

**Reinhard Schugmann**

**Nachgiebige  
Werkzeugaufhängungen  
für die automatische Montage**

Mit 71 Abbildungen

**Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg New York  
London Paris Tokyo Hong Kong 1990**

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einführung, Darstellung der Aufgabe</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung: Toleranzausgleich in der flexibel automatisierten Montage	1
1.2	Ziel der Arbeit	3
1.3	Arbeitsschwerpunkte	4
<b>2</b>	<b>Stand der Forschung</b>	<b>5</b>
2.1	Einführung	5
2.2	Bauteilkontakt beim Fügeprozeß	5
2.3	Technische Ausführungen von komplienten Systemen	8
2.4	Industrieller Einsatz von komplienten Systemen	12
<b>3</b>	<b>Analyse auftretender Fehler</b>	<b>14</b>
3.1	Übersicht	14
3.2	Analyse und Beurteilung möglicher Fehlerursachen	14
3.2.1	Einführung	14
3.2.2	Beurteilung von Bauteilen und Baugruppen	14
3.2.3	Beurteilung der Fehler durch Montagesystem-Komponenten	18
3.2.4	Beurteilung des Montageprozesses bezüglich des passiven Toleranzausgleichs	20
3.3	Analyse von Positionsfehlern	21
3.3.1	Darstellung des Fehlers	21

3.3.2	Darstellung des Fehlerausgleichs	24
3.3.3	Grenzen des komplianten Fehlerausgleichs	25
3.3.4	Beispiel zur Ermittlung eines Toleranzfeldes	26
3.4	Analyse des dynamischen Verhaltens von Industrierobotern	30
3.4.1	Einführung	30
3.4.2	Optische Bahnbestimmung	31
3.4.3	Ermittlung der Absolutbeschleunigung	33
3.4.4	Schwingungsanalyse	37
3.5	Zusammenfassung und Diskussion der Fehleranalyse	41
4	Analytisches Vorgehen bei der Auslegung von komplianten Systemen	42
4.1	Einführung	42
4.2	Auslegung der Kinematik komplienter Systeme	43
4.2.1	Erfassung der kinematischen Anforderungen in einem Modell des komplianten Systems	43
4.2.2	Gestaltung der nachgiebigen Werkzeugaufhängung aus einzelnen kinematischen Modulen	46
4.2.3	Spezialfälle, funktionsvereinigende Elemente	47
4.2.4	Möglichkeiten und Grenzen eines allgemeinen Ansatzes	48
4.3	Quasistatische Berechnung des Ausgleichsvorgangs	49
4.3.1	Einführung	49
4.3.2	Kontaktkräfte zwischen den zu fügenden Bauteilen	49
4.3.3	Ermittlung der Ersatz-Federsteifigkeiten	50

4.3.4	Berechnung der einzelnen Nachgiebigkeiten in einer elastischen Aufhängung	56
4.3.5	Diskussion des analytischen Vorgehens	60
4.4	Auslegung des dynamischen Verhaltens von nachgiebigen Werkzeugaufhängungen	61
4.4.1	Einführung	61
4.4.2	Auslegung der nachgiebigen Werkzeugaufhängung bezüglich des Handhabungsgerätes	62
4.4.3	Das Schwingungsverhalten eines Systems mit mehreren Freiheitsgraden	68
4.4.4	Das dynamische Verhalten beim Kontakt der beiden Werkstücke	72
4.5	Zusammenfassung und Diskussion der Erkenntnisse	75
5	Konstruktionselemente für den Bau nachgiebiger Werkzeugaufhängungen	77
5.1	Übersicht	77
5.2	Anforderungen an den konstruktiven Aufbau von nachgiebigen Werkzeugaufhängungen	77
5.3	Einteilung der konstruktiven Ausführungen	79
5.3.1	Übersicht	79
5.3.2	Kinematisch exakt geführte Ausführungen	79
5.3.3	Allgemeine Nachgiebigkeit mit Vorzugsrichtungen	81
5.3.4	Standard-Systeme	83

5.4	Einzelne Maschinenelemente aus nachgiebigen Werkzeugaufhängungen	83
5.5	Zusammenfassung der Konstruktionselemente in einer nachgiebigen Werkzeugaufhängung	87
6	Programme zur Auslegung und Konstruktion von komplizierten Systemen	88
6.1	Einleitung	88
6.2	Gesamtkonzept des Entwicklungssystems	88
6.2.1	Einführung	88
6.2.2	Ziele einer rechnerunterstützten Entwicklung von nachgiebigen Werkzeugaufhängungen	89
6.2.3	Stand der Technik, Möglichkeiten der Datenverarbeitung	90
6.2.4	Voraussetzungen und Hilfsmittel für ein geeignetes Entwicklungssystem	91
6.2.5	Gesamtkonzept des Entwicklungssystems	92
6.3	Rechnerunterstützte Fehleranalyse und Ermittlung der erforderlichen Kinematik	96
6.3.1	Aufgabe des Programmbausteins	96
6.3.2	Funktionsweise des Programmbausteins	96
6.3.3	Struktur des Programmbausteins	98
6.4	Wissensbasierte Auswahl geeigneter Module und Berechnungsmethoden	99
6.4.1	Aufgabe des Programmbausteins	99

6.4.2	Anforderungen an die Hilfsmittel zur Realisierung des Programmbausteins	99
6.4.3	Struktur des Programmbausteins	100
6.4.4	Anwendungsbeispiel: Montage eines Stoßfänger-systems	104
6.5	Parametrische Konstruktion von zwangsgeführten Mechanismen	107
6.5.1	Einteilung der konstruktiven Ausführungen	107
6.5.2	Anforderungen an das rechnerunterstützte Konstruktionsmodul	109
6.5.3	Die Struktur des Programmbausteins KOSYKON	109
6.5.4	Anwendungsbeispiel: flexible Schweißzelle	111
6.6	Optimierung von komplizierten Systemen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode	114
6.6.1	Problemstellung und Anforderungen	114
6.6.2	Die Finite-Elemente-Methode und Vektor-Optimierungsverfahren	114
6.6.3	Die Struktur des Programmpaketes	117
6.6.4	Anwendungsbeispiel: Montage eines Scheinwerfers in eine Fahrzeugfront	119
6.6.5	Diskussion der Ergebnisse:	122
6.7	Zusammenwirken der einzelnen Programme	123
6.7.1	Schnittstellen zwischen den einzelnen Programmen	123
6.7.2	Benutzeroberfläche	124

6.8	Zusammenfassung und Diskussion der bestehenden Programme	125
7	Diskussion und weitere Entwicklungsziele	126
7.1	Diskussion der bisherigen Ergebnisse	126
7.2	Weitere Entwicklungsziele	127
7.3	Ausblick	129
8	Zusammenfassung	130
9	Literaturverzeichnis	133