

# PRÄZISIONSMANIPULATOREN FÜR DIE LASERTECHNIK

Z. MRUGALSKI, L. BUCZYŃSKI, W. CZERWIEC, B. DECZKOWSKI,  
J. IGIELSKI, J. MIZIELIŃSKI, A. RASTAWICKI, J. RAWSKI,  
J. SOLTYSINSKI, A. WIERCIAK und J. ZADARA.

Institut für Konstruktionstechnik der Feinmechanische und Optische Geräte, Technische  
Hochschule Warszawa

Eingegangen am 9. September 1986  
Vorgelegt von Prof. Dr. O. Petrik

## Abstract

A family of micropositioners for laser synthese studies and other experiments is presented. It consists of mirror holders of diameter of 150 and 330mm for positioning the mirrors with 5 degrees of freedom (3 linear and 2 rotational movements) and the cross stacked stages with 2 degrees of freedom: for positioning the specimen in the laser materials processing. All devices have been designed and produced in the Institute of Design of Precise and Optical Instruments of the Warsaw University of Technology.

Der Fortschritt in den wissenschaftlichen Forschungsarbeiten schafft die Möglichkeit, immer neuere einzigartige Einrichtungen zu konstruieren und zu bauen, die die technische Basis für die durchzuführenden Experimente bereichern.

Im Konstruktionsinstitut für Feinmechanische und Optische Geräte der Technischen Hochschule in Warschau wurde eine Familie von Präzisionsmanipulatoren konstruiert, die für die Untersuchungen zur kontrollierten Laser-Synthese bestimmt sind. Es wurden die folgenden Einrichtungen konstruiert und ausgeführt:

- Spiegelhalter AM 150 mit einem Maximaldurchmesser des optischen Elements von 150 mm, sowie Spiegelhalter AM 330 mit einem Maximaldurchmesser des optischen Elements von 330 mm; beide Halter gestatten die Positionierung des optischen Elements im Bereich von 5 Freiheitsgraden (3 Linear, und 2 Drehbewegungen).
- Kreuztisch zur Positionierung der Proben während der Bearbeitung auf der Laser-Mikrowerkzeugmaschine, im Bereich von 2 Freiheitsgraden in horizontaler Ebene;
- Universaltriebseinheit (in mehreren Varianten), die in allen vorgenannten Einrichtungen verwendet wird und zur Ausführung der Positionierung sowohl linear wie auch angular bestimmt ist.

Die an diese Einrichtungen gestellten strengen Forderungen bezüglich Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Positionierung brachten die Notwendigkeit, die endgültige Bearbeitung der Konstruktion durch umfangreiche Untersuchungen an den verschiedenen Varianten von Elementen und Baugruppen dieser Einrichtungen einzuleiten, u. a. an den Lagerungen, Führungen und Antrieben. Nachstehend werden kurzgefaßt die endgültigen Konstruktionsvarianten der konstruierten und ausgeführten Manipulatoren beschrieben, deren Serienproduktion bereits begonnen wurde.

### Automatischer Manipulator (Spiegelhalter) AN 150 [2, 5]

Die konstruktive Lösung des Manipulators sollte die räumliche Orientierung der optischen Elemente von einem Durchmesser von 150 mm und einer Dicke von bis zu 30 mm (sowohl strahlendurchlässige wie auch strahlenreflektierende Elemente) in einem Bereich ermöglichen, der von den rechtwinkligen Koordinaten  $x$ ,  $y$ , in der horizontalen Ebene und von der vertikalen Koordinate  $z$ , sowie von den Winkelkoordinaten  $\alpha$  und  $\beta$  bezeichnet wird (Abb. 1).

Die erforderlichen Bewegungsbereiche zur Positionierung des optischen Elementes waren folgende:

a) Makro-Bewegungen:

- linear ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) — 0 . . . 20 mm mit  $\pm 0,1$  mm maximaler Ungenauigkeit der Einstellung,
- angular ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) —  $\pm 5^\circ$  mit  $\pm 1'$  maximaler Ungenauigkeit der Einstellung:

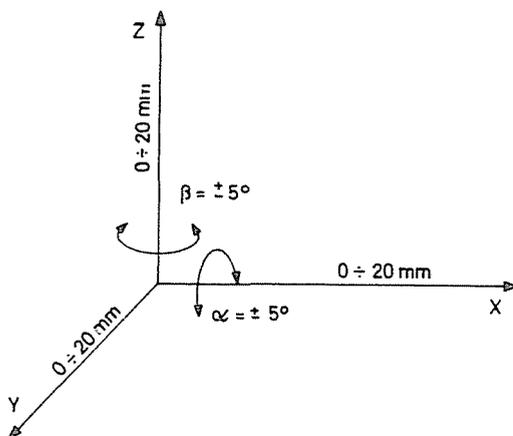


Abb. 1. Koordinaten des Manipulators

## b) Mikro-Bewegungen:

— linear  $-0 \dots 0,2$  mm mit  $2 \mu\text{m}$  maximaler Ungenauigkeit der Einstellung

— angular  $-0 \dots 5'$  mit  $\pm 5''$  max. Ungenauigkeit der Einstellung

Bei der Positionierung von großen und schweren Elementen erforderte die Erzielung einer derart geringen Einstellungsungenauigkeit die Lösung zahlreicher komplizierter Probleme. Das wichtigste dabei war die Erreichung von geringer Reibung ohne stick-slip-Effekt bei Eliminierung des Spiels in den Lagern und Führungen.

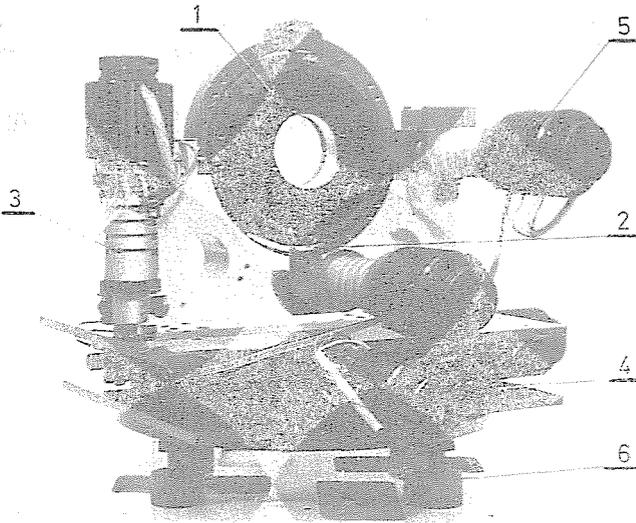


Abb. 2. Manipulator AM 150

Das äußere Aussehen des Manipulators ist aus Abb. 2 ersichtlich (1-Baugruppe des Halters des optischen Elementes; 2-Baugruppe der Winkelbewegungen  $\alpha$ ,  $\beta$ ; 3-Baugruppe der Vertikalbewegung  $z$ ; 4-Baugruppe der Horizontalbewegungen  $x$ ,  $y$ ; 5-Antriebseinheit; 6-Ständergruppe zur Grobeinstellung des Manipulators).

Das konstruktive Schema der Baugruppe der Drehbewegung des optischen Elementes ist in Abb. 3 dargestellt. Im senkrecht gelagerten Ring 1 sind die Zapfen 4 eingesetzt, auf denen der innere Ring 2 mit dem darin befestigten Spiegel 7 gelagert ist. Der Ring 2 kann also um den Winkel  $\alpha$  gegen die horizontale Achse gedreht werden. Die Winkelbewegung der beiden Ringe wird durch die Antriebseinheiten 9 erzwungen, deren Endstücke auf die Ringe auf einem Radius  $r=100$  mm drücken (Abb. 6). Der ständige Andruck des Ringes an das Endstück wird durch die Rückholfedern 6 gewährleistet. Der

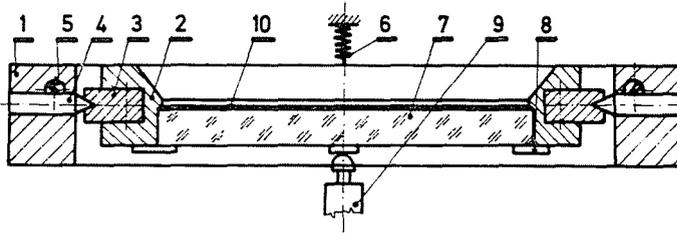


Abb. 3. Schema der Baugruppe der Drehbewegung des optischen Elements

Spiegel 7 ist im Innenring mit Hilfe der Klemmen 8 befestigt und so eingesetzt, daß seine Nutzfläche 10 mit den Achsen der Drehbewegungen  $\alpha$  und  $\beta$  übereinstimmt.

Der Linearbewegungen  $x$  und  $y$  des Spiegels sichern Führungen mit Wälzlagern (Abb. 4), die sich im Manipulatorständer befinden. Um die Regulierung des Querspiels und des Längsspiels der Führungen 2 zu ermöglichen, sind einige Lager an Exzenterzapfen 4 befestigt.

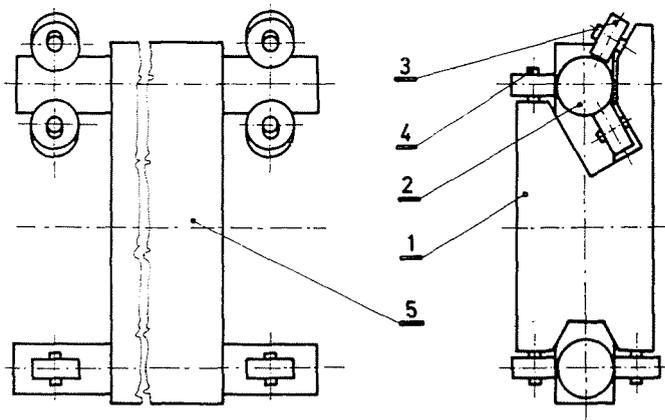


Abb. 4. Schema der Baugruppe der Linearbewegung: 1-Trägplatte, 2-Führungen, 3-Wälzlager, 4-Exzenterzapfen, 5-Korps

Die Spiegelbewegung entlang der Achse wird durch eine Gruppe vertikaler Führungen (Abb. 5) mit den Entlastungsfedern 2 gewährleistet. In der Konstruktion wurde die Möglichkeit der Einstellung der Federkraft entsprechend dem Gewicht des optischen Elementes und der ganzen sich entlang der Achse  $z$  bewegend Baugruppe vorgesehen. Die vertikale Bewegung dieser Baugruppe wird durch den Antrieb 10 erzielt, dessen Endstück auf dem Manipulatorständer abgestützt ist.

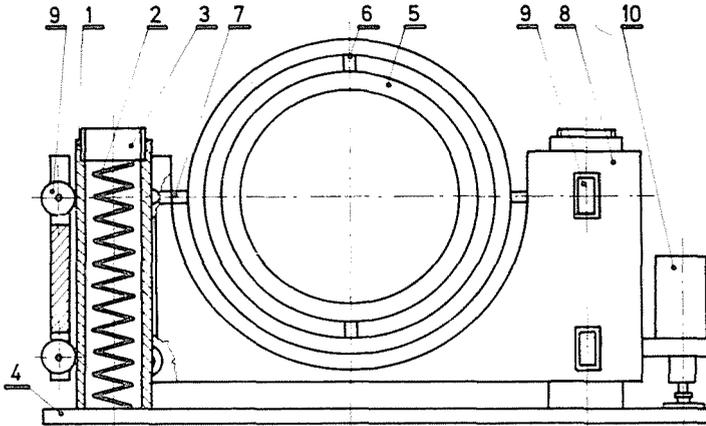


Abb. 5. Baugruppe der Vertikaler Führung: 1-Führungen, 2-Entlastungsfedern, 3-Einstellelement, 4-Obere Hauptplatte, 5-Spiegelhalter, 6, 7-Lagerungen des Spiegelhalters, 8-Korps, 9-Wälzlager, 10-Antriebseinheit

Je nach Art des verwendeten optischen Elementes im Halter, können die Antriebseinheiten der Drehbewegungen  $\alpha$  und  $\beta$  an einer Seite des Manipulators (Abb. 6a), oder an beiden Seiten desselben (Abb. 6b) angeordnet werden.

Ist die Positionierung des optischen Elementes nicht in allen 5 Koordinaten ( $x, y, z, \alpha, \beta$ ) erforderlich, besteht die Möglichkeit, die betreffende Bewegung zu sperren oder auch die betreffende Baugruppe des Antriebs nicht in den Manipulator einzubauen.

Sämtliche Antriebseinheiten (deren Beschreibung im weiteren gebracht wird), sind mit Schrittmotoren ausgerüstet, welche von der mit einem Computer gekuppelten entsprechenden Steuereinheit gespeist werden können.

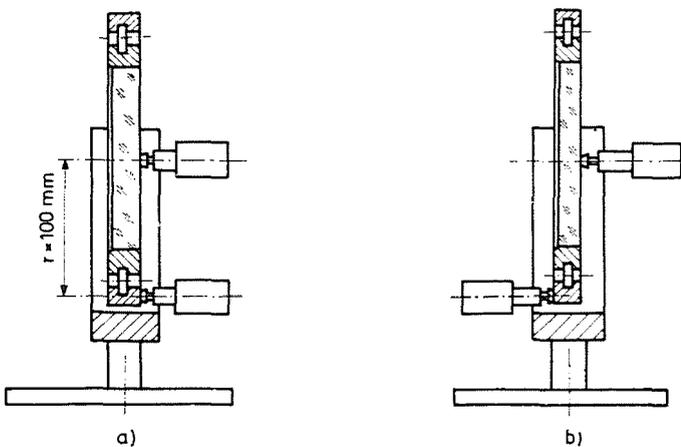


Abb. 6. Arts der Anordnung der Antriebseinheiten

### Automatischer Manipulator (Spiegelhalter) AM 330 [7]

Unter Ausnutzung der bei der Bearbeitung der Konstruktion des Manipulators AM 150 gesammelten Erfahrungen wurde der automatische Manipulator AM 330 konstruiert, der die räumliche Einstellung von optischen Elementen mit 330 mm Durchmesser mit der gleichen Genauigkeit wie beim Manipulator AM 150 gestattet.

Das äußere Aussehen des Manipulators ist in Abb. 7 dargestellt. Ähnlich wie beim Manipulator AM 150 besteht er aus den folgenden Baugruppen: 1-

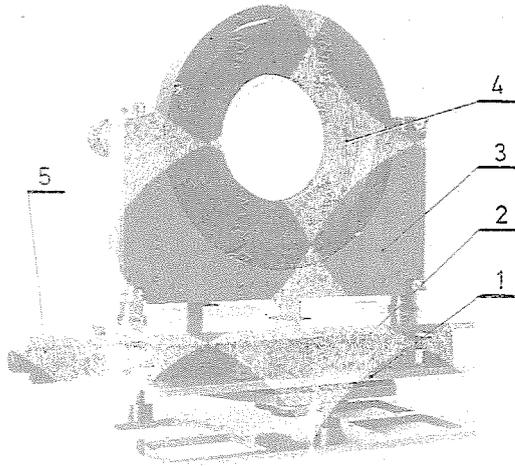


Abb. 7. Manipulator AM 330

Ständer, in dem die Linearbewegungsmechanismen 2 für  $x$ ,  $y$  untergebracht sind; 3-Vertikalbewegungsmechanismus  $z$ ; 4-Spiegelhalter mitsamt Winkelbewegungsmechanismus; sowie 5-Antriebseinheiten.

Die große Masse der einzelnen Baugruppen sowie des ganzen Manipulators machte es notwendig andere konstruktive Lösungen für diese Baugruppen einzusetzen, als im Manipulator AM 150. So wurde z. B. eine andere Lagerung der um die Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  schwenkenden Ringe gewählt, und die Antriebseinheit für die senkrechte Bewegung wurde im Inneren des Manipulators angeordnet. Ähnlich wie zuvor wurden dagegen, zwecks Ermöglichung der Linearbewegungen  $x$ ,  $y$ ,  $z$ -Führungen mit Wälzlagern eingesetzt.

Zum Antrieb des Spiegelhalters in allen Koordinaten wurden Antriebseinheiten verwendet, die mit Schrittmotoren ausgerüstet sind, so wie im Manipulator AM 150.

## Kreuztisch mit Elektroantrieb [6]

Dieser Kreuztisch (Abb. 8) gestattet die Positionierung der Probe in der horizontalen Ebene entlang den Achsen  $x$ ,  $y$  mit Hilfe der elektrischen Antriebseinheiten 3, die mit Schrittmotoren ausgestattet sind, sowie auch die Handverstellung entlang der vertikalen Achse und die Drehung um diese Achse. Die Einrichtung besteht aus zwei voneinander unabhängigen Baugruppen 1 und 2, welche lineare Bewegungen längs der Achsen  $x$  und  $y$  ermöglichen. Diese Bewegungen haben durch die Mikroschalter 5 begrenzte Bereiche, welche durch verstellbare Anschläge betrieben werden. Auf dem Kreuztisch 6

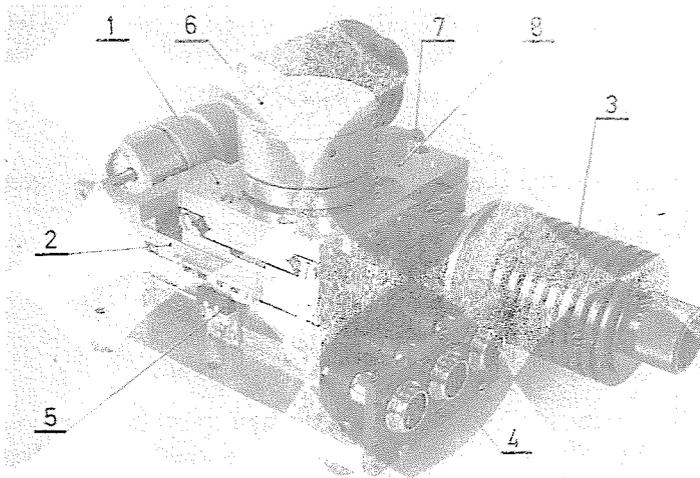


Abb. 8. Kreuztisch mit Elektroantrieb

ist die Befestigung von flachen Proben mittels Unterdruck möglich (durch Unterdruck im Raum unter dem Tisch, der mittels Leitung 7 gespeist wird).

Die vertikale Verstellung des Kreuztisches erfolgt von Hand, nach Lösen der festgestellten Klemmsperre 8. Unabhängig davon ist auch die manuelle Drehung des Kreuztisches um seine vertikale Achse gegeben.

Zur Steuerung der Antriebseinheiten des Kreuztisches wurde eine programmierbare Steuereinheit (Abb. 9) gebaut, die mit den Schrittmotoren und Mikroschaltern des Kreuztisches vermittels spezieller Verbindungsleitungen 9 verbunden ist. Der Kreuztisch kann über die Steuereinheit auch von einer externen Anlage gesteuert werden, z. B. durch einen Computer.

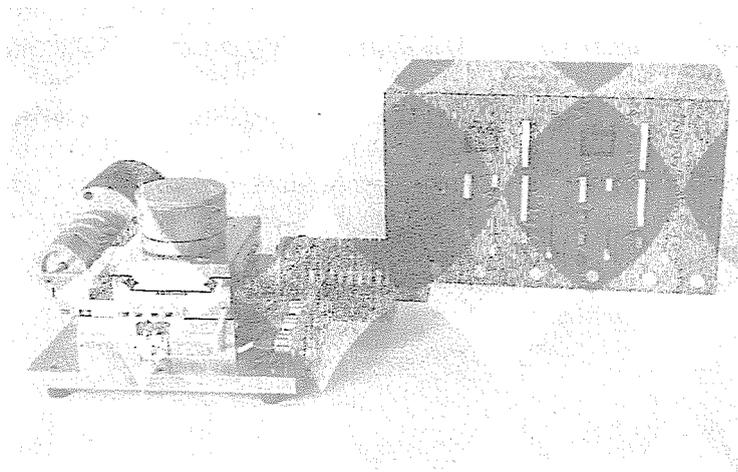


Abb. 9. Kreuztisch und Steuergerät

Die grundsätzlichen Kenndaten des Kreuztisches sind folgende:

— Bereich der Linearbewegungen $x, y$	20 mm
— Bereich der Vertikalbewegung $z$	8 mm
— Bereich der Winkelbewegung des Kreuztisches	360°
— Grundschrift der Bewegungen $x, y$	$20 \pm 1 \mu\text{m}$
— Hysteresefehler im ganzen Bewegungsbereich, max.	max 5 $\mu\text{m}$

Der Kreuztisch mit Elektroantrieb ist hauptsächlich zum Aufspannen und automatischen Positionieren von Proben auf einer Laser-Mikrobearbeitungsmaschine bestimmt. Er kann auch zu anderen Zwecken eingesetzt werden, wie z. B. zur automatischen Ausführung von Messungen optischer oder elektronischer Elemente unter Nutzung eines Computers.

#### **Antriebseinheit mit fester oder variabler Positionierungsempfindlichkeit [3, 4]**

In den vorherbeschriebenen Einrichtungen wurden zur Ausführung der Linear- und Winkelbewegungen besondere, mit Schrittmotoren ausgestattete Baukasten-Antriebseinheiten verwendet (Abb. 10).

Das Wirkprinzip derselben beruht auf der Umwandlung der Drehbewegung der Motorwelle in die lineare Verlagerung des Ausgangsdorns. Je nach Bedarf kann der Elementarhub des Ausgangsdorns konstant sein (z. B. 2  $\mu\text{m}$  oder 20  $\mu\text{m}$  — je nach verwendeter Untersetzung) oder auch — durch Einsatz

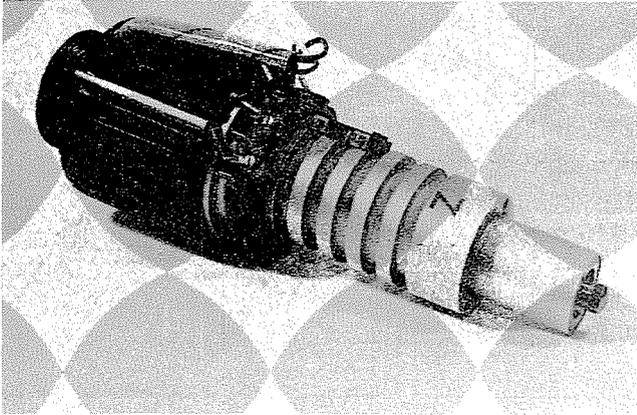


Abb. 10. Antriebseinheit mit Schrittmotor

einer Differentialschraube — mit zwei Werten: „Makro“ und „Mikro“. Diese zuletzt genannte Antriebsart ermöglicht die schnelle Bewegung des Systems in die gewünschte Lage und die genaue Positionierung im gewählten Unterbereich. Der „Makro“-Bereich der Verstellung beträgt 20 mm mit einem Grundteilschritt von 20  $\mu\text{m}$ , derjenige der „Mikro“-Verstellung 0,2 mm mit einem Grundteilschritt von 1,5  $\mu\text{m}$ .

### Schlußbetrachtung

Alle vorstehend beschriebenen Manipulatoren sind neue Einrichtungen, die in Polen bisher nicht hergestellt wurden. Sie werden im Institut für Plasmaphysik und Laser-Mikrosynthese S. Kaliski in Warschau mit Erfolg eingesetzt. u.a. bei der Untersuchung von kerntechnischem Plasma unter Verwendung von Hochleistungs-Lasern [1]. Im Konstruktionsinstitut für Feinmechanische und Optische Geräte der Technischen Hochschule Warschau werden Konstruktions- und Forschungsarbeiten an noch anderen Einrichtungen geführt, die in der Lasertechnik verwendet werden. Die gesammelten Erfahrungen bei der Bearbeitung der vorstehend beschriebenen Geräte erlauben anzunehmen, daß die neubearbeiteten Geräte die an sie gesellten Genauigkeitsforderungen gleichfalls erfüllen werden.

## Zusammenfassung

Es wurde eine Familie von Präzisionsmanipulatoren erörtert, die für die Untersuchungen zur kontrollierten Laser-Synthese bestimmt sind: zwei Spiegelhalter mit maximaler Durchmesser des optischen Elements von 150 mm und 330 mm (beide Halter gestatten die Positionierung des optischen Elements im Bereich von 5 Freiheitsgraden: 3 Linear- und 2 Drehbewegungen) und ein Kreuztisch zur Positionierung der Proben während der Bearbeitung auf der Laser-Mikrowerkzeugmaschine (im Bereich von 2 Freiheitsgraden in horizontaler Ebene). Alle die Einrichtungen wurden im Institut für Konstruktionstechnik der Feinmechanische und Optische Geräte der Technischen Hochschule Warschau konstruiert.

## Literatur

1. Technische Information von IFPiLM: Lasery wielkiej mocy (Hochleistungslaser). Przegląd Techniczny Nr. 4/85, S. 2
2. IGIELSKI J.: Automatyczny manipulator do justowania laboratoryjnych układów optycznych (Automatische Manipulator zum Justieren von Labor-Optiksystemen). Pomiary, Automatyka, Kontrola. Nr. 13/83, S. 410—413
3. ZADARA J.: Mikronapęd o zmiennej czułości pozycjonowania (Mikroantrieb mit variabler Positionierungsempfindlichkeit. Biuletyn PIAP Nr. 5—6/82, s. 95—97
4. Patentanmeldung Nr. P 238 831 vom 5. 10. 1982: „Mechanismus mit Differentialschraube” — Autor: J. Zadara
5. Patentanmeldung Nr. P 244 191 vom 18. 10. 1983: „Spiegelhalter I” — Autoren: W. Czerwiec, A. Wierciak, J. Mizieliński A. Rastawicki, L. Buczyński
6. Patentanmeldung Nr. P 244 102 vom 18. 10. 1983: „Kreuztischmechanismus” — Autoren: W. Czerwiec, A. Wierciak, J. Soltysiński
7. Patentanmeldung Nr. P 244 811 vom 29. 11. 1983: „Spiegelhalter II” — Autoren: J. Mizieliński, J. Zadara, Z. Mrugalski, J. Rawski, A. Wierciak, L. Buczyński, J. Iglowski

Dr. habil Zdzisław MRUGALSKI    Politechnika Warszawska  
Wydz. Mechaniki Precyzyjnej,  
02-525 Warszawa  
ul. Chodkiewicza 8.

# 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

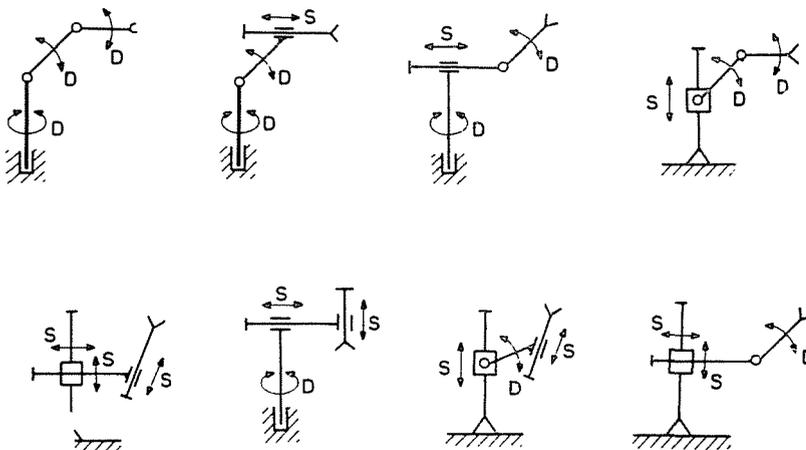


Abb. 1

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

- Schwingungsberechnung an Roboterstrukturen [3]
- Schwingungsberechnung an Robotern [4]
- Analyse von Roboterschwingungen mit NSFT [5] (nichtredundante schnelle Fourier-Transformation).

Voraussetzungen, Modell

Der Roboter wird in seiner Struktur in Starrkörper untergliedert, die durch Gelenke elastisch gekoppelt sind. Vorausgesetzt werden Elementesteifigkeit  $\gg$  Gelenksteifigkeit, lineare elastische Kopplung an den Gelenken für Translation und für Rotation, siehe Abb. 2.

Die Antriebsbewegungen sind mit dem Freiheitsgrad  $f_A = 6/\text{Element}$  zugelassen (real ist  $f_A = 1/\text{Element}$ ); die Schwingbewegungen sind den Antriebsbewegungen mit  $f_S = 6/\text{Element}$  überlagert (real ist  $f_S \leq 6/\text{Element}$ ).

Die Anzahl der gekoppelten Körper ist  $i = 1 \dots n$ ;  $n = 3$  ergibt 8 verschiedene Strukturen, falls die Gelenke Schub- oder Drehgelenke sind. Spiel und Reibung werden (in erster Näherung) vernachlässigt.

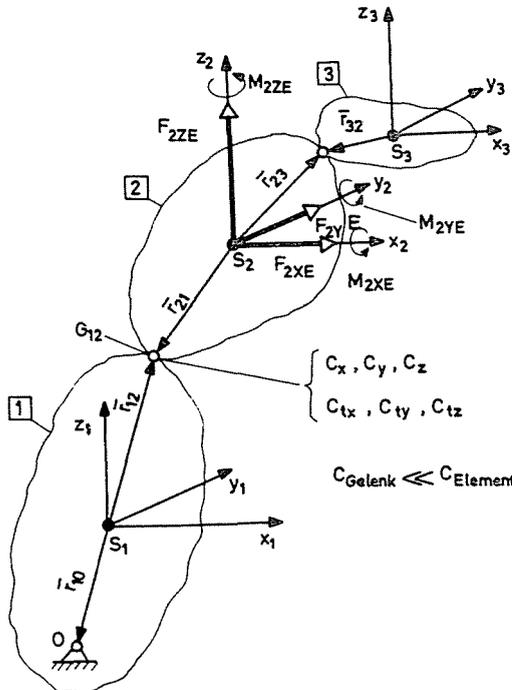


Abb. 2

### *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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

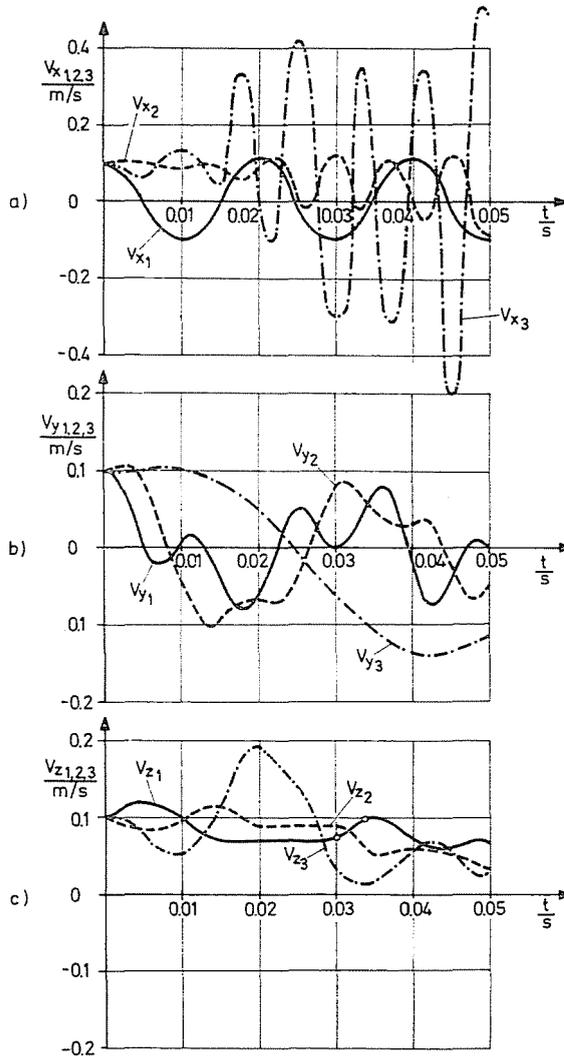


Abb. 3

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.

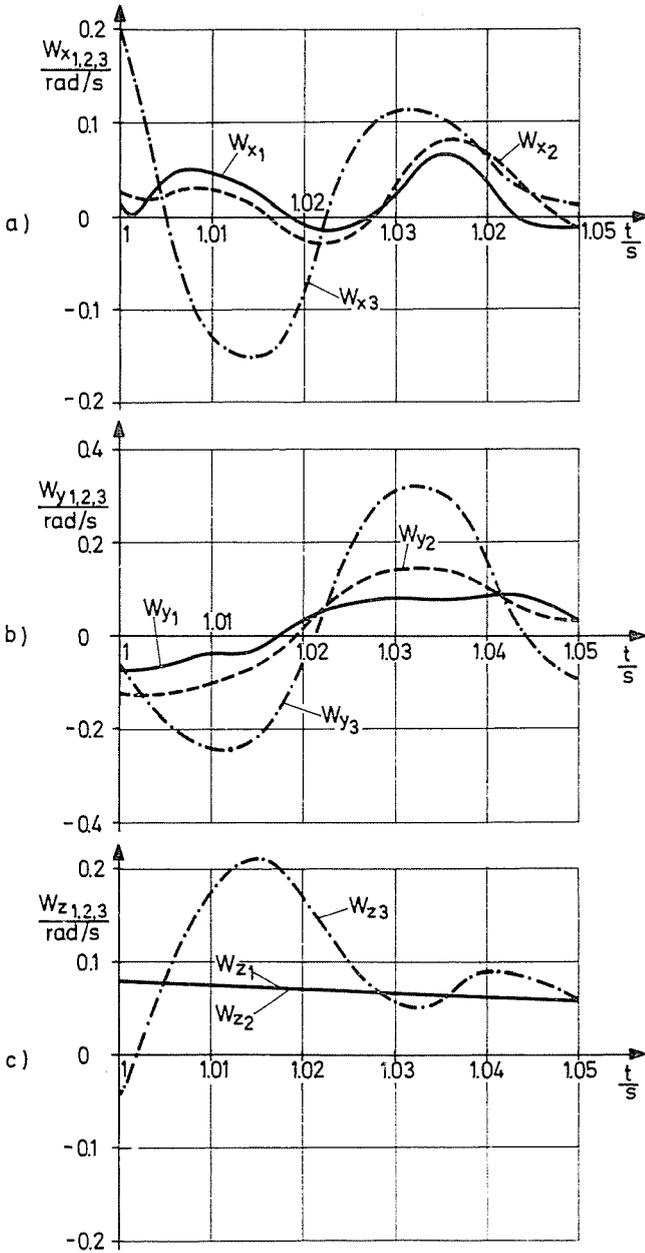


Abb. 4

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