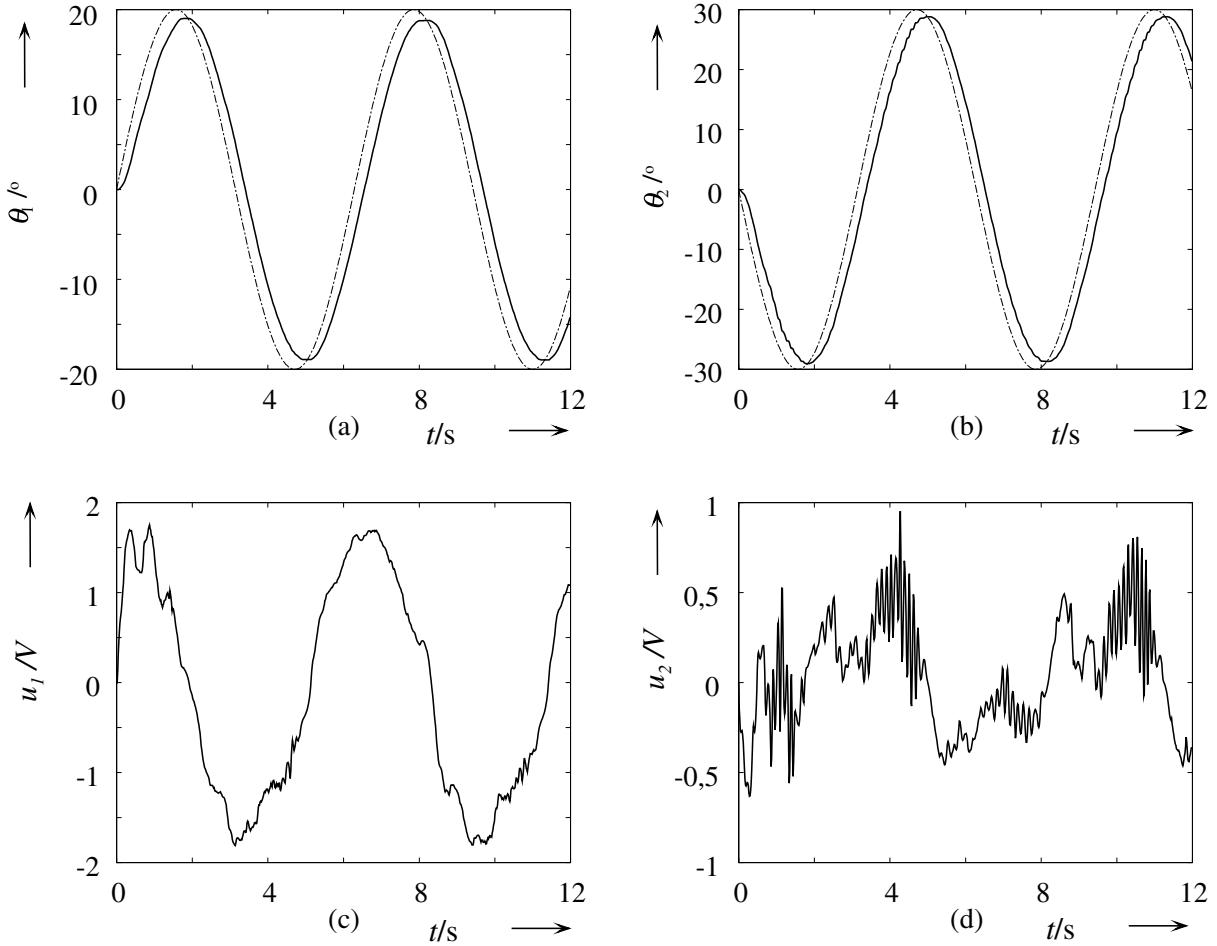


Bild 4.4: Bahnverfolgung der Gelenke (a), (b): Zeitverläufe der Winkel ('-.-' Sollbahn, '—' Istbahn; (c), (d): Zeitverläufe der Stellspannungen

wurden mit den Zahlenwerten

$$\mathbf{K}_f = \begin{bmatrix} 9,999 & 0,122 & 0,0003 & 0 & 0,157 & 0,002 & 0,182 & 0,017 \\ -0,077 & 6,324 & 0,0002 & 0,001 & -0,047 & 0,150 & 0,025 & 0,018 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

realisiert, wobei

$$\mathbf{Q}_y = \text{diag}\{2, 2, 0, 0\} \text{ sowie } \mathbf{R}_u = \text{diag}\{0, 02, 0, 05\}$$

erfüllen. Die entsprechende Kompensationsmatrix ergibt sich zu $\mathbf{K}_c = \text{diag}\{1, 0, 5\}$. Die am DFM01 gemessenen und geschätzten Ausgänge werden in Bild 4.5 dargestellt. Auch hier ist die Übereinstimmung zwischen den geschätzten und gemessenen Ausgängen des DFM01 sehr gut (siehe Bild 4.5). Dies bestätigt, daß das STF die Zustände des DFM01 im Arbeitsraum adaptiv und genau schätzen kann. Bild 4.6 zeigt die geschätzten Geschwindigkeiten der verallgemeinerten Koordinaten und die Störgrößen.

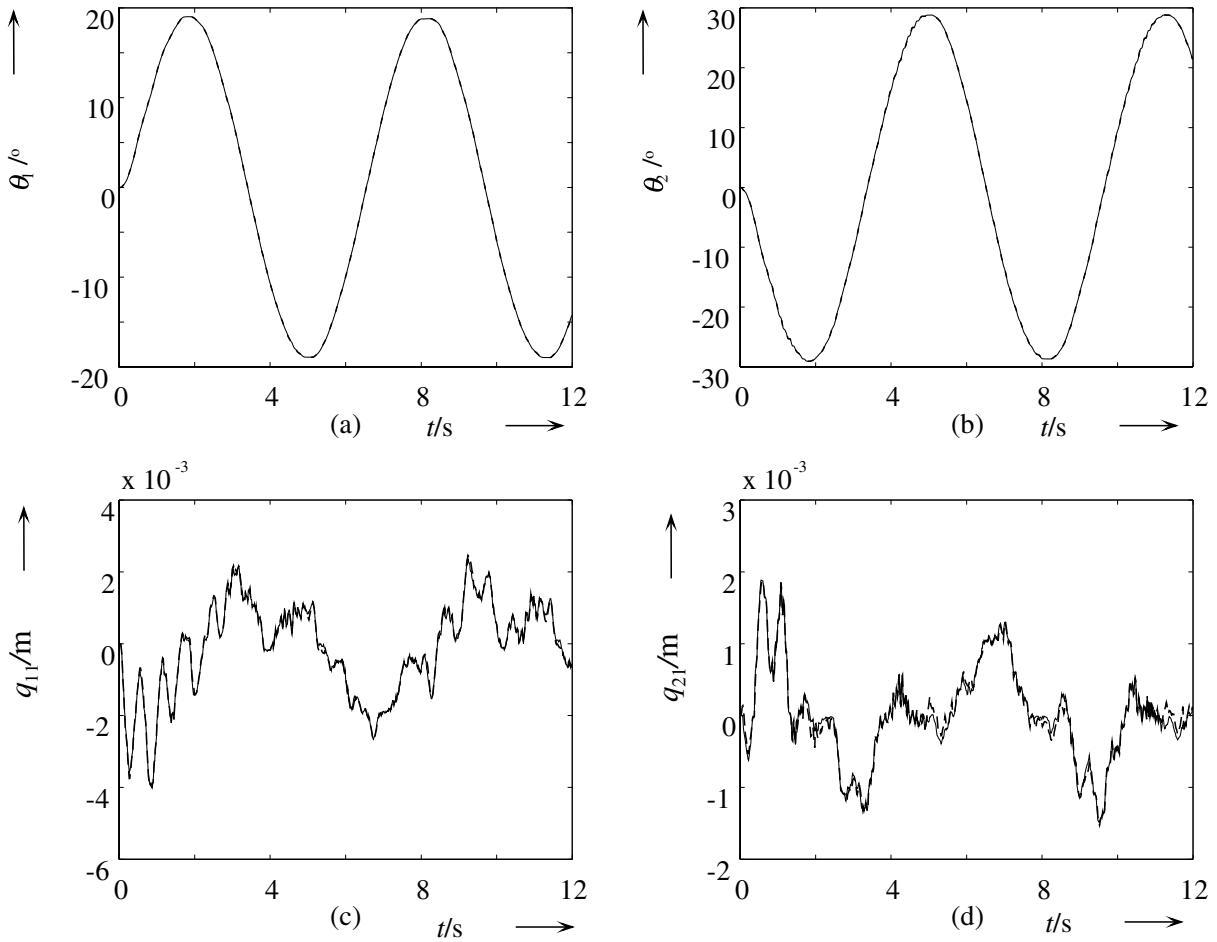


Bild 4.5: Bahnverfolgung der Gelenke (a), (b): Zeitverläufe der Winkel; (c), (d): Zeitverläufe der elastischen verallgemeinerten Koordinaten; ('-' gemessen; '- -' geschätzt)

4.2 Regelung des Endeffektors

Das Augenmerk der Regelung elastischer Handhabungssysteme liegt in der Positionierung und Bahnverfolgung des Endeffektors unter großer Variation der Zusatzmassen. Der in Abschnitt 3.2 entwickelte Regler wird zur Positionierung bzw. Bahnverfolgung des Endeffektors des DFM01 verwendet. Für die Bahnverfolgung des Endeffektors werden Untersuchungen mit unterschiedlichen Zusatzmassen durchgeführt. Das Problem der zeitlichen Verzögerung wird durch eine Sollbahnhvorsteuerung gelöst. Der Arbeitspunkt und der Anfangsvektor wurden zu $\mathbf{q}_0 = [0, 2618, -0, 5236, 0, 0]^T$, $\dot{\mathbf{q}}_0 = \mathbf{0}$ und $\mathbf{x}_m(0) = \mathbf{0}$ sowie $\mathbf{z}(0) = \mathbf{0}$ gesetzt. Die Führungsgrößen sind wie folgt gegeben:

$$x_e^d = 0,967 \text{ m}, \quad y_e^d = 0,171 \text{ m} \quad , \quad (4.6)$$

sowie

$$\theta_1^d = 10^\circ, \quad \theta_2^d = 0^\circ \quad . \quad (4.7)$$

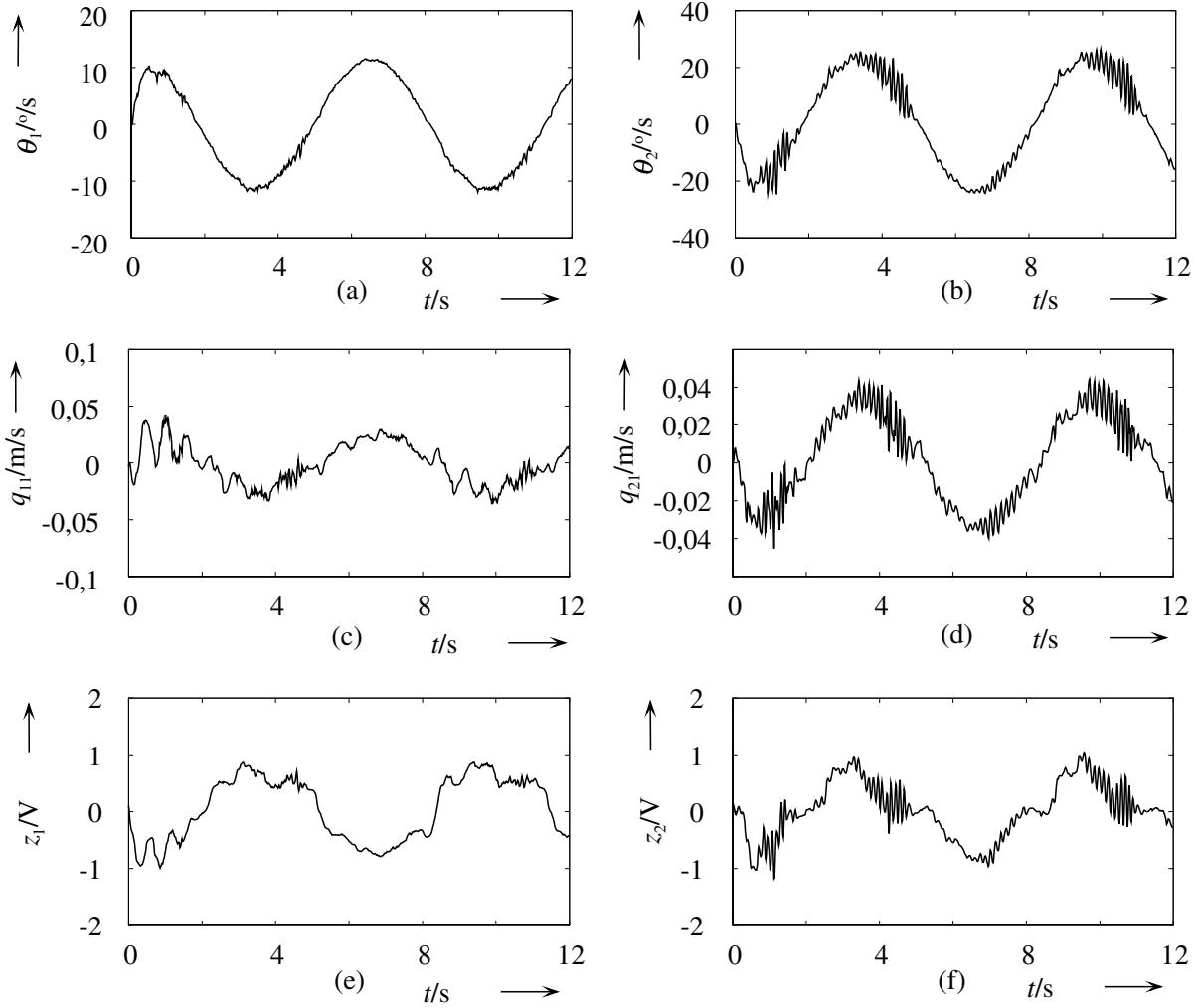


Bild 4.6: Bahnverfolgung der Gelenke (a), (b): geschätzte Winkelgeschwindigkeiten; (c), (d): geschätzte Geschwindigkeiten der elastischen verallgemeinerten Koordinaten; (e), (f): geschätzte Störgrößen

Durch Auflösung der zeitdiskreten Riccati-Gleichungen ergibt sich die Rückführungsmatrix zu

$$\mathbf{K}_f = \begin{bmatrix} 8,691 & 3,458 & 11,733 & 4,672 & 2,938 & 1,266 & 19,535 & 6,061 \\ 6,625 & 4,477 & 20,568 & 6,932 & 2,833 & 1,334 & 19,441 & 6,355 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

mit

$$\mathbf{Q}_y = \text{diag}\{1000, 1000, 1, 1\} \quad \text{und} \quad \mathbf{R}_u = \text{diag}\{5, 5\} \quad .$$

Um die Anstiegszeit zu verringern, wird nun $\mathbf{K}_f(1,1) = 9,491$ und $\mathbf{K}_f(2,2) = 5,277$ gesetzt. Die Verstärkung des Kompensators ist $\mathbf{K}_c = \text{diag}\{1, 0, 1\}$. Bild 4.7 zeigt die Führungssprungantworten des Endeffektors und die entsprechenden Stellspannungen. Mit dem Erreichen von kleinen Regelabweichungen (ca. 0,001m und 0,0054m in x - bzw. y -Richtung) gehen die Stellspannungen auf Werte zurück, die in der Größenordnung der

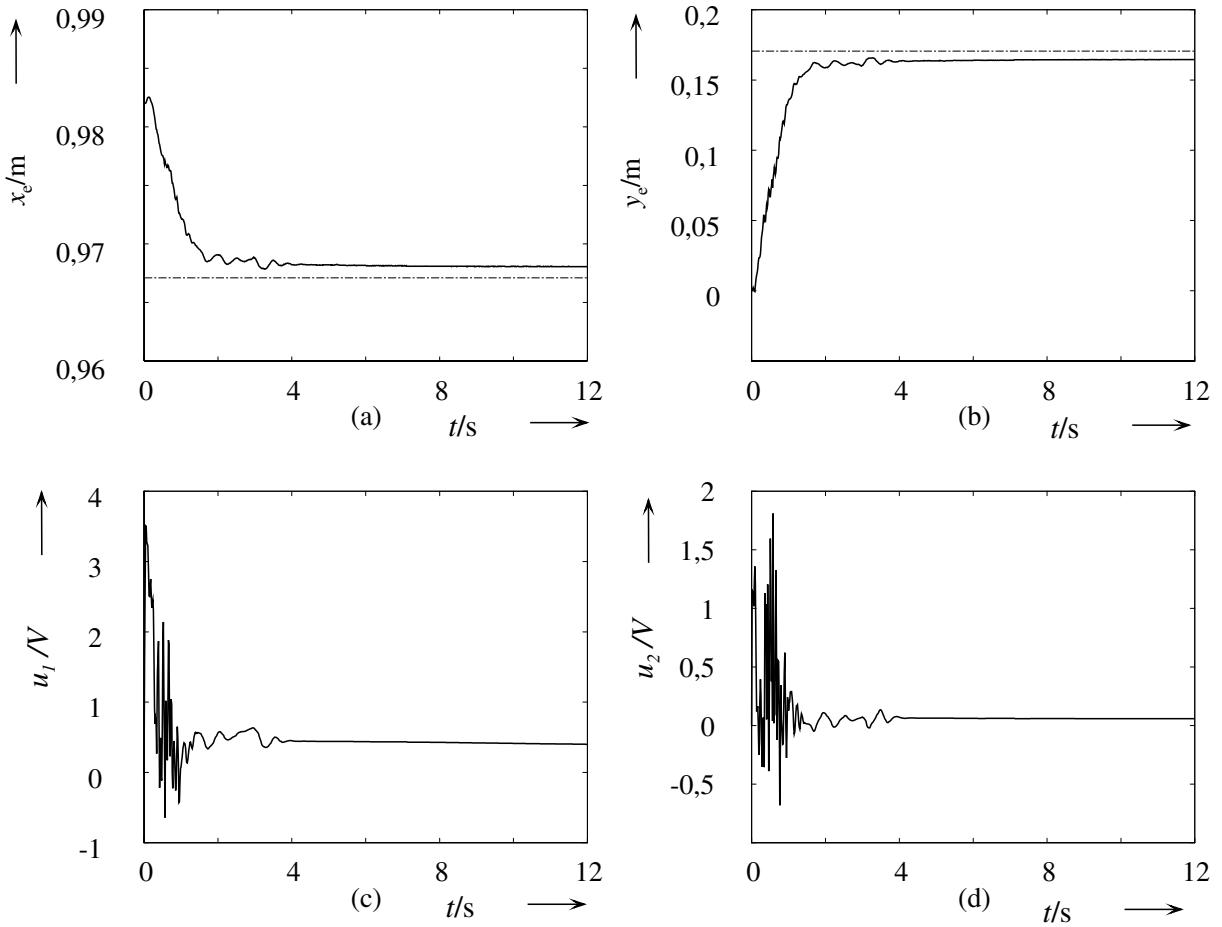


Bild 4.7: Positionierung des Endeffektors (a), (b): Zeitverläufe des Endeffektors ('-.-' Sollwerte, '-' Führungssprungantworten); (c), (d): Stellspannungen

Motoransprechschwelle liegen. Die ersten elastischen verallgemeinerten Koordinaten q_{i1} werden hier durch die von DMS ermittelten Dehnungen der elastischen Glieder berechnet. Die gemessenen und geschätzten Ausgänge des DFM01 werden in Bild 4.8 dargestellt. Die größere stationäre Ungenauigkeit der Winkel erklärt sich mit der Auswahl der Ausgänge, auf der der LQR-Regler beruht. Bild 4.9 zeigt die geschätzten Geschwindigkeiten der verallgemeinerten Koordinaten und die Störgrößen. Um die Positionierung des Endeffektors deutlicher darzustellen, zeigt Bild 4.10 die Trajektorie des Regelungsvorganges.

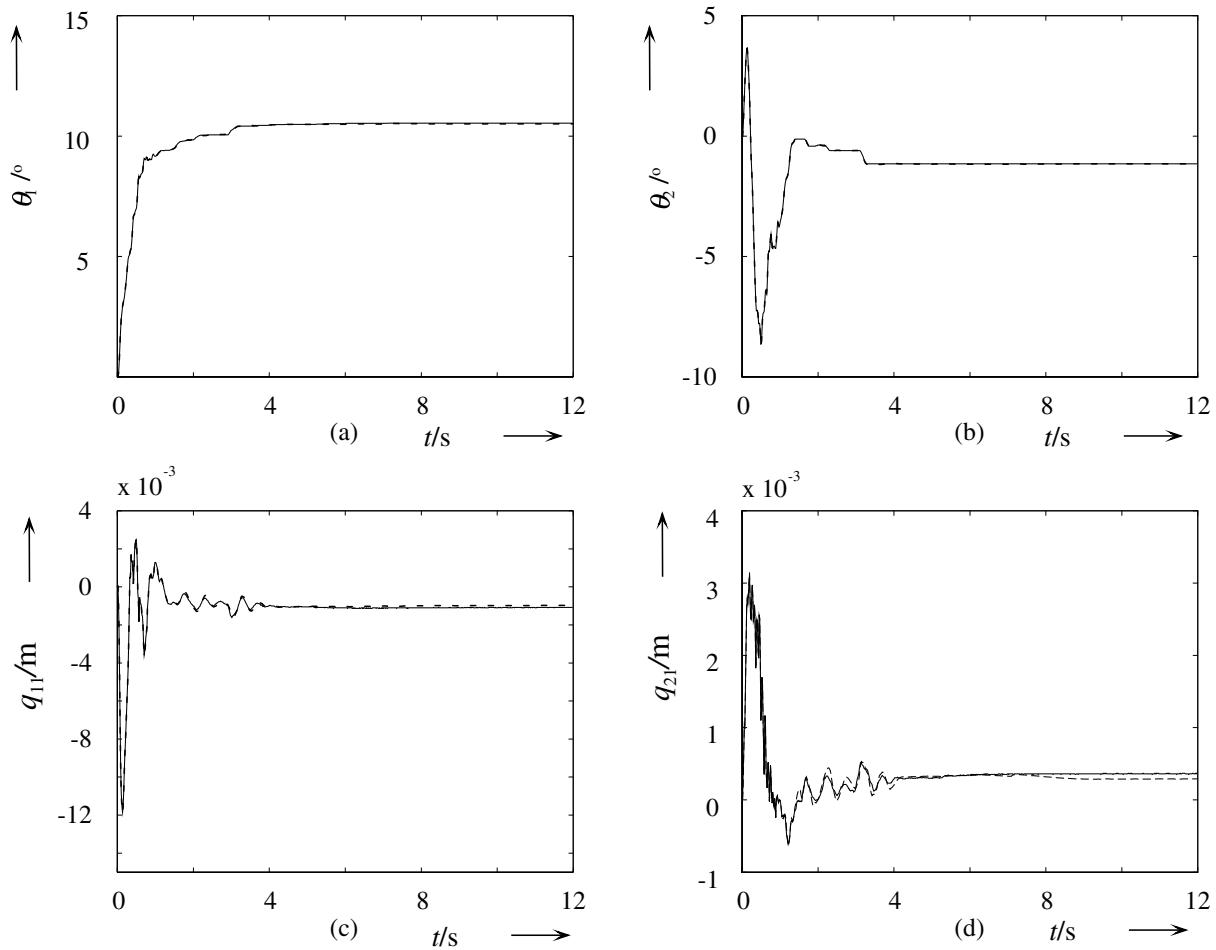


Bild 4.8: Positionierung des Endeffektors (a), (b): Zeitverläufe der Winkel; (c), (d): Zeitverläufe der elastischen verallgemeinerten Koordinaten; ('-' gemessen; '---' geschätzt)

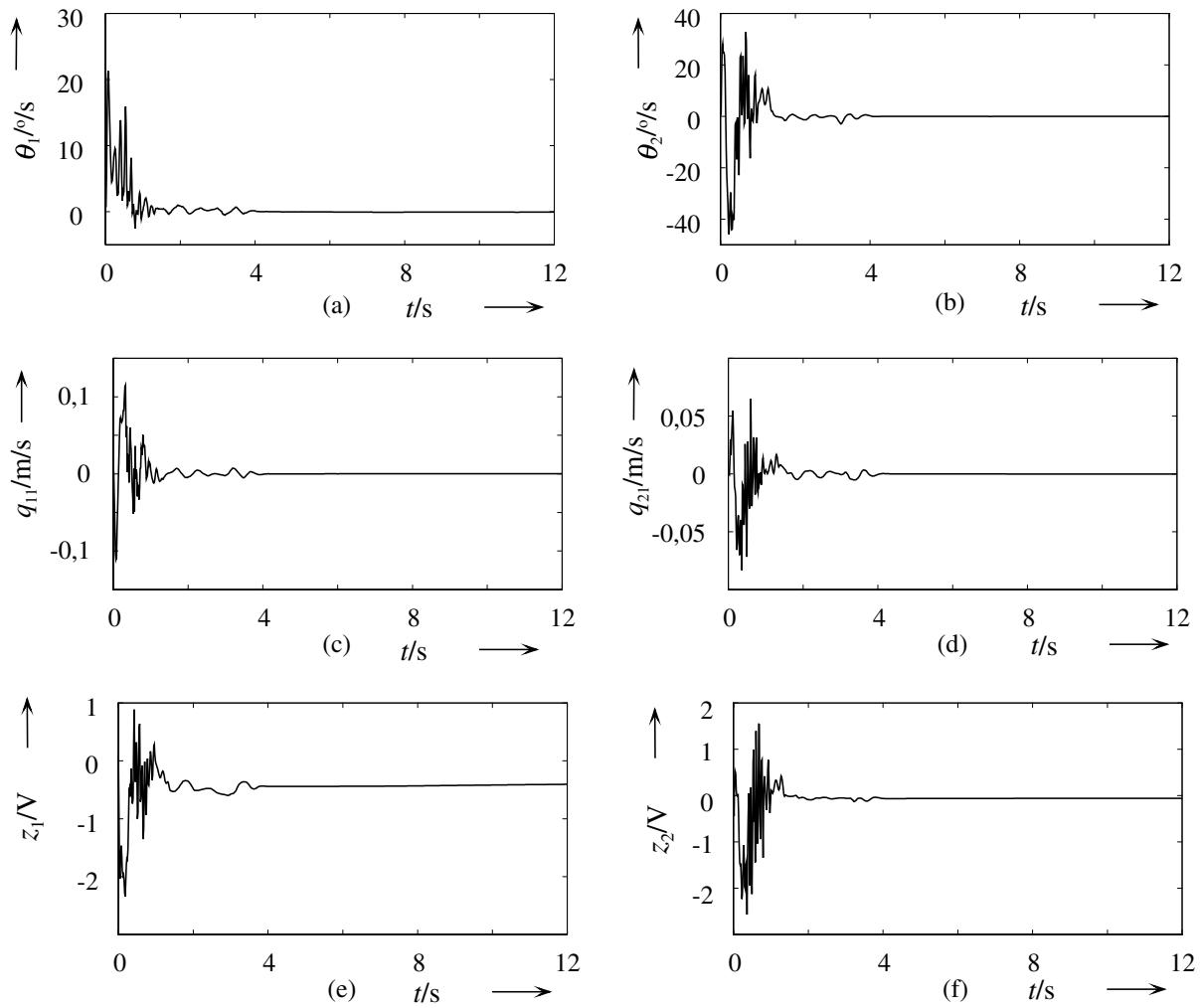


Bild 4.9: Positionierung des Endeffektors (a), (b): geschätzte Winkelgeschwindigkeiten; (c), (d): geschätzte Geschwindigkeiten der elastischen verallgemeinerten Koordinaten; (e), (f): geschätzte Störgrößen

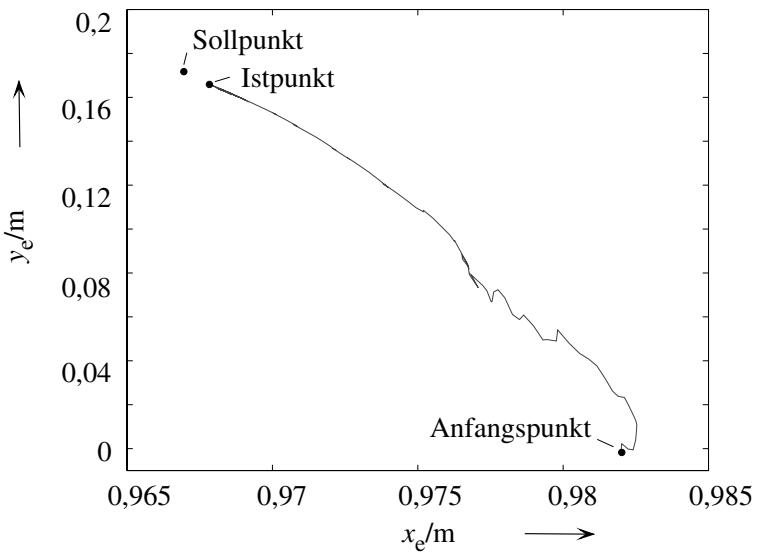


Bild 4.10: Positionierung des Endeffektors

Unter Variation der Zusatzmassen wird nun die AEZR zur Bahnverfolgung des Endeffektors angewendet. Die Parameterschwankungen der Masse bei der Bahnverfolgung des Endeffektors wird durch das Anbringen einer zusätzlichen Masse (100g) realisiert. Bild 4.11 zeigt die zusätzliche Masse, die auch das Trägheitsmoment des Endeffektors I_t beeinflusst. Das Führungsverhalten mit und ohne zusätzliche Masse wird in Bild 4.12

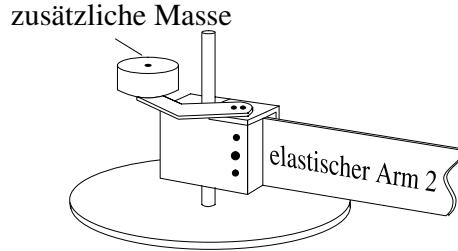


Bild 4.11: Zusätzliche Masse des DFM01

dargestellt. Bei der Bahnverfolgung hat die Istbahn eine große zeitliche Verzögerung, die

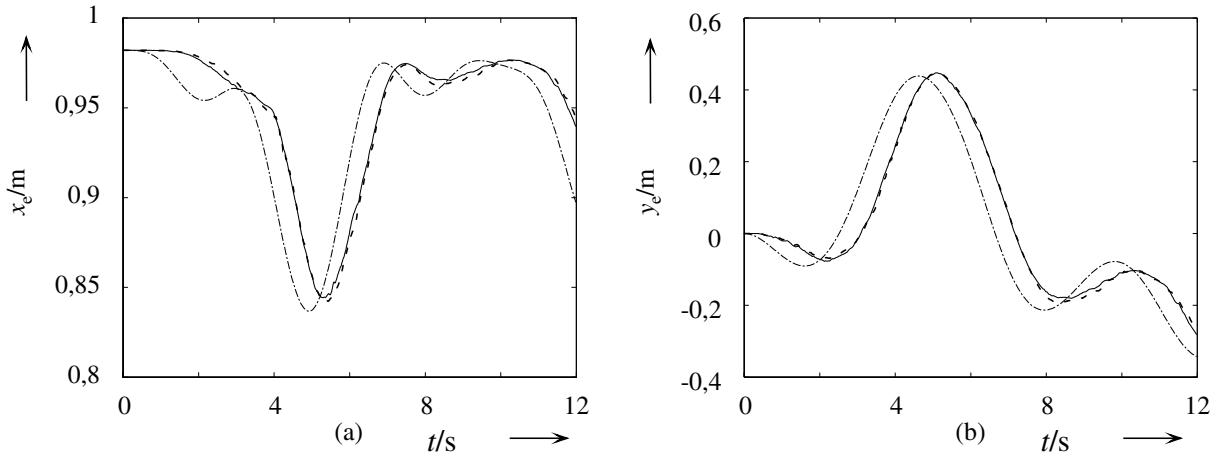


Bild 4.12: Bahnverfolgung des Endeffektors (a), (b): Zeitverläufe des Endeffektors ('-.-' Sollbahn, '—' Ohne zusätzliche Masse, '---' Mit zusätzlicher Masse)

durch eine Vergrößerung der Parameter der Rückführungsmatrix \mathbf{K}_f verringert werden kann. Eine ähnliche Erscheinung ist in (Carusone u. a. 1993) beschrieben. Wegen der Nichtphasenminimumdynamik des Endeffektors erhöht jedoch eine wachsende Matrix \mathbf{K}_f die Neigung der Instabilität des Systems.

Da diese Zeitverzögerung ca. 500 ms beträgt und zudem konstant ist, kann sie unter der Anwendung der Sollbahnvorsteuerung verschwinden, d. h. zum Zeitpunkt k wird die Sollbahn zu $\mathbf{x}^d(k + k_d)$ statt $\mathbf{x}^d(k)$ mit $k_d = 500$ ms gesetzt. Bild 4.13 zeigt die Zeitverläufe des Endeffektors und Stellspannungen mit und ohne zusätzliche Masse, bei der die zeitliche Verzögerung nicht mehr existiert. Das Führungsverhalten erreicht trotz der großen Zusatzmassenänderung kleine Regelabweichungen (ca. 0,02 m, 0,04 m in x - und y -Koordinate), die durch das Getriebispiel (unbelastet 1°) und die Ungenauigkeit der DMS verursacht werden. Eine weitere Ursache besteht in der nicht modellierten Dynamik, die durch $\mathbf{K}_c \mathbf{z}(k)$ nicht komplett kompensiert wird. Das gute Regelverhalten erklärt

sich damit, daß das STF die Störgrößen, die die Zusatzmassenschwankungen enthalten, adaptiv schätzen kann. Dies führt zur adaptiven Kompensation der Parameterschwankungen. Die sehr gut übereinstimmenden gemessenen und geschätzten Ausgänge des DFM01 (ohne zusätzliche Masse) werden in Bild 4.14 dargestellt. Im Falle zusätzlicher Masse erhält man ebenfalls sehr gute Ergebnisse, die hier nicht dargestellt sind. Bild 4.15 zeigt die geschätzten Geschwindigkeiten der verallgemeinerten Koordinaten und die Störgrößen (ohne zusätzliche Masse). Um die Bahnverfolgung des Endeffektors deutlicher zu illustrieren, wird die Kurve (für $0 \leq t \leq 6$ s) in der $x-y$ -Ebene dargestellt (siehe Bild 4.16).

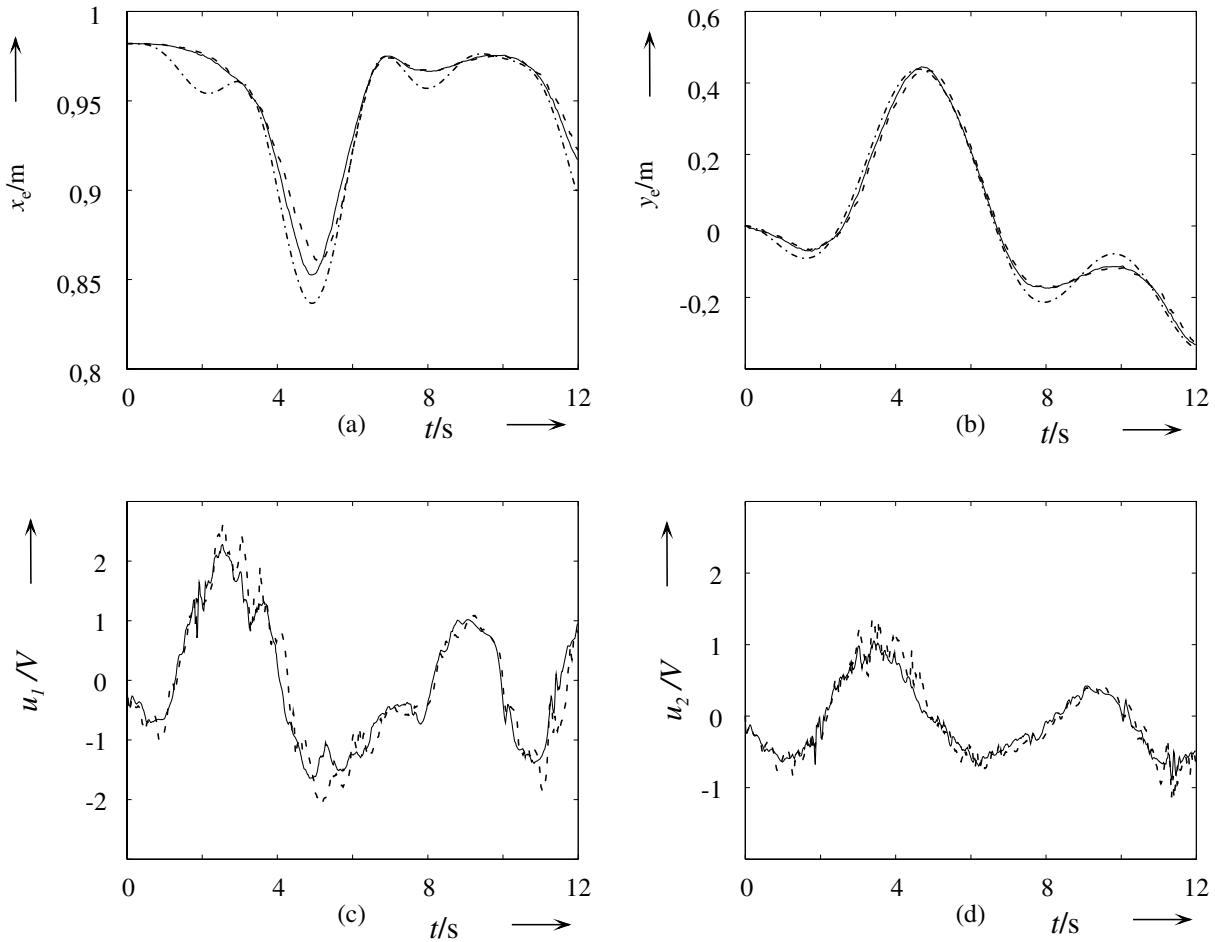


Bild 4.13: Bahnverfolgung des Endeffektors (a), (b): Zeitverläufe des Endeffektors ('-.-' Sollbahn, '-' ohne zusätzliche Masse, '- -' mit zusätzlicher Masse); (c), (d): Stellspannungen ('-' ohne zusätzliche Masse, '- -' mit zusätzlicher Masse)

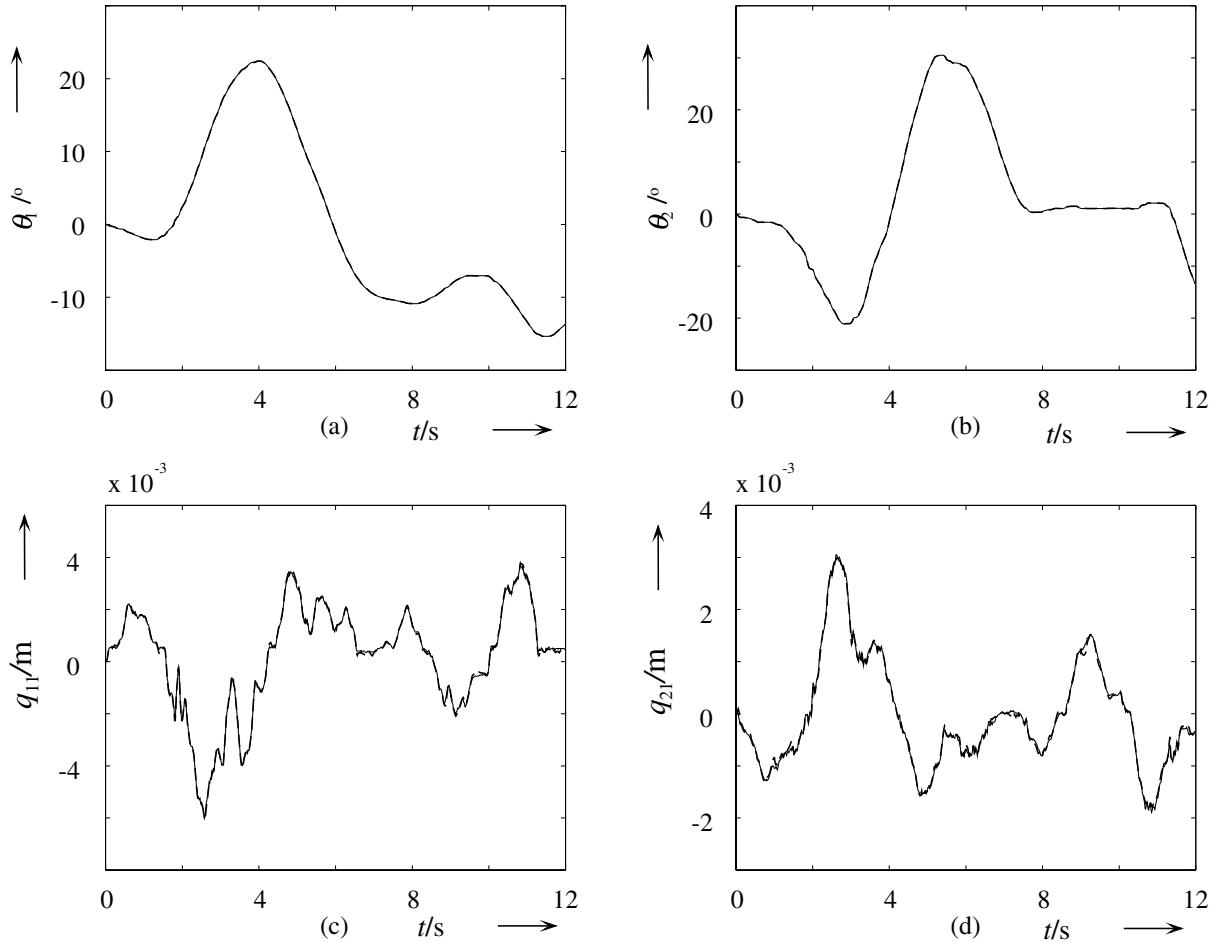


Bild 4.14: Bahnverfolgung des Endeffektors (a), (b): Zeitverläufe der Winkel; (c), (d): Zeitverläufe der elastischen verallgemeinerten Koordinaten; ('-' gemessen; '- -' geschätzt)

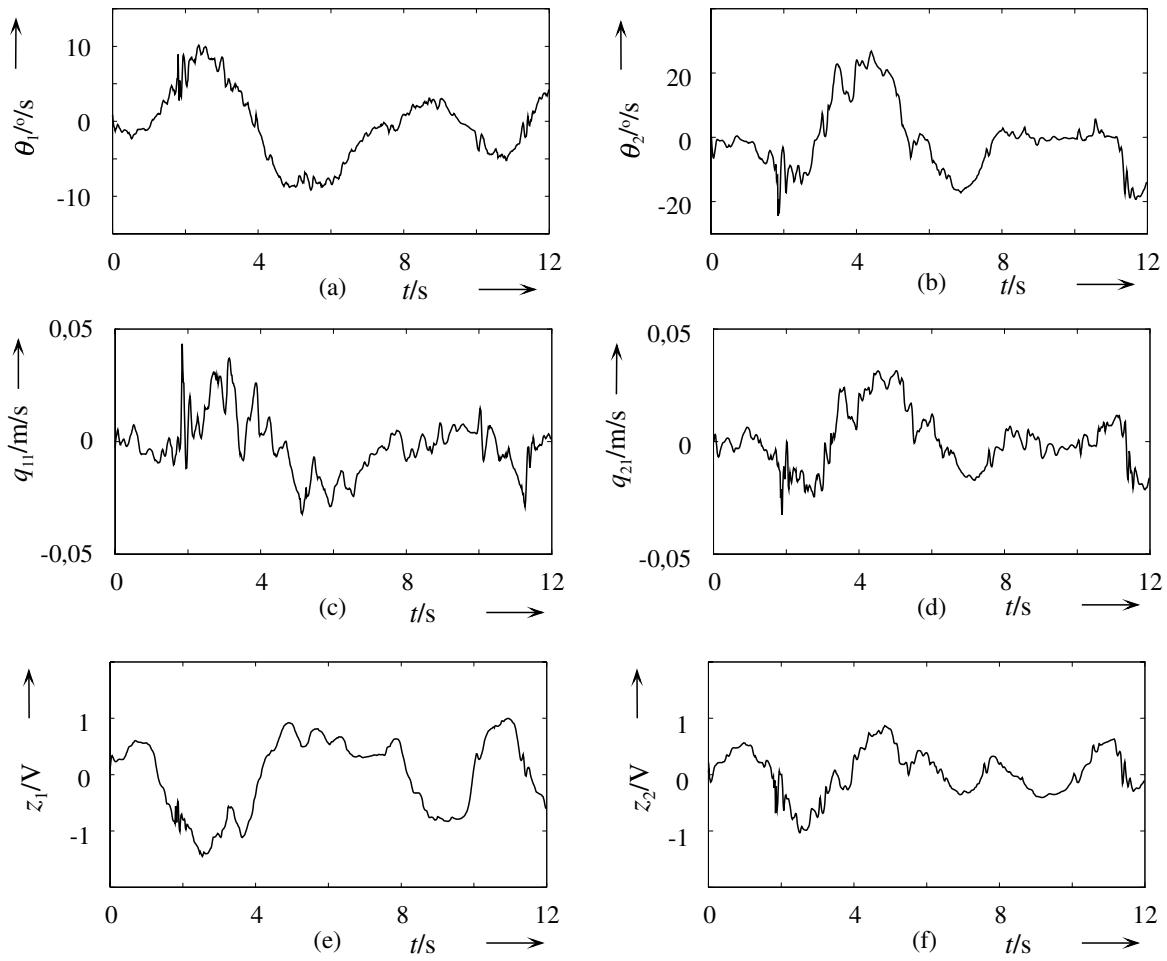


Bild 4.15: Bahnverfolgung des Endeffektors (a), (b): geschätzte Winkelgeschwindigkeiten; (c), (d): geschätzte Geschwindigkeiten der elastischen verallgemeinerten Koordinaten; (e), (f): geschätzte Störgrößen

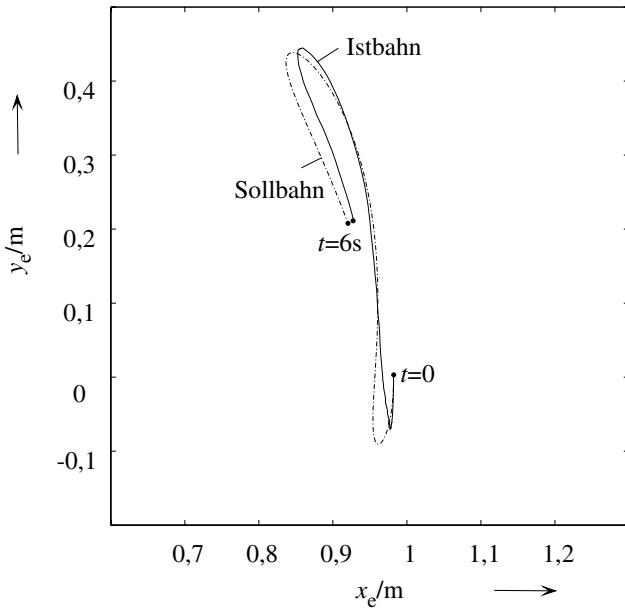


Bild 4.16: Bahnverfolgung des Endeffektors

5 Zusammenfassung

Dieser Bericht stellt die Regelung des im Fachgebiet MSRT vorhandenen zweiachsigen elastischen Handhabungssystems DFM01 vor. Ein konventioneller PD–Regler mit einer adaptiven Vorsteuerung wird zur Positionierung der Gelenke getestet, in dem die ersten elastischen Eigenfunktionen vernachlässigt sind. Ein neues Regelungskonzept, die Adaptive Erweiterte Zustandsregelung (AEZR), wird danach vorgestellt, wobei der Regler aus einem LQR–Regler und einem adaptiven Kompensator besteht. Alle Zustände und die Störgrößen, die die nicht modellierte Dynamik des DFM01 repräsentieren, werden mit Hilfe des STF online adaptiv geschätzt. Die Leistungsfähigkeit der neu eingeführten AEZR wird sowohl für die Positionierung und Bahnverfolgung der Gelenke als auch des Endeffektors am DFM01 nachgewiesen. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, daß der adaptive erweiterte Zustandsregler trotz einer großen Zusatzmassenänderungen starke Robustheit gegenüber Parametergenauigkeiten und Parameterschwankungen besitzt.

Es ist anzumerken, daß das in diesem Bericht vorgestellte AEZR–Konzept nicht auf das Gebiet der elastischen Handhabungssysteme beschränkt ist. Es könnte bis zu einem gewissen Grade auch auf andere nichtlineare Systeme angewendet werden.

Die Verfasserin dankt dem DAAD für die Unterstützung.

6 Literatur

- Aoustin, Y., C. Chevallereau, A. Glumineau und C. H. Moog.** 1994. Experimental results for the end-effector control of a single flexible robotic arm. *IEEE Trans. Contr. Sys. Tech.* 2(4). 371–381.
- Bai, M.** 1994. *Zur Modellbildung, Simulation und Regelung eines elastischen Manipulatorarmes*. Forschungsbericht 14/94. MSRT. Universität Duisburg.
- Bai, M.** 1995. *Adaptive Regelung eines elastischen Manipulatorarmes*. Forschungsbericht 10/95. MSRT. Universität Duisburg.
- Bai, M.** 1996. *Modellmodifikation und Online-Schätzung der Zustände eines zweiachsigen elastischen Handhabungssystems*. Forschungsbericht 21/96. MSRT. Universität Duisburg.
- Bai, M. und H. Schwarz.** 1997. Model modification and state estimation for an experimental planar two-link flexible manipulator by using an efficient approach. *Proceedings of the European Control Conference 1997*. Brüssel, Belgien. No. ECC113.
- Bayo, E.** 1987. A finite-element approach to control the end-point motion of a single-link flexible robot. *J. of Robotic Systems* 4. 63–75.
- Cannon, R. H. und E. Schmitz.** 1984. Initial experiments on the end-point control of a flexible one-link robot. *Int. J. Robotics Res.* 3. 62–75.
- Carusone, J., K. S. Buchan und G. M. T. D'Eleuterio.** 1993. Experiments in end-effector tracking control for structurally flexible space manipulators. *IEEE Trans. Robotics Automat.* 9(5). 553–560.
- Carusone, J. und G. M. T. D'Eleuterio.** 1993. Tracking control for end-effector position and orientation of structurally flexible manipulators. *J. of Robotic Systems* 10. 847–870.
- Chang, P. M. und S. Jayasuriya.** 1995. An evaluation of several controller synthesis methodologies using a rotating flexible beam as a test bed. *ASME J. Dynamic Syst., Measurement, and Contr.* 117. 360–373.
- Cordes, J.** 1992. *Robuste Regelung eines elastischen Teleskoparmroboters*. Braunschweig: Vieweg.
- De Luca, A. und B. Siciliano.** 1989. Trajectory control of a non-linear one-link flexible arm. *Int. J. Control* 50. 1699–1715.
- Khorrami, F., S. Jain und A. Tzes.** 1994. Experiments on rigid body-based controllers with input preshaping for a two-link flexible manipulator. *IEEE Trans. Robotics Automat.* 10(1). 55–65.

- Kwon, D. S.** und **W. J. Book**. 1994. A time-domain inverse dynamic tracking control of a single-link flexible manipulator. *ASME J. Dynamic Syst., Measurement, and Contr.* 116. 193–200.
- Lammerts, I. M. M., F. E. Veldpaus, M. J. G. V. de Molengraft** und **J. J. Kok**. 1995. Adaptive computed reference computed torque control of flexible robots. *ASME J. Dynamic Syst., Measurement, and Contr.* 117. 31–36.
- Milford, R. I.** und **S. F. Asokanthan**. 1996. Experimental on-line frequency domain identification and adaptive control of a flexible slewing beam. *ASME J. Dynamic Syst., Measurement, and Contr.* 118. 58–65.
- Oakley, C. M.** und **R. H. Cannon**. 1989. Equations of motion for an experimental planar two-link flexible manipulator. *Proc. 1989 ASME Winter Annu. Meet.*.. San Francisco, CA. 267–278.
- Rovner, D. M.** und **R. H. Cannon**. 1987. Experiments toward on-line identification and control of a very flexible one-link manipulator. *Int. J. Robotics Res.* 6. 3–19.
- Rovner, D. M.** und **G. F. Franklin**. 1988. Experiments in load-adaptive control of a very flexible one-link manipulator. *Automatica* 24. 541–548.
- Schwarz, H.** 1981. *Optimale Regelung und Filterung*. Braunschweig: Vieweg.
- Siciliano, B., J. V. R. Prasad** und **A. J. Calise**. 1992. Output feedback two-time scale control of multilink flexible arms. *ASME J. Dynamic Syst., Measurement, and Contr.* 114. 70–77.
- Singh, S. N.** und **A. A. Schy**. 1986. Control of elastic robotic systems by nonlinear inversion and modal damping. *ASME J. Dynamic Syst., Measurement, and Contr.*
- Tzafestas, S. G.** 1985. *Applied Digital Control*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V.
- Yang, J. H., F. L. Lian** und **L. C. Fu**. 1997. Nonlinear adaptive control for flexible-link manipulator. *IEEE Trans. Robotics Automat.* 13(1). 140–148.
- Yim, W.** und **S. N. Singh**. 1995. Inverse force and motion control of constrained elastic robots. *ASME J. Dynamic Syst., Measurement, and Contr.* 117. 374–383.