

# DYNAMISCHE PROBLEME AN ROBOTERN

E. JUST

Technische Hochschule Ilmenau,  
Sektion Gerätetechnik, DDR

Eingegangen am 30. September 1986  
Vorgelegt von Prof. Dr. O. Petrik

## Abstract

This paper concerns with different dynamic problems of robots. Dynamic quantities and characteristics of the quality are shown. Vibration and oscillation are discussed with mathematical methods. Models, methods for the solution of this problems and the numerical computation are given for the cases of 8 robots with 3 elements.

## Einleitung

### Situation

In der DDR waren Ende 1985 ca. 50 000 prozeßspezifische und prozeßflexible Roboter im Einsatz in den Gebieten Maschinen- und Fahrzeugbau, Feinmechanik/Optik, Elektrotechnik/Elektronik und Bautechnik. Sie haben einen hohen Anteil an der Automatisierung von Fertigungsprozessen in der Industrie.

Die Antriebe sind elektrisch, hydraulisch oder pneumatisch. Etwa 70% der Roboter haben 3 Elemente (*Abb. 1*). Der Arbeitsraum ist ein Quader bei

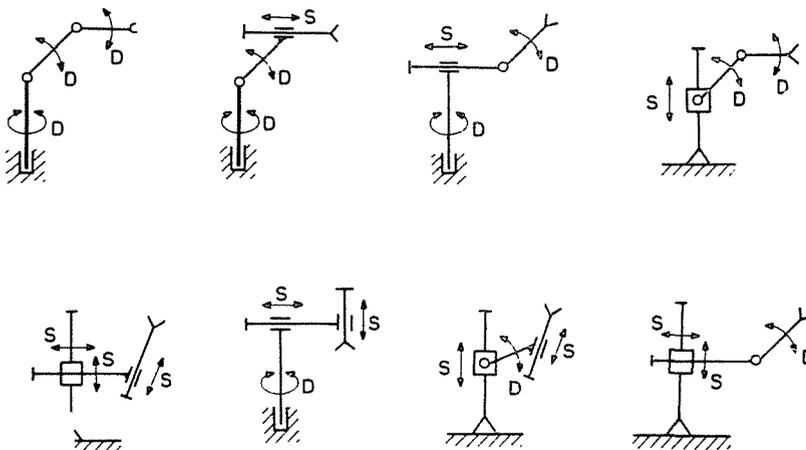


Abb. 1

SSS-Struktur bzw. eine Kugel bei DDD-Struktur (S=Schubgelenk, D=Drehgelenk). Abbildung 1 zeigt 8 mögliche Prinzipien. Der Anteil flexibler (frei programmierbarer) Roboter beträgt z. Z. noch weniger als 50%, wird aber in den nächsten Jahren 50% überschreiten. Die Systemzuverlässigkeit ist hoch (98%), jedoch bestehen — auch international — noch technische (und ökonomische) Probleme beim Robotereinsatz [1]. Hier sollen besonders die dynamischen Probleme genannt und Lösungen aufgezeigt werden.

### *Wissenschaftlich-technische Probleme*

Trotz des erreichten hohen Standes der Robotertechnik gibt es für bestimmte Einsatzfälle noch einige — vor allem dynamische — Probleme:

So sind im allgemeinen die Roboter noch recht langsam. Die Arbeitsgeschwindigkeiten (Transportgeschwindigkeiten am Greifer) betragen oft nur 0,5 m/s (bei Rotation  $\omega = 3$  rad/s). Technisch angestrebt werden 1 m/s und mehr (bei Rotation  $\omega = 6$  rad/s  $\approx 1$  Umdrehung/s).

Das Masse-Leistungs-Verhältnis ist teilweise noch ungünstig. Es beträgt für viele Roboter  $m_{\text{Last}}/m_{\text{Eigen}} = 1 : 100$  bis  $1 : 20$ : d. h. die Roboter sind zu schwer. Ziel ist es hier, ein Verhältnis von  $1 : 20$  bis  $1 : 10$  zu erreichen.

Für verschiedene Anwendungen in der Feinmechanik/Optik/Elektronik/Medizintechnik sind die Roboter zu ungenau. Die Positioniergenauigkeit (Wiederholgenauigkeit) liegt bei  $\Delta x = \pm 0,1$  mm. Verlangt werden 0,01 mm bis  $1 \mu\text{m}$ . Das erfordert Präzisionstechnik.

Schließlich müssen Roboter der 3. Generation mit Sensoren ausgerüstet werden, damit auch hier das „Fühlen, Sehen oder Hören“ technisch verwirklicht wird.

Zur entwickelten Robotertechnik gehören auch leistungsfähige Antriebe, moderne Steuerungen und eine gute Software.

### *Dynamische Größen an Robotern*

Zur Beurteilung der dynamischen Eigenschaften eines Roboters sind folgende dynamische Größen zu bestimmen:

- Massen und Massenträgheitsmomente der Elemente
- Steifigkeiten der Elemente und Gelenke
- Antriebskräfte und Antriebsmomente
- Gelenkkräfte und Gelenkmomente
- Greiferkräfte und Greifermomente
- Geschwindigkeiten und Winkelgeschwindigkeiten
- Beschleunigungen und Winkelbeschleunigungen
- Positionier- oder Wiederholgenauigkeit
- Schwingungen (Frequenzen, Amplituden und Dämpfung)
- Taktzeit.

### *Bewertungskriterien für Roboter*

Zur technischen Bewertung und für den Vergleich von Robotern können folgende Kriterien herangezogen werden:

- Arbeitsraum, Stellfläche, Einbaulage
- Struktur, Beweglichkeit, Freiheitsgrad
- *Traglast (Nutzmasse/Eigenmasse)*
- *Geschwindigkeit, Beschleunigung*
- *Wiederholgenauigkeit (Positioniergenauigkeit)*
- *Schwingungsverhalten*
- *Wartung/Betriebsverhalten/Zuverlässigkeit/Sicherheit*
- Energieverbrauch für die Antriebe
- zeit- oder energieoptimale Bewegung
- Bedienungs- und Steuerungskomfort
- Baukasten- bzw. modulare Bauweise
- Integrationsfähigkeit, Flexibilität
- Lebensdauer und Kosten.

Von diesen Kriterien sind die 4 unterstrichenen für die Beurteilung des dynamischen Verhalten eines Roboters besonders wichtig. Wenn die Roboter schneller, leichter und genauer werden sollen, dann müssen in der Entwicklungsphase vorausberechnet, der Leichtbau angewendet, die Zulieferbaugruppen (Motoren, Getriebe, Meßsysteme, Steuerungen) in hoher Qualität zur Verfügung gestellt und eine präzise Fertigung garantiert werden. In vielen Fällen werden auch noch Messungen an einem Funktionsmuster notwendig, um Steifigkeiten, Ausschwingverhalten und Wiederholgenauigkeit exakter oder sicherer bestimmen zu können.

### **Berechnungen**

#### *Vorbemerkung*

In diesem Beitrag soll die Berechnung von Schwingungen an Robotern betont werden. Sie sind einerseits wichtig als dynamisches Kriterium, andererseits werden sie als schwieriges Gebiet in der Fachliteratur für Roboter kaum behandelt. Schwingungen an Robotern entstehen

- durch innere Erregungen (Antriebe)
- durch die Fahrweise (Anfahren, Bremsen)
- durch äußere Erregungen (Erschütterungen).

Die Grundlagen zur Berechnung von Schwingungen an Robotern sind in [2] dargelegt. Unter Anleitung des Verfassers entstanden zu diesem Gebiet die Arbeiten



### *Eingabewerte*

Vom Entwurf des Roboters bzw. von einem Funktionsmuster werden folgende Größen bestimmt, die als Eingabewerte zur Schwingungsberechnung dienen:

- Abmessungen und Schwerpunktkoordinaten aller Elemente in einem raumfesten Bezugssystem
- Gelenkkordinaten aller Gelenke in körperfesten Koordinaten
- Massen; Hauptträgheitsmomente und Deviationsmomente aller Elemente um je 3 Körperschwerachsen
- Federsteifigkeiten und Drehfedersteifigkeiten aller Gelenke in 3 Richtungen bzw. um 3 Achsen
- Erregerkräfte und Erregermomente infolge Antrieb und Schwingungen für alle Elemente
- Randbedingungen für Geschwindigkeiten und Winkelgeschwindigkeiten zwischen Element 0 (Gestell) und Element 1
- Randbedingungen für Kräfte und Momente am letzten Element (das den Greifer mit der Nutzlast trägt)
- Anfangsbedingungen für die Anfangsauslenkungen und für die Anfangsgeschwindigkeiten (auch Winkelgeschw.) aller Elemente.

### *Gesetze, Gleichungen und Berechnungsmethode*

Es kann mit den Grundgleichungen der Dynamik in systemtheoretischer Darstellung gearbeitet werden.

Der Impulssatz für jeden Körper ergibt 6 skalare Differentialgleichungen für translatorische Antriebs- und Schwingbewegungen; der Drehimpulssatz für jeden Körper liefert 6 skalare nichtlineare Dgl. für rotatorische Antriebs- und Schwingbewegungen. Die Federkräfte (Gelenkkräfte) zwischen 2 Körpern folgen aus 6 Dgl. für die zeitlichen Änderungen der Kräfte bei Antriebs- und Schwingbewegungen mit den Federkonstanten am Gelenk; die Federmomente (Gelenkmomente) zwischen 2 Körpern ergeben sich aus 6 Dgl. für die zeitlichen Änderungen der Momente bei Antriebs- und Schwingbewegungen mit den Drehfederkonstanten. Die Integration der Translationsgeschwindigkeiten ergibt die Wegauslenkungen; die Integration der Winkelgeschwindigkeiten ergibt die Winkelauslenkungen.

Nach der systemtheoretischen Berechnungsmethode wird mit Zustands- und Ausgangsgleichungen gerechnet. Für  $n=3$  Körper (Elemente) folgen  $3 \times 6 = 18$  Dgl. 2. Ordnung für Translation und Rotation der Antriebsbewegung und  $3 \times 6 = 18$  Dgl. 2. Ordnung für Translation und Rotation der Schwingbewegung. Beim Übergang zu Dgl. 1. Ordnung verdoppelt sich die Anzahl der Dgl. In jedem Falle handelt es sich um Systeme gekoppelter nichtlinearer Dgl.

### Numerische Berechnungen

Das System aus 36 Dgln. 1. Ordnung für die Antriebsbewegung und 36 Dgln. 1. Ordnung für die Schwingbewegung dreielementiger Roboter wurde in der Sprache PL/1 programmiert. Die Berechnungen erfolgten auf dem Robotron-Großrechner EC 1040 oder EC 1056 (Hauptspeicherkapazität 1 MByte). Als Rechenprogramm wurde das Programmsystem STIFDIF [6] der Akademie der Wissenschaften der DDR eingesetzt. Es ist geeignet zur numerischen Integration großer nichtlinearer Dgln.-Systeme bei Randwert- und Anfangswertaufgaben. Die CPU-Zeit/Job liegt im Minutenbereich, die Gesamtlaufzeit kann im Stundenbereich liegen (je nach Aufgabe). Die Ausgabe der Werte erfolgt in Tabellen oder als Printplotterbilder.

#### Ausgabewerte

Das Rechenprogramm STIFDIF berechnet die Ausgabewerte für alle Elemente bei freien und bei erzwungenen Schwingungen. Bei erzwungenen Schwingungen können verschiedene Erreger-Zeitfunktionen vorgegeben werden.

Bei Antriebsbewegung (A) und bei Schwingbewegung (S) ergeben sich als Zeitfunktionen

die Geschwindigkeiten	$(v_x, v_y, v_z)_A$	und	$(v_x, v_y, v_z)_S$
Winkelgeschwindigkeiten	$(w_x, w_y, w_z)_A$	und	$(w_x, w_y, w_z)_S$
die Gelenkkräfte	$(F_x, F_y, F_z)_A$	und	$(F_x, F_y, F_z)_S$
die Gelenkmomente	$(M_x, M_y, M_z)_A$	und	$(M_x, M_y, M_z)_S$
die Wegauslenkungen	$(s_x, s_y, s_z)_A$	und	$(s_x, s_y, s_z)_S$
Winkelauslenkungen	$(\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z)_A$	und	$(\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z)_S$

Die Eigenfrequenzen des Schwingungssystems „Roboter“ bei freien Schwingungen sind nach einer Fourier-Analyse (NSFT = nichtredundante schnelle Fourier-Transformation) erhältlich. Das Rechenprogramm NSFT kann direkt an das RP STIFDIF angeschlossen werden [7].

### Ergebnisse

Die numerischen Berechnungen wurden für 8 verschiedene Strukturen dreielementiger Roboter (SSS, SSD, SDS, DSS, SDD, DSD, DDS, DDD) in 3 Diplomarbeiten (DA) durchgeführt:

Seifert [3] berechnet freie ungedämpfte Schwingungen an Robotern ohne Antriebs- oder Transportbewegung in ca. 100 Jobs,

Bach [4] berechnet freie ungedämpfte Schwingungen an Robotern mit Antriebs- oder Transportbewegung in 38 Jobs,

Anh [5] analysiert mit dem Rechenprogramm NSFT die nichtlinearen Schwingungen und liefert für 61 ausgewählte Fälle die Eigenfrequenzen und die Fourier-Koeffizienten. In Einzelfällen wurden die Rechenwerte mit Meßwerten verglichen. Es zeigte sich befriedigende Übereinstimmung.

### *Freie ungedämpfte Schwingungen*

Es wurden vertieft untersucht die Klein-Roboter mit SSS-, DSS- und DDD-Struktur. Alle Zahlenwerte wurden vorgegeben; die verschiedenen Roboter haben vergleichbare Größen, Massen und Steifigkeiten. Es waren räumliche Schwingungen zugelassen (Freiheitsgrad 6/Element). Die Anfangsbedingungen bei  $t = 0$  betragen in allen Fällen: Alle  $v_s(0) = 0,1$  m/s und alle  $w_s(0) = 0,1$  rad/s.

*Roboter mit SSS-Struktur, siehe Abb. 3*

Abbildung 3a zeigt die Translations-Schwingungsgeschwindigkeiten in  $x$ -Richtung

$$v_{x1}(t), v_{x2}(t), v_{x3}(t),$$

Abbildung 3b zeigt die Translations-Schwingungsgeschwindigkeiten in  $y$ -Richtung

$$v_{y1}(t), v_{y2}(t), v_{y3}(t) \text{ und}$$

Abbildung 3c zeigt die Translations-Schwingungsgeschwindigkeiten in  $z$ -Richtung

$$v_{z1}(t), v_{z2}(t), v_{z3}(t).$$

Die Werte gelten für die Schwerpunkte der Elemente 1, 2 und 3 im Zeitbereich  $0 < t < 0,05$  s. Es sind nichtlineare Koppel-Schwingungen unterschiedlicher Frequenz.

*Roboter mit DSS-Struktur, siehe Abb. 4*

Abbildung 4.a zeigt die Rotations-Schwingungsgeschwindigkeiten um die  $x$ -Achse

$$w_{x1}(t), w_{x2}(t), w_{x3}(t),$$

Abbildung 4.b zeigt die Rotations-Schwingungsgeschwindigkeiten um die  $y$ -Achse

$$w_{y1}(t), w_{y2}(t), w_{y3}(t) \text{ und}$$

Abbildung 4.c zeigt die Rotations-Schwingungsgeschwindigkeiten um die  $z$ -Achse

$$w_{z1}(t), w_{z2}(t), w_{z3}(t).$$

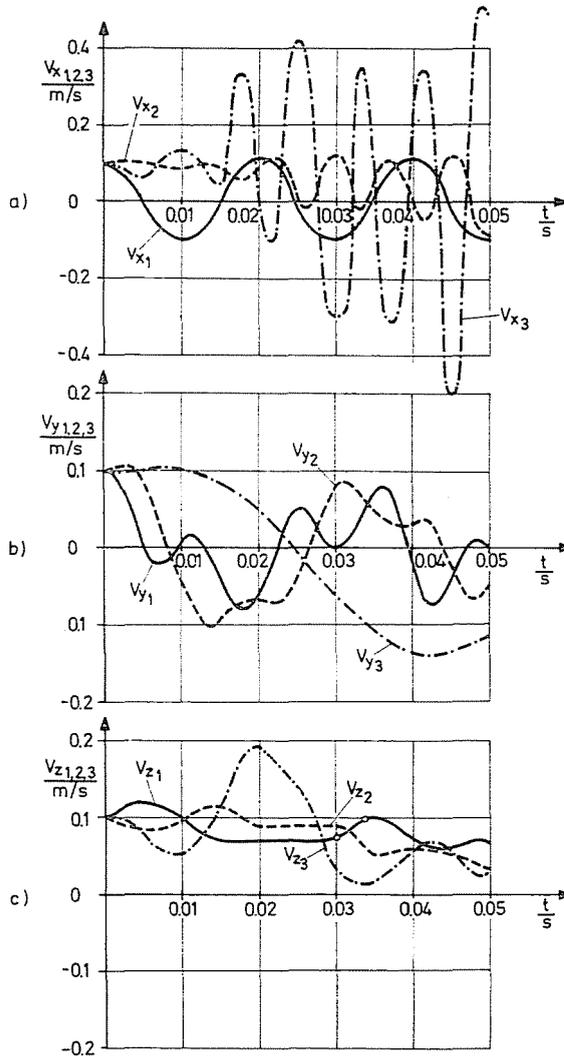


Abb. 3

Die Werte gelten für die Elemente 1, 2 und 3 für  $0 < t < 0,05$  s. Auch die Drehschwingungen sind nichtlinear.

### Eigenfrequenzen

Die Analyse mit dem Rechenprogramm NSFT [5] ergab  
 für SSS-Struktur:  $f_e = 50 \dots 8000$  Hz bei Translation,  
 für DSS-Struktur:  $f_e = 10 \dots 3000$  Hz bei Transl. und Rotation,  
 für DDD-Struktur:  $f_e = 16 \dots 2400$  Hz bei Rotation.

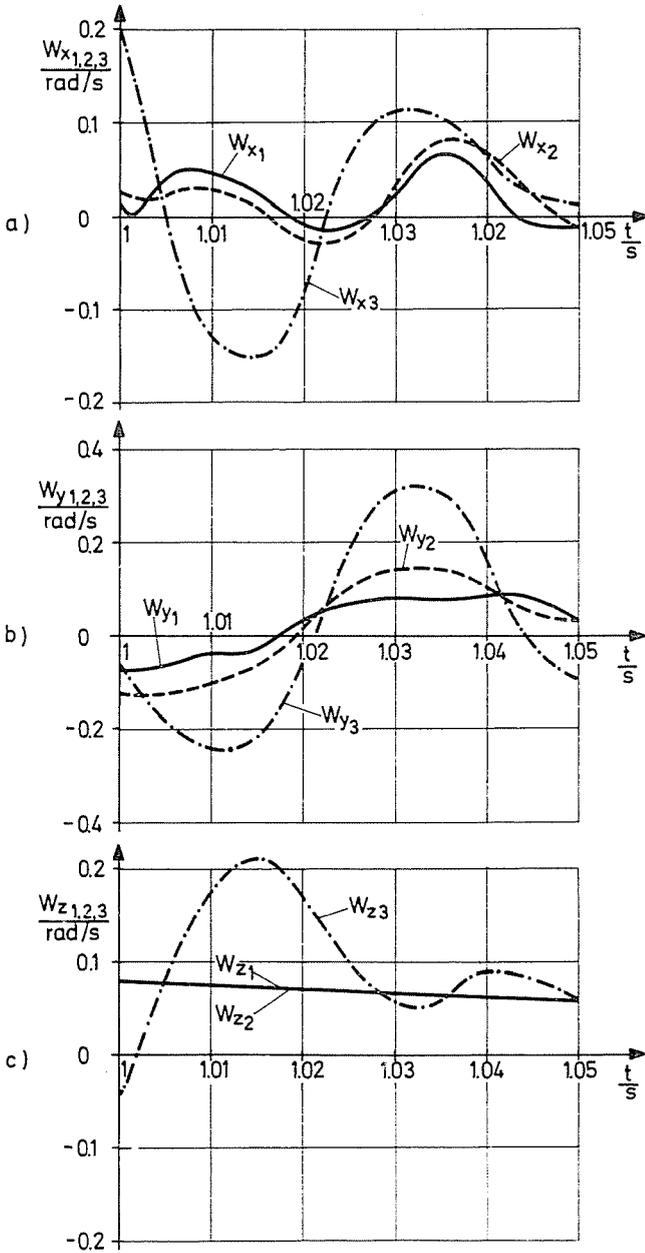


Abb. 4

Die Schwingungen mit den tiefen Frequenzen sind besonders zu beachten. Diese Frequenzen können durch höhere Steifigkeiten vergrößert und damit die Amplituden verkleinert werden.

### *Erzwungene ungedämpfte Schwingungen*

Hierfür liegen Berechnungsergebnisse vor für harmonische, periodische, lineare, sprungförmige bzw. stoßförmige Erregung durch Weg, Winkel, Kraft oder Moment.

### *Weitere Untersuchungen*

Weitere Berechnungen sind vorgesehen für gedämpfte Schwingungen an Robotern, für das Ausschwingverhalten und Schwingungen unter Beachtung der Elastizität (Nachgiebigkeit) der Elemente. Die Vergleiche mit Messungen werden erweitert. Anwendungen finden die Resultate bei Präzisionsrobotern.

### **Zusammenfassung**

Es wird über dynamische Probleme an Robotern berichtet. Dynamische Größen und Bewertungskriterien werden genannt. Den Schwerpunkt bilden Schwingungsberechnungen an Robotern. Modellbildung, Lösungsmethode und Ergebnisse numerischer Berechnungen an 8 unterschiedlichen Strukturen dreielementiger Roboter, die in 3 Diplomarbeiten untersucht wurden, werden mitgeteilt.

### **Literatur**

1. PÄBLER, E.: Stand und Ergebnisse der KDT-Initiativen bei der Durchsetzung der Industrierobotertechnik. Materialien des 1. Zentralen Roboterseminars. Berlin 1984
2. Autorenkollektiv: Roboter in der Gerätetechnik. VEB Verlag Technik Berlin 1984
3. SEIFERT, B.: Schwingungsberechnungen an Roboterstrukturen. TH Ilmenau, DA an der Sektion Gerätetechnik 1984
4. BACH, T. S.: Schwingungsberechnung an Robotern. TH Ilmenau, DA an der Sektion Gerätetechnik 1985
5. ANH, N. H.: Analyse von Roboterschwingungen mit NSFT. TH Ilmenau, DA an der Sektion Gerätetechnik 1986
6. TELSCHOW, G.: Programmsystem STIFDIF, Version 2. AdW der DDR, Institut für Mathematik Berlin 1983
7. WEBER, K.: Rechenprogramm NSFT (redundanzfreie schnelle Fourier-Transformation). TH Ilmenau, Rechenzentrum 1983.

Prof. Dr. Erwin JUST TH Ilmenau PSF 327 Section GT, DDR 6300