

# Inverse Dynamik und Identifikation von Robotermodellen

M. Daemi, B. Heimann

*Ziel der Arbeit ist die Ermittlung von dynamischen Modellen von Robotern. Dazu wird zunächst ein allgemeines mechanisches Modell aufgestellt. Die Anpassung unbekannter oder schwer zu ermittelnder Parameter erfolgt mit einem Least-Square-Schätzverfahren. Besonderer Wert wird auf die bessere Erfassung der Gelenkdämpfung und Gelenkreibung gelegt.*

*Die Modellbeschreibung soll für den Aufbau einer Momentenvorsteuerung genutzt werden, deswegen steht die inverse dynamische Modellbeschreibung im Vordergrund. Die Untersuchungen werden am Roboter manutec-r15 mit der Siemenssteuerung ACR20, ergänzt durch einen externen Prozessor der Firma dSPACE, durchgeführt.*

## 1 Einleitung

Eine wichtige und seit langem intensiv untersuchte Aufgabe in der Roboterdynamik ist die Ermittlung der erforderlichen Stellgrößen für eine vorgegebene Roboterbahn. Diese Aufgabe wird als inverses dynamisches Problem bezeichnet (Asada, 1986). Sie besitzt gleichermaßen bei Bahnplanungsaufgaben sowie beim Regelungsentwurf durch Momentenvorsteuerung eine große Bedeutung.

Die dazu notwendigen Robotermodelle können durch Untersuchung eines baumstrukturierten, starren Mehrkörpersystems (MKS) gewonnen werden. Der Roboter wird als kinematische Kette mit zweiseitigen holonomen und skleronomen Bindungen betrachtet, die aus  $n$  starren Körpern besteht.

Die Berücksichtigung des Massenträgheitsmomentes des Antriebsmotors  $J_A$  kann mit dem Übersetzungsverhältnis  $k_A$  des Getriebes durch Korrektur des entsprechenden Armträgheitsmomentes um den Term  $\Delta J = k_A^2 J_A$  für jeden Freiheitsgrad erfolgen. Die Gelenke werden zunächst als ideal, nichtelastisch, reibungs- und dämpfungsfrei angenommen. Diese Annahme läßt sich für reale Systeme nicht aufrechterhalten. Eine wesentliche Modellverbesserung erhält man schon durch die Einbeziehung von Gelenkreibung und Gelenkdämpfung (Seeger, 1992; Hölzl, 1994). Die dazugehörigen Parameter, sowie die des Starrkörpermodells, werden durch Anwendung von Schätzverfahren modellgestützt ermittelt.

Ausgangspunkt sind die nichtlinearen Bewegungsgleichungen des Roboters, die nach dem Formalismus von Lagrange aufgestellt werden. Die geometrischen und physikalischen Systemparameter sind im allgemeinen nichtlinear in diesen Gleichungen enthalten. Da die Anwendung linearer Schätzverfahren parameterlineare Modelle voraussetzt, werden durch Umformung 'Basisparameter' mit der Eigenschaft ermittelt, in den Gleichungen linear vorzukommen. Damit geht ihre physikalische Interpretierbarkeit in der Regel verloren. Das identifizierte System beschreibt lediglich das Eingangs-/ Ausgangsverhalten für die inverse Dynamik.

Bild 1 zeigt ein vereinfachtes Blockschaltbild, das den Einsatz des identifizierten Modells für eine allgemeine Roboterregelung darstellt. Mit Hilfe der inversen Dynamik werden die für die Bewegung entlang einer Trajektorie benötigten Momente berechnet und in Form einer Vorsteuerung auf die Motoren geschaltet. Die übergeordnete lineare Regelung ist dadurch erheblich entlastet und braucht damit nicht mehr auf optimales Führungsverhalten, sondern nur noch auf gute Störunterdrückung ausgelegt zu werden. Dieses führt zu einem erheblich besseren dynamischen Verhalten des Roboters.

## 2 Dynamische Modellgleichungen und Parameteridentifikation

Im Falle idealer Gelenke und starrer Körper lassen sich die Bewegungsgleichungen für einen Roboter mit  $n$  Freiheitsgraden in der Form

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{Q} \quad (1)$$

angeben. Dabei bezeichnen

$\mathbf{q}$  den  $n \times 1$ -Vektor der generalisierten Koordinaten (Gelenkkordinaten)  
 $\mathbf{M}(\mathbf{q})$  die  $n \times n$ -Trägheitsmatrix mit  $\mathbf{M} = \mathbf{M}^T > 0$

- $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  den  $n \times 1$ -Vektor der Euler- und Corioliskräfte  
 $G(\mathbf{q})$  den  $n \times 1$ -Vektor der Gravitationskräfte  
 $Q$  den  $n \times 1$ -Vektor der Antriebskräfte

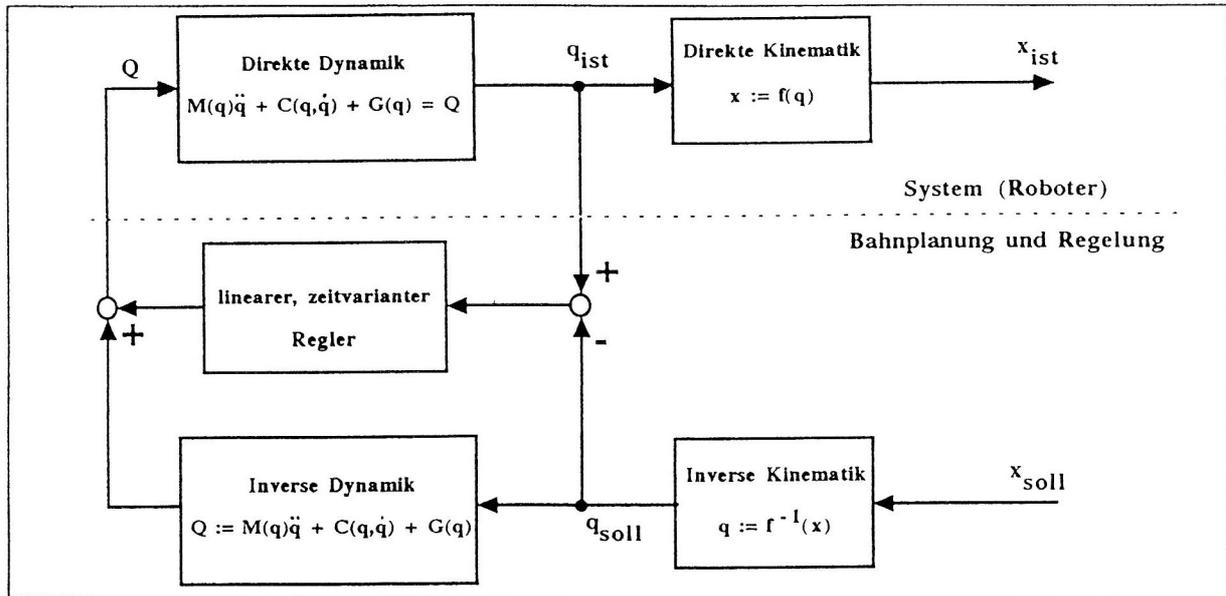


Bild 1. Beispiel einer Roboterregelung

Die Struktur der Bewegungsgleichungen wird deutlicher, wenn sie in Komponentenschreibweise angegeben werden. Dabei kann für jedes Gelenk  $i$  zur Berücksichtigung realer Gelenkeigenschaften eine Reibungskraft  $Q_{Ri}(q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i)$  eingefügt werden, die ausschließlich von der Lage, Geschwindigkeit und Beschleunigung des Gelenkes selbst abhängt. Aus Gleichung (1) folgt dann das nichtlineare, gekoppelte Differentialgleichungssystem

$$\underbrace{\sum_{k=1}^n M_{ik}(\mathbf{q}) \ddot{q}_k}_{\text{Trägheitskräfte}} + \underbrace{\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n C_{i,jk}(\mathbf{q}) \dot{q}_k \dot{q}_j}_{\text{Euler- und Corioliskräfte}} + \underbrace{g_i(\mathbf{q})}_{\text{Gravitationskräfte}} + \underbrace{Q_{Ri}(q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i)}_{\text{Reibungskräfte}} = \underbrace{Q_i}_{\text{Antriebskräfte}} \quad (2)$$

mit

$$\begin{aligned}
 & i = 1, 2, \dots, n \\
 & C_{i,jk} = \gamma_{i,jk} + \gamma_{i,kj} = 2 \gamma_{i,jk} \quad k > j \quad \text{und} \\
 & \gamma_{i,jk} \quad \text{Christoffel-Symbole 1. Art}
 \end{aligned}$$

In Gleichung (2) sind - wie ersichtlich - sämtliche Koeffizienten konfigurationsabhängig.

Das Ziel der Parameteridentifikation besteht darin, ausgehend von den Modellgleichungen (2), die in diesen Beziehungen auftretenden freien Parameter durch Modellabgleich mit dem Experiment anzupassen. Dazu wird im folgenden ein einfaches Least-Square-Verfahren eingesetzt, dessen Idee darin besteht, die Basisparameter zu benutzen und damit ein lineares Schätzproblem zu formulieren.

Ausgehend von diesen Überlegungen werden die Gelenkreibung und -dämpfung als lineare Funktionen mit unbekanntem Parametern angesetzt (Seeger, 1992; Hölzl, 1994; Armstrong, 1988).

$$Q_{Ri} = p_{ri} \text{sign}(\dot{q}_i) + p_{di} \dot{q}_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

mit den zu identifizierenden Koeffizienten  $p_{ri}$  und  $p_{di}$  für die Coulombsche Reibung bzw. viskose Dämpfung. Es gelingt damit, die Gleichungen (2) in die geforderte parameterlineare Form (Isermann, 1993) zu bringen, also

$$A(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \mathbf{p} = \mathbf{Q} \quad (4)$$

Darin bezeichnet  $\mathbf{p}$  den Vektor der Basisparameter, die Matrix  $A$  ergibt sich aus der Struktur von Gleichung (1) und hängt von den Gelenkwinkeln, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen ab. Für einen Roboter mit drei

rotatorischen Freiheitsgraden ist diese Umformung noch mit vertretbarem Aufwand 'von Hand' durchführbar. Bei komplexeren Systemen empfiehlt sich die Benutzung eines Formelmanipulationsprogrammes.

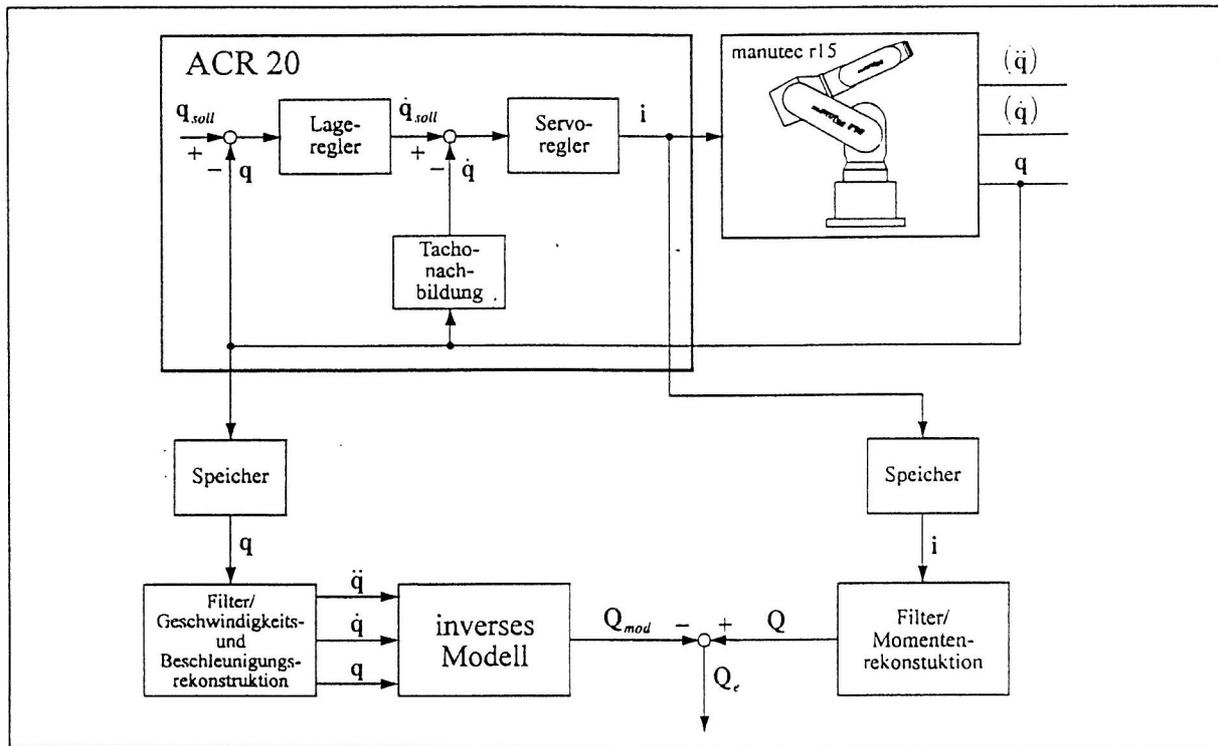


Bild 2. Meßaufbau zur Parameteridentifikation

Es können nun entlang einer Bahn Meßwerte aufgenommen werden und für  $N$  Messungen die dazugehörigen Gleichungen (4) zu der Gesamtgleichung

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Q}(1) \\ \vdots \\ \mathbf{Q}(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}(1) \\ \vdots \\ \mathbf{A}(N) \end{bmatrix} \mathbf{p} + \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_e(1) \\ \vdots \\ \mathbf{Q}_e(N) \end{bmatrix} \quad (5)$$

zusammengesetzt werden. Dabei ist  $N > \dim(\mathbf{p})$ , und es wurde zur Vereinfachung der Schreibweise

$$\mathbf{A}(i) = \mathbf{A}(\mathbf{q}(t_i), \dot{\mathbf{q}}(t_i), \ddot{\mathbf{q}}(t_i)) \quad \text{mit } i = 1, 2, \dots, N$$

gesetzt. An die Wahl der Zeitpunkte  $t_i$  bestehen zunächst noch keine Anforderungen, so daß die Auswahl der in Gleichung (5) eingehenden Messungen nach noch zu bestimmenden Kriterien erfolgen kann.

Die Minimierung des Fehlerquadrates von Gleichung (5)

$$\|\mathbf{e}\|^2 \rightarrow \min_{\mathbf{p}} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\partial \|\mathbf{e}\|^2}{\partial \mathbf{p}} = 0 \quad (6)$$

führt auf die bekannten Normalgleichungen

$$\hat{\mathbf{p}} = (\boldsymbol{\Psi}^T \boldsymbol{\Psi})^{-1} \boldsymbol{\Psi}^T \boldsymbol{\tau} \quad (7)$$

aus denen der Schätzwert  $\hat{\mathbf{p}}$  nach der nichtrekursiven Least-Square-Methode ermittelt werden kann. Der Meßaufbau für die Identifikation ist in Bild 2 enthalten.

Es ist zu beachten, daß das Least-Square-Verfahren nur dann biasfreie Schätzwerte liefern kann, wenn

- die Eingangsgrößen exakt bekannt sind

- die stochastischen Störeinflüsse zentriert sind
- die Eingangsgrößen und Störgrößen unkorreliert sind

Diese Voraussetzungen sind in den meisten Fällen nicht erfüllt. Die Ergebnisse in Abschnitt 4 zeigen aber die praktische Brauchbarkeit der Vorgehensweise.

Für den Erfolg der Least-Square-Schätzung in einem Schritt ist die Wahl der Testbewegung von großer Bedeutung. Allgemein kann festgestellt werden, daß die Testbewegung die Anregung aller zu identifizierenden Parameter gewährleisten muß. Ein Maß für die gleichmäßige Anregung ist die Konditionszahl  $\kappa$ , die sich aus den Eigenwerten  $\sigma$  von  $(\psi^T \psi)$  ergibt

$$\kappa = \text{cond}(\psi^T \psi) = \frac{\sigma_{\max}(\psi^T \psi)}{\sigma_{\min}(\psi^T \psi)} \quad (8)$$

### 3 Anwendung auf den Roboter manutec-r15

Die Anwendung des Identifikationsverfahrens wird beispielhaft für den Roboter manutec-r15 durchgeführt. Dazu werden zunächst die Kinematik beschrieben und die Bewegungsgleichungen in der allgemeinen Form angegeben. Anschließend werden diese in die geforderte parameterlineare Form gebracht. Die Messungen gehen dabei auf die Arbeit (Günther, 1995) zurück. Die Ergebnisse der Identifikation werden im nächsten Abschnitt vorgestellt.

Die Beschreibung der Kinematik erfolgt mit Hilfe der Denavit-Hartenberg-Notation. Es werden jedem Gelenkörper  $i$  ein körperfestes Koordinatensystem  $KS_i$  zugeordnet. Die Lage des folgenden Koordinatensystems  $KS_{i+1}$  ist dann durch vier sogenannte Denavit-Hartenberg-Parameter beschrieben. Die genaue Definition dieser Beschreibung kann Asada (1986) entnommen werden. Die Parameter für den manutec-r15

Achse $i$	1	2	3	4	5	6	
$\theta_i$	$-q_1$	$q_2$	$q_3 + \frac{\pi}{2}$	$-q_4$	$q_5$	$q_6$	$l_0 = 0,665 \text{ m}$
$d_i$	$l_0$	0	0	$l_2$	0	$l_3$	$l_1 = 0,500 \text{ m}$
$a_i$	0	$l_1$	0	0	0	0	mit $l_2 = 0,730 \text{ m}$
$\alpha_i$	$-\frac{\pi}{2}$	0	$\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	0	$l_3 = 0,0995 \text{ m}$

ergeben sich aus der Lage der verschiedenen Koordinatensysteme, die in den Maschinendaten des Roboters zu finden sind. Der Versatz von  $+\frac{1}{2}\pi$  für  $q_3$  sowie die negativen Vorzeichen für  $q_1$  und  $q_4$  bewirken, daß die Nullage des Systems mit der von der ACR20 definierten Nullage übereinstimmt. Damit ist die Kinematik des Roboters eindeutig beschrieben. Zu beachten ist dabei, daß durch diese Form der Benutzung der Denavit-Hartenberg-Notation der  $z$ -Vektor des 0-ten Koordinatensystems 'nach oben' weist. Somit lautet der Gravitationsvektor, definiert im Basiskoordinatensystem  $KS_0$ :

$$\mathbf{g} = [0, 0, -g]^T \quad \text{mit} \quad g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (9)$$

Während die kinematischen Größen bekannt sind, müssen zur Beschreibung der dynamischen Gleichungen einige, noch unbekannte Größen benannt werden. Dazu gehören für jeden Teilkörper  $i$  die Lagevektoren der Schwerpunkte  $\mathbf{r}_{ci}$ , die Massen  $m_i$  und die Trägheitstensoren  $\mathbf{J}_i^{(ci)}$ .

Eine wichtige Vereinfachung für die folgenden Betrachtungen besteht darin, daß nur die ersten drei Achsen des Roboters bei der Beschreibung der dynamischen Gleichungen und somit auch bei der Identifikation berücksichtigt werden. Dieses ist sinnvoll, da erstens die dynamischen Rückwirkungen der drei Handachsen auf die drei Grundachsen gering ist, und zweitens, die drei Grundachsen am stärksten zu Abweichungen des Endeffektors beitragen.

Aus Symmetriebetrachtungen können außerdem weitere Vereinfachungen der dynamischen Gleichungen vorgenommen werden, wodurch sich die Gleichungen ohne Genauigkeitsverlust erheblich verkürzen. Es zeigt sich, daß nur folgende Größen in die Bewegungsgleichung eingehen:

$m_2, m_3$	Masse der Teilkörper 2 und 3
$\mathbf{r}_{c2} = [r_{c2x}, 0, r_{c2z}]^T$	x- und z-Lage des Schwerpunktes von Teilkörper 2
$\mathbf{r}_{c3} = [0, 0, r_{c3z}]^T$	z-Lage des Schwerpunktes von Teilkörper 3
$J_{1yy}$	Massenträgheitsmoment von Achse 1 um seine y-Achse
$\mathbf{J}_2^{(c2)} = \text{diag}(J_{2xx}, J_{2yy}, J_{2zz})$	Diagonalelemente des Trägheitstensors von Achse 2
$\mathbf{J}_3^{(c3)} = \text{diag}(J_{3xx}, J_{3yy}, J_{3zz})$	Diagonalelemente des Trägheitstensors von Achse 3

Die Bewegungsgleichungen für den manutec-r15 lauten dann in der üblichen Schreibweise:

$$\begin{aligned}
Q_1 &= M_{11}\ddot{q}_1 + M_{12}\ddot{q}_2 + C_{1,12}\dot{q}_1\dot{q}_2 + C_{1,13}\dot{q}_1\dot{q}_3 + C_{1,22}\dot{q}_2^2 \\
Q_2 &= M_{12}\ddot{q}_1 + M_{22}\ddot{q}_2 + M_{23}\ddot{q}_3 + C_{2,11}\dot{q}_1^2 + C_{2,23}\dot{q}_2\dot{q}_3 + C_{2,33}\dot{q}_3^2 + g_2 \\
Q_3 &= M_{23}\ddot{q}_2 + M_{33}\ddot{q}_3 + C_{3,11}\dot{q}_1^2 + C_{3,22}\dot{q}_2^2 + g_3
\end{aligned} \tag{10}$$

mit den Abkürzungen

$$\begin{aligned}
M_{11} &= k_{A1}^2 J_{A1} + J_{1yy} + m_2 r_{c2z}^2 + s_2^2 J_{2xx} + c_2^2 (J_{2yy} + m_3 l_1^2 + m_2 (r_{c2x} + l_1)^2) \\
&\quad + c_{23}^2 (J_{3xx} + m_3 r_{c3z}^2) + s_{23}^2 J_{3zz} + 2c_2 c_{23} m_3 l_1 r_{c3z} \\
M_{22} &= k_{A2}^2 J_{A2} + J_{2zz} + J_{3yy} + m_2 (r_{c2x} + l_1)^2 + m_3 (r_{c3z}^2 + l_1^2) + 2c_3 m_3 l_1 r_{c3z} \\
M_{33} &= k_{A3}^2 J_{A3} + J_{3yy} + m_3 r_{c3z}^2 \\
M_{12} &= -s_2 m_2 (r_{c2x} + l_1) r_{c2z} \\
M_{23} &= k_{A3} J_{A3} + J_{3yy} + m_3 r_{c3z}^2 + c_3 m_3 l_1 r_{c3z} \\
C_{1,12} &= 2s_2 c_2 (J_{2xx} - J_{2yy} - m_2 (r_{c2x} + l_1)^2 - m_3 l_1^2) + 2s_{23} c_{23} (J_{3zz} - J_{3xx} - m_3 r_{c3z}^2) \\
&\quad - 2(c_2 s_{23} + s_2 c_{23}) m_3 l_1 r_{c3z} \\
C_{1,13} &= 2s_{23} c_{23} (J_{3zz} - J_{3xx} - m_3 r_{c3z}^2) - 2c_2 s_{23} m_3 l_1 r_{c3z} \\
C_{1,22} &= -c_2 m_2 (r_{c2x} + l_1) r_{c2z} \\
C_{2,23} &= -2s_3 m_3 l_1 r_{c3z} \\
C_{2,11} &= -\frac{1}{2} C_{1,12} \\
C_{2,33} &= \frac{1}{2} C_{2,23} \\
C_{3,11} &= -\frac{1}{2} C_{1,13} \\
C_{3,22} &= -C_{2,33} \\
g_2 &= -c_2 g (m_2 (r_{c2x} + l_1) + m_3 l_1) - c_{23} g m_3 r_{c3z} \\
g_3 &= -c_{23} g m_3 r_{c3z}
\end{aligned}$$

Es wurden hierbei die in der Robotertechnik üblichen Abkürzungen  $s_i := \sin(q_i)$ ,  $c_i := \cos(q_i)$ ,  $s_{ij} := \sin(q_i + q_j)$  und  $c_{ij} := \cos(q_i + q_j)$  verwendet. Die Größen  $k_{Ai}$  bezeichnen die Getriebeübersetzung und  $J_{Ai}$  das Massenträgheitsmoment des antreibenden Motors jeden Gelenkes  $i$ , das somit direkt dem Massenträgheitsmoment des Arms zugeschlagen wird. Dieses entspricht der Modellvorstellung eines nichtelastischen Getriebes, so daß später bei der Identifikationsbewegung eine Anregung dieser Effekte vermieden werden muß. Da die Wirkung der elastischen Getriebe für jedes Gelenk von den anderen Gelenken entkoppelt werden kann, empfiehlt es sich, bei Bedarf eine lokale Identifikation auf Gelenkebene durchzuführen.

Durch eine Reihe von Umformungen kann Gleichung (10) aufgespalten werden in den Parametervektor  $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_9]^T$  mit

$$\begin{aligned}
p_1 &= k_{A1}^2 J_{A1} + J_{1yy} + m_2 r_{c2z}^2 + J_{2xx} + J_{3zz} \\
p_2 &= m_2 (l_1 + r_{c2x})^2 + J_{2yy} + m_3 l_1^2 - J_{2xx} \\
p_3 &= m_3 r_{c3z}^2 + J_{3xx} - J_{3zz} \\
p_4 &= m_3 l_1 r_{c3z} \\
p_5 &= m_2 (l_1 + r_{c2x}) r_{c2z} \\
p_6 &= k_{A2}^2 J_{A2} + J_{2zz} + m_2 (l_1 + r_{c2x})^2 + m_3 l_1^2 \\
p_7 &= m_3 r_{c3z}^2 + J_{3yy} \\
p_8 &= m_2 (l_1 + r_{c2x}) + m_3 l_1 \\
p_9 &= k_{A3}^2 J_{A3}
\end{aligned} \tag{11}$$

und die Matrix **A** (hier in transponierter Darstellung)

$$\mathbf{A}^T = \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 & 0 & 0 \\ c_2(c_2\ddot{q}_1 - 2s_2\dot{q}_1\dot{q}_2) & s_2c_2\dot{q}_1^2 & 0 \\ c_{23}(c_{23}\ddot{q}_1 - 2s_{23}\dot{q}_1(\dot{q}_2 + \dot{q}_3)) & s_{23}c_{23}\dot{q}_1^2 & s_{23}c_{23}\dot{q}_1^2 \\ \begin{pmatrix} -2s_2c_{23}\dot{q}_1\dot{q}_2 + 2c_2(c_{23}\ddot{q}_1) \\ -s_{23}\dot{q}_1(\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} (c_2s_{23} + s_2c_{23})\dot{q}_1^2 \\ -s_3(2\dot{q}_2 + \dot{q}_3)\dot{q}_3 \\ +c_3(2\ddot{q}_2 + \ddot{q}_3) - \frac{g}{l_1}c_{23} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} c_3\ddot{q}_2 + c_2s_{23}\dot{q}_1^2 \\ +s_3\dot{q}_2^2 + \frac{g}{l_1}c_{23} \end{pmatrix} \\ -c_2\dot{q}_2^2 - s_2\ddot{q}_2 & -s_2\ddot{q}_1 & 0 \\ 0 & \ddot{q}_2 & 0 \\ 0 & \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 & \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3 \\ 0 & -c_2g & 0 \\ 0 & \frac{\ddot{q}_3}{k_{A3}} & \frac{\ddot{q}_2}{k_{A3}} + \ddot{q}_3 \end{bmatrix} \tag{12}$$

Mit den Gleichungen (11) und (12) ist die Beschreibung des reinen Starrkörpermodells des manutec-r15 gelungen, die der parameterlinearen Form (4) entspricht. Die Erweiterung um ein einfaches Reibmodell nach Gleichung (3) geschieht dadurch, daß dem Parametervektor **p** sechs weitere Elemente

$$\begin{aligned}
p_{10} &= p_{a1} & p_{11} &= p_{a2} & p_{12} &= p_{a3} \\
p_{13} &= p_{r1} & p_{14} &= p_{r2} & p_{15} &= p_{r3}
\end{aligned} \tag{13}$$

und der Matrix **A** sechs weitere Spalten

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 & 0 & 0 & \text{sign}(\dot{q}_1) & 0 & 0 \\ 0 & \dot{q}_2 & 0 & 0 & \text{sign}(\dot{q}_2) & 0 \\ 0 & 0 & \dot{q}_3 & 0 & 0 & \text{sign}(\dot{q}_3) \end{bmatrix} \tag{14}$$

angefügt werden.

Zur Identifikation müssen noch die Lagen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Gelenke entlang einer Trajektorie ermittelt werden. Da das Produkt  $\psi^T \psi$  die Dimension  $m \times m$  mit  $m = \dim(\mathbf{p})$  besitzt, stellt auch die Matrixinversion in Gleichung (7) kein Problem dar.

Im nächsten Abschnitt werden auf diese Weise verschiedene Reibmodelle untersucht. Dabei wird durch die Indizierung des Parametervektors das benutzte Modell beschrieben:

<b>p</b>	Starrkörpermodell mit verlustlosen Lagern	$\dim(\mathbf{p}) = 9$
<b>p<sub>d</sub></b>	Modell mit viskoser Dämpfung	$\dim(\mathbf{p}_d) = 12$
<b>p<sub>r</sub></b>	Modell mit Coulombscher Reibung	$\dim(\mathbf{p}_r) = 12$
<b>p<sub>rd</sub></b>	Modell mit viskoser Dämpfung und Coulombscher Reibung	$\dim(\mathbf{p}_{rd}) = 15$

#### 4 Hardwareaufbau und Ergebnisse

Die im folgenden beschriebenen Messungen und Auswertungen wurden an einem Standardroboter mit handelsüblicher Steuerung durchgeführt. Diese Konfiguration ist um einen Prozeßrechner der Firma dSPACE, basierend auf dem Digital-Signal-Prozessor TMS-320c40, erweitert. Mit ihm können in die Lageregelung des Roboters eingegriffen und rechenintensive Algorithmen direkt implementiert werden. Dabei bleiben die Bahnplanungs- und insbesondere die Sicherheitsfunktionen der ACR20 voll aktiv. Im vorliegenden Fall wurden allerdings vom Prozeßrechner nur Meßwerte aufgenommen und nicht in die bestehenden Kaskaden-Lage-Regelung eingegriffen.

Die Programmentwicklung für den Prozeßrechner geschieht blockschaltbildorientiert unter SIMULINK, mit dem automatisch der C-Code für den Prozeßrechner generiert wird. Der Zugriff auf den Prozeßrechner während der Regelung geschieht mit den grafisch orientierten Programmen COCKPIT und TRACE. Die Nacharbeitung der Messungen erfolgt mit MATLAB. Durch diese leistungsfähige Arbeitsumgebung ist der Anwender von der Aufgabe der Programmierung in Sprachen wie C oder FORTRAN entbunden. Bild 3 zeigt eine schematische Darstellung dieser Konfiguration.

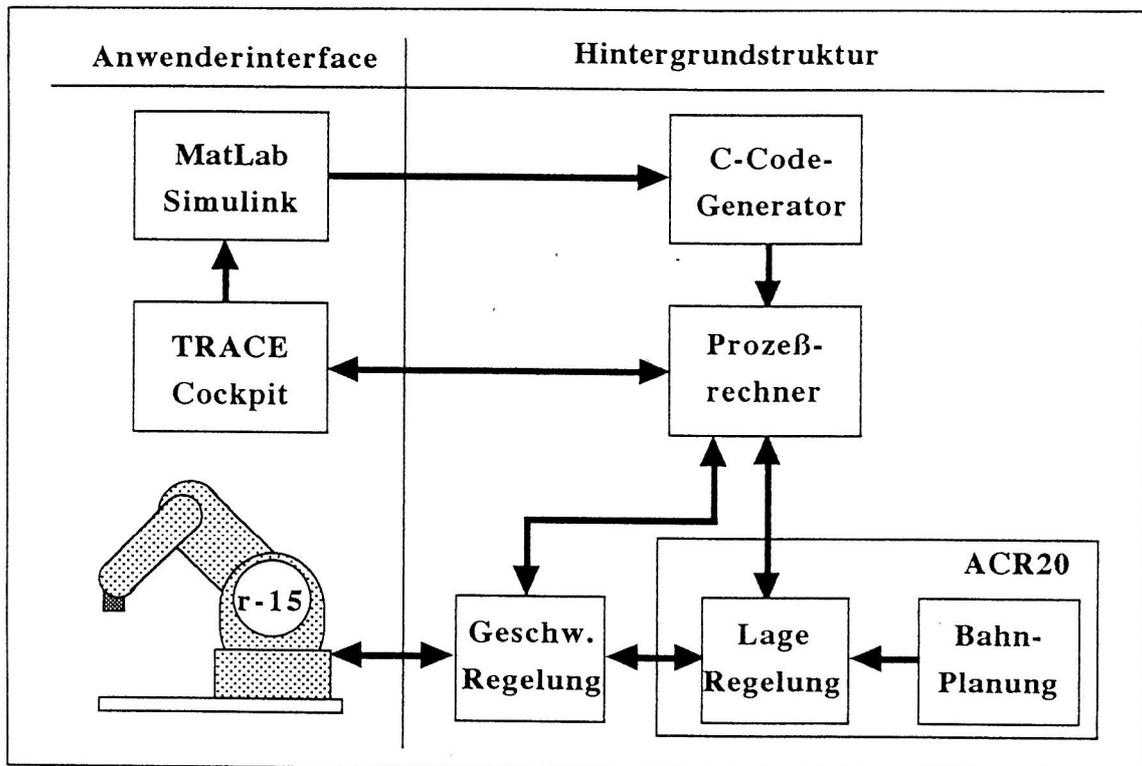


Bild 3. Struktur der Programmierung

Wie bereits erwähnt, spielt die Bahnplanung bei dem Identifikationsverfahren eine entscheidende Rolle. Sie muß einen möglichst großen Bereich von Lagen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen überstreichen, um Informationen über alle zu identifizierenden Parameter zu erhalten. Grundsätzlich können auch einzelne Abschnitte aus verschiedenen Messungen zu einer Meßmatrix  $\psi$  zusammengefaßt werden. Um mit möglichst wenigen Messungen auszukommen, wurde davon nicht Gebrauch gemacht. Für die hier dargestellte Identifikation wurde eine Bahn gewählt, in der mehrere PTP-Bewegungen ineinander übergeschliffen werden, so daß ein großer Arbeitsraum mit ausgeprägten Beschleunigungs- und Bremsphasen abgedeckt wird. Diese Bahn wurde gewählt, weil sie eine relativ niedrige Kondition (8) aufweist. Die Anregung der unerwünschten Getriebschwingungen wurde dadurch vermieden, daß die in der ACR-20 vorhandene Ruckbegrenzung aktiviert wurde. Den Verlauf dieser Bahn und die dazugehörigen Momentenverläufe für alle Achsen zeigt Bild 4. Die tatsächlich gemessenen Größen sind dabei die Lagen, die über die Inkrementalgeber des manutec r-15 (2400 Inkr/U) ermittelt werden und die Motormomente, die durch Messung der Motorenströme berechnet werden. Beide Signale sind mit einem phasenneutralen Butterworth-Tiefpaß 4. Ordnung mit 10 Hz Eckfrequenz gefiltert. Geschwindigkeit und Beschleunigung ergeben sich aus der Differenzierung des gefilterten Lagesignals. Die Wahl des Filters und die numerische Differentiation des Lagesignals sind bei der off-line Identifikation relativ unproblematisch, da zur Rechenzeit die Meßinformationen für den gesamten Meßzeitraum vorliegen.

Wie in Bild 4 weiterhin zu erkennen ist, sind die Momentenverläufe normiert. Dieses ist notwendig, um bei der Identifikation eine gleichmäßige Wichtung aller Achsen zu erreichen. Die absoluten Beträge der Momente an den Motoren sind wegen der unterschiedlichen Getriebe ebenfalls sehr unterschiedlich. Aus den Messungen lassen sich schließlich die verschiedenen Parametervektoren identifizieren:

	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$	$p_6$	$p_7$	$p_8$	$p_9$	$p_{10}$	$p_{11}$	$p_{12}$	$p_{13}$	$p_{14}$	$p_{15}$
$\mathbf{p}$	14,4	21,7	8,3	7,1	3,3	57,2	8,1	42,9	9,4	-	-	-	-	-	-
$\mathbf{p}_d$	14,4	21,7	8,3	7,1	3,3	57,2	8,1	42,9	9,4	77,1	322,4	52,1	-	-	-
$\mathbf{p}_r$	14,4	22,0	8,3	7,1	3,3	56,8	8,0	43,0	9,5	-	-	-	105,7	242,9	60,7
$\mathbf{p}_{rd}$	14,4	21,9	8,3	7,1	3,3	57,0	8,1	43,0	9,5	31,1	167,9	20,9	72,5	134,4	43,4

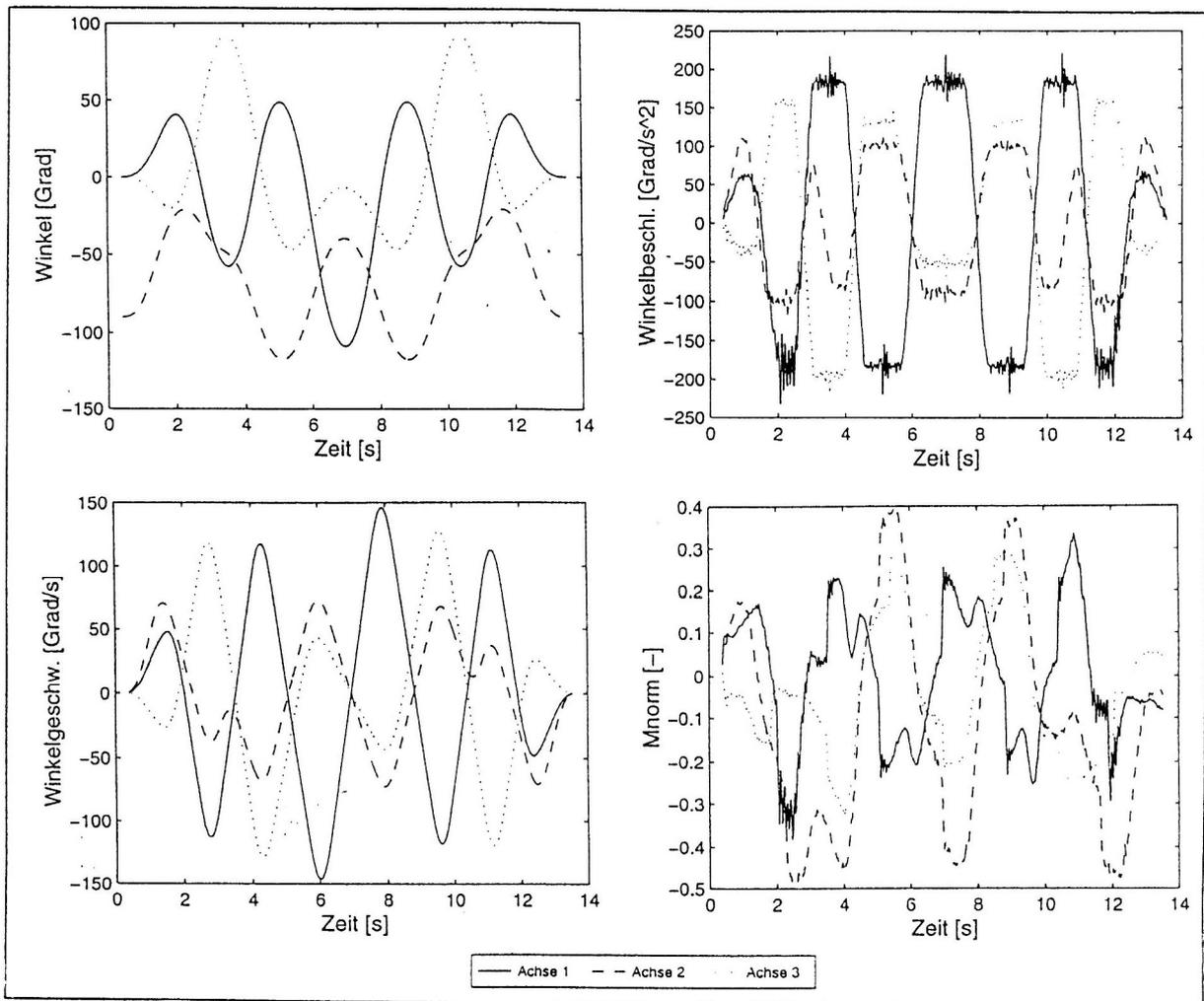


Bild 4. Trajektorien- und Momentenverläufe der Identifikationsbewegung

Die Beurteilung der identifizierten Parameter erfolgt dadurch, daß mit den gemessenen Gelenkvariablen und dem identifizierten Modell die Gelenkmomente berechnet werden. Diese werden mit den tatsächlich gemessenen Momenten verglichen. In Bild 5 sind diese Messungen zusammengestellt. Es ist zu erkennen, daß das reine Starrkörpermodell die gemessenen Momentenverläufe näherungsweise wiedergeben kann. Die Hinzunahme von Termen mit viskoser Dämpfung oder Coulombscher Reibung stellt offensichtlich eine erhebliche Modellverbesserung dar, während bei Berücksichtigung beider Einflüsse praktisch keine Abweichung zwischen Messung und Modellierung zu erkennen ist.

Ein weiterer wichtiger Vergleich besteht darin, mit den identifizierten Parametern die Momentenverläufe einer anderen (als der zur Identifikation herangezogenen) Bewegung zu modellieren. Es wurde dazu eine Bahn programmiert, die sich von der ersten erheblich unterscheidet, indem sehr viel 'weichere' Bewegungen in einem kleineren Arbeitsraum durchfahren werden. Der Vergleich der dabei gemessenen Momentenverläufe und der mit den oben gewonnenen Modellparametern berechneten Momente ist in Bild 6 dargestellt. Wie nicht anders zu erwarten, bestehen hier natürlich erheblich größere Abweichungen zwischen Modellrechnung und Messung. Das reine Starrkörpermodell versagt, auch die Hinzunahme der viskosen Dämpfung liefert nicht ausreichende

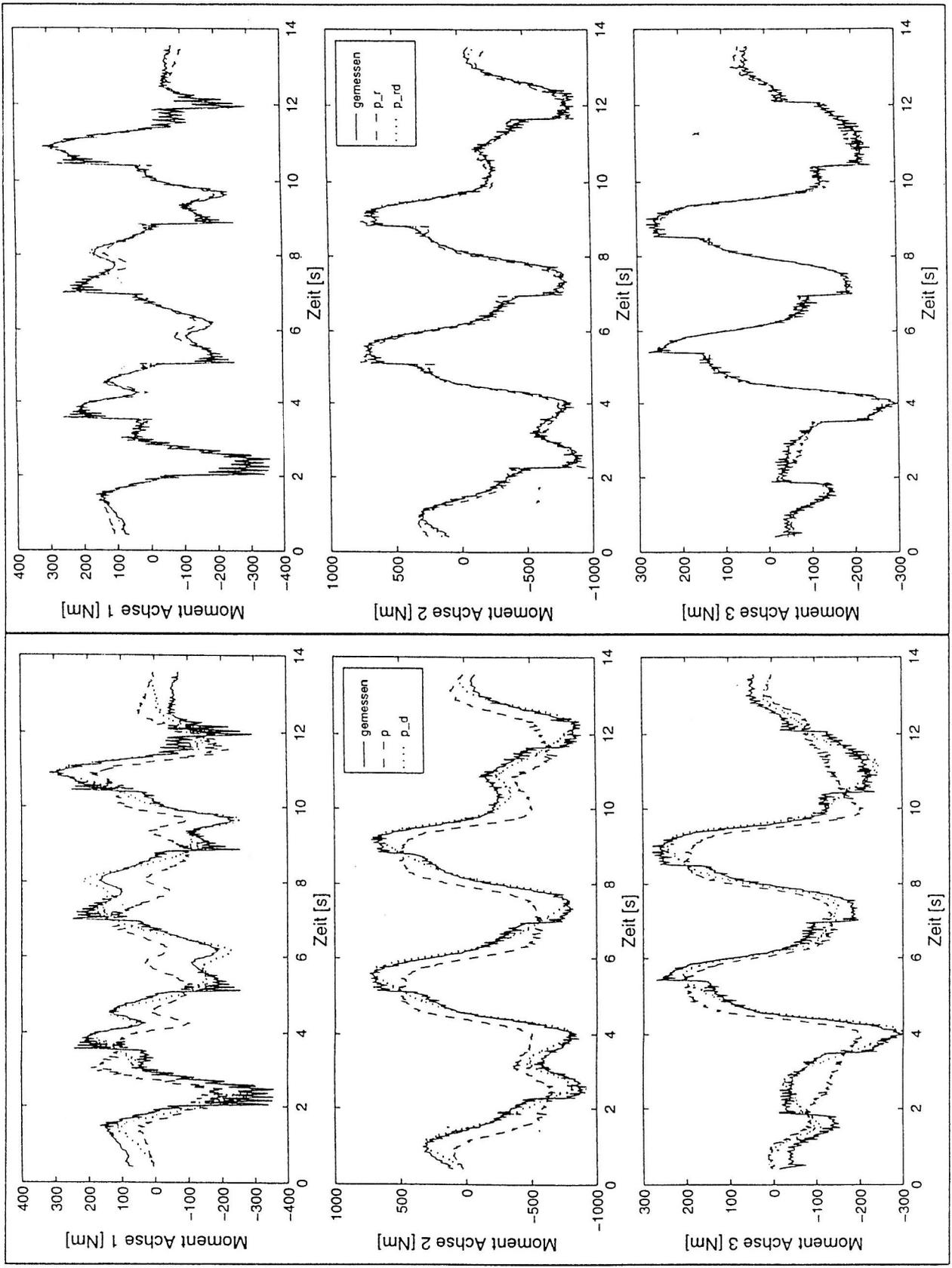


Bild 5. Vergleich von gemessenen und berechneten Momenten mit unterschiedlichen Reibungs- und Dämpfungsmodellen

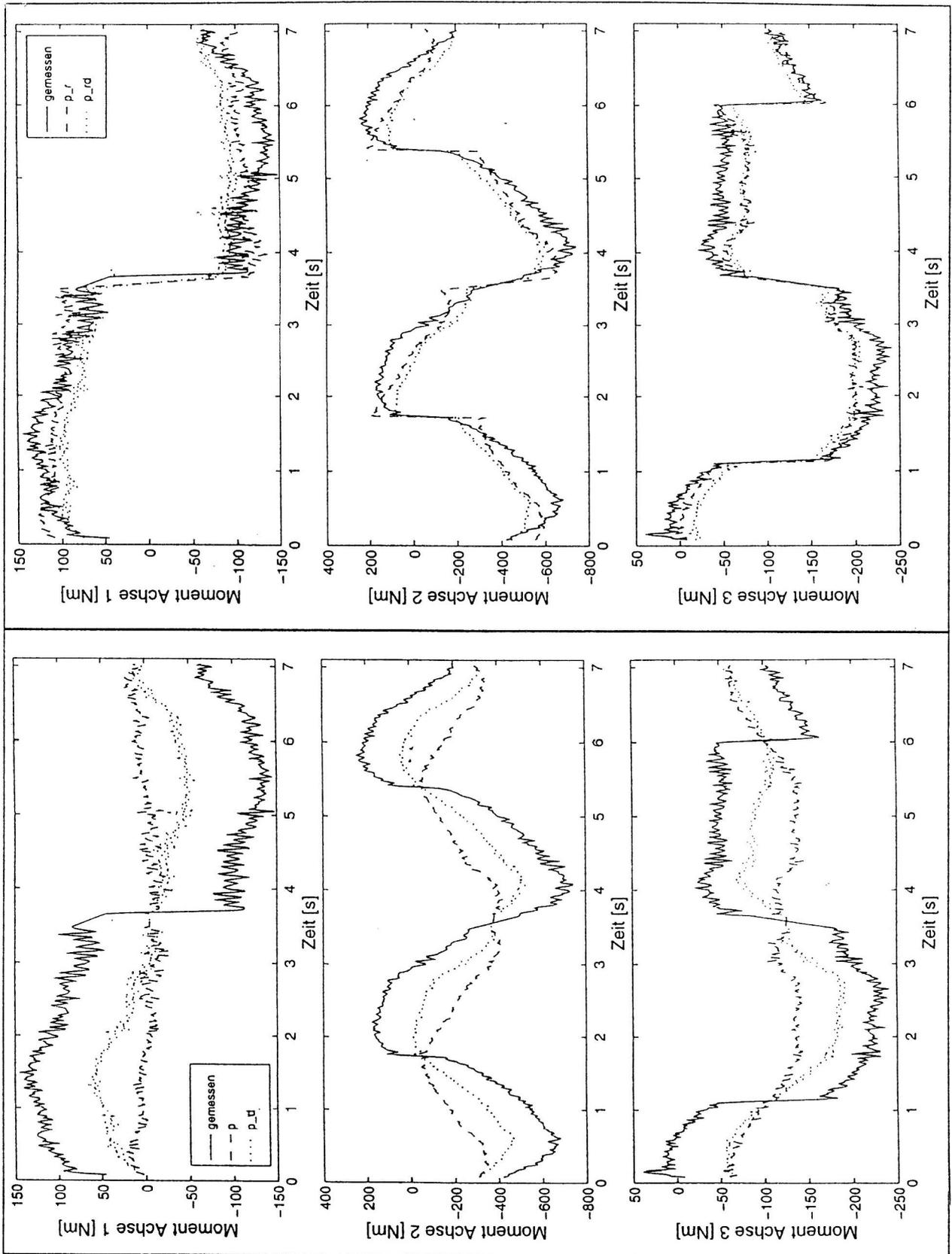


Bild 6. Anwendung der identifizierten Modelle von Bild 5 auf eine andere Bahn

Ergebnisse. Erst durch die Berücksichtigung Coulombscher Reibung kann eine relativ gute Rekonstruktion der Momente erreicht werden.

## 5 Zusammenfassung

Mit dem vorgestellten Verfahren ist es möglich, mit sehr geringem Aufwand Modelle für relativ komplexe mechanische Systeme zu identifizieren. Dieses wurde am Beispiel der ersten drei Achsen des manutec-r15 Roboters beschrieben. Als Messungen standen dabei nur die Lagesignale sowie die Stromsignale der Motoren zur Verfügung. Da das Verfahren off-line benutzt wurde, entstanden keine Phasenprobleme bei der Berechnung der benötigten Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe.

Für den untersuchten Roboter hat sich gezeigt, daß die Wahl eines geeigneten Reibmodells einen wichtigen Einfluß auf die Ergebnisse hat. Das hier benutzte einfache Modell mit einem geschwindigkeitsproportionalen und einem Coulombschen Anteil liefert schon sehr zufriedenstellende Ergebnisse, ist aber mit Sicherheit noch ausbaubar, z.B. durch richtungsabhängige Reibmodelle.

Ein weiterer wichtiger Aspekt besteht in der Wahl der zugrunde liegenden Messungen - also der gewählten Trajektorie. Es können letztendlich nur Parameter identifiziert werden, deren Einfluß auch in die Messungen eingegangen ist.

## Literatur

1. Armstrong, B.S.R.: Dynamics for Robot Control: Friction Modeling and Ensuring Excitation During Parameter Identification, Diss. Stanford CA USA, 1988.
2. Asada, H.; Slotine, J.-J. E.: Robot Analysis and Control, J. Wiley and Sons, New York, 1986.
3. Günther, G.: Automatische Identifikation eines dynamischen Modells für den Roboter manutec-r15, Diplomarbeit, Institut für Mechanik, Universität Hannover, 1995.
4. Hölzl, J.: Modellierung, Identifikation und Simulation der Dynamik von Industrierobotern, VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 8, Nr. 372, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994.
5. Isermann, R.: Identifikation dynamischer Systeme, Band 2, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1993.
6. Seeger, G.: Selbsteinstellende, modellgestützte Regelung eines Industrieroboters, Fortschritte der Robotik, Bd. 13, Vieweg, Wiesbaden, 1992.

---

*Anschrift:* Prof. Dr.-Ing. habil. Bodo Heimann und Dipl.-Ing. Manutschehr Daemi, M.Sc.(USA), Institut für Mechanik, Universität Hannover, Appelstr. 11, 30169 Hannover