

Uwe Schönherr

*Steuerung und Sensordatenintegration für flexible  
Fertigungszellen mit kooperierenden Robotern*



Uwe Schönherr

*Steuerung und Sensordatenintegration  
für flexible Fertigungszellen  
mit kooperierenden Robotern*

Herausgegeben von  
Professor Dr.-Ing. Klaus Feldmann,  
Lehrstuhl für  
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik

**FAPS**



Meisenbach Verlag Bamberg

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung:	9. Februar 1996
Tag der Promotion:	29. April 1996
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. habil. H. Stoyan
Berichtersteller:	Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann apl. Prof. Dr.-Ing. habil. W. Bär

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

**Schönherr, Uwe:**

Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mit  
kooperierenden Robotern / Uwe Schönherr. - Bamberg : Meisenbach,  
1996

(Fertigungstechnik - Erlangen ; 56)

Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1996

ISBN 3-87525-076-1      ISSN 1431-6226

NE: GT

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks  
und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus,  
vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des  
Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein  
anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichts-  
gestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich  
genannten Sonderfälle -, reproduziert oder unter Verwendung  
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder  
verbreitet werden.

© Meisenbach Verlag Bamberg 1996

Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf

Printed in Germany

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Herrn Professor Dr.-Ing. K. Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Fertigungstechnik, danke ich herzlich für die wohlwollende und großzügige Förderung dieser Arbeit. Mein besonderer Dank gilt ebenfalls Herrn apl. Professor Dr.-Ing. habil. W. Bär, Lehrstuhl für Regelungstechnik der Universität Erlangen-Nürnberg, für die Übernahme des Koreferates und die sehr gute Unterstützung für die Betreuung zahlreicher Studien- und Diplomarbeiten am Institut für Elektrotechnik. Herrn Professor Dr. F. Hofmann, Inhaber des Lehrstuhls für Informatik IV (Betriebssysteme) der Universität Erlangen-Nürnberg, danke ich für die Übernahme des Vorsitzes in meinem Promotionsverfahren.

Die bestehenden komplexen steuerungstechnischen Aufgaben können zweifelsohne nicht mehr von Einzelnen gelöst werden. Somit möchte ich an dieser Stelle Herrn Dipl.-Ing. F.-J. Zeller danken, der in hervorragender Zusammenarbeit zur gemeinsamen Durchführung zahlreicher Projekte beitrug und durch seine unermüdliche Gesprächsbereitschaft großen Anteil am Gelingen dieser Arbeit hat. Ferner gilt mein Dank allen Kolleginnen und Kollegen, speziell jenen der Forschungsgruppe für Steuerungs- und Sensortechnik, für die stets offenen fachlichen Diskussionen und die effektive Unterstützung. Weiterhin danke ich den Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften, die mich beim Erstellen dieser Arbeit unterstützt haben. Hier sind besonders Herr Dipl.-Ing. J. Braun, Frau Dipl.-Ing. M. Friedrich, Herr Dipl.-Ing. W. Klinger, Frau Dipl.-Inf. I. Martina, Herr Dipl.-Ing. C. Pfeiffer, Herr Dipl.-Ing. G. Ramsauer, Herr Dipl.-Ing. F. Roelofs, Herr Dipl.-Ing. A. Rohrmann, Herr Dipl.-Ing. B. Schuler, Herr Dipl.-Ing. S. Sommer, Herr Dipl.-Ing. U. Steger und Herr Dipl.-Ing. R. Zwickl zu nennen.

Mein ganz besonderer Dank gilt jedoch meiner Frau Grit, sowie meinen Kindern Peggy, Romy und Heiko. Sie haben durch ihre Geduld, Rücksichtnahme und Zuspriechung diese Arbeit möglich gemacht.

Erlangen, im Juli 1996

Uwe Schönherr



# Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mit kooperierenden Robotern

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	1
<b>2</b>	<b>Charakterisierung flexibler Fertigungseinrichtungen mit mehreren Robotern</b> .....	4
2.1	Entwicklungstendenzen und Formen der Bewegungssteuerung .....	4
2.1.1	Begriffsbestimmungen .....	4
2.1.2	Einsatzfelder .....	5
2.1.3	Formen der Zusammenarbeit in Systemen mit mehreren Robotern .....	7
2.1.4	Analyse der Steuerungssysteme .....	9
2.1.5	Bewegungsvermögen kooperierender Kinematiken .....	14
2.2	Situationsanalyse des Einsatzes in der Fertigungsautomatisierung .....	18
2.2.1	Nutzenpotentiale von kooperierenden Robotern .....	18
2.2.2	Problemfelder des Einsatzes .....	21
2.3	Zielsetzung und Vorgehensweise .....	23
<b>3</b>	<b>Integration und Steuerung der Systemkomponenten flexibler Montagezellen</b> .....	26
3.1	Steuerung hierarchisch strukturierter Fertigungszellen mit mehreren Robotern .....	26
3.1.1	Flexibilitätsaspekte und Klassifikation der Steuerungssysteme .....	26
3.1.2	Aufgabenfelder und Zielsetzungen von Zellensteuerungssystemen .....	29
3.2	Systematisierung und Entwurf der Zellensteuerung für kooperierende Roboter .....	31
3.2.1	Methodisches Vorgehen zum Entwurf des Steuerungssystems .....	31
3.2.2	Konzeption eines Systems zur modularen Steuerung kooperierender Roboter .....	33
3.2.3	Auftragsmanagement und Zellenablaufsteuerung .....	36
3.2.4	Grafisch geführte Beschreibung des Zellenablaufes .....	39
3.2.5	Programmierung der Gerätesteuernngen .....	42
3.2.6	Bedienfunktionen der Zellenkomponenten .....	44
3.2.7	Erfassen und Protokollieren von Zellenzustandsdaten .....	46

3.3	Steuerungsintegration in einer Fertigungszelle durch standardisierte Kommunikation .....	48
3.3.1	Kommunikation mit MMS in der Fertigung .....	48
3.3.2	Integrationsaspekte von MMS in eine flexible Roboterzelle.....	49
<b>4</b>	<b>Bewegungssynthese und Kollisionsvermeidung für kooperierende Roboter .....</b>	<b>52</b>
4.1	Methoden zur Bahnplanung und Bahnführung von kooperierenden Robotern.....	52
4.1.1	Kinematische Voraussetzungen.....	52
4.1.2	Formen der Bahnplanung.....	53
4.1.3	Kooperierende Bahnführung mit virtuellem Master .....	58
4.1.4	Formen kooperierender Bewegungen.....	59
4.2	Sensor- und lagegeführte Bewegungen .....	61
4.2.1	Definition des Bezugskordinatensystems der Sensorintegration.....	61
4.2.2	Koordinierte Sensor- und Bahnführung.....	63
4.3	Kollisionsvermeidung beim Betrieb mehrerer Roboter.....	64
4.3.1	Ursachen und Möglichkeiten von deren Abwendung.....	64
4.3.2	Analyse der Modellierungsmethoden des Arbeitsraumes .....	66
4.3.3	Modellierung der Zelle und Strategie der Kollisionsvermeidung .....	67
<b>5</b>	<b>Konzeption eines Gerätesteuersystems für interagierende Roboter .....</b>	<b>71</b>
5.1	Bewertung von Steuerungssystemen für Fertigungsgeräte.....	71
5.1.1	Anforderungsanalyse .....	71
5.1.2	Hybride Steuerungsarchitektur .....	72
5.2	Definition von Ablauf- und Systemstrukturen für die kooperierende Bewegungssynthese.....	74
5.2.1	Abbildung des Bewegungsformen auf die Robotersteuerung .....	74
5.2.2	Ablauf- und Programmadministration .....	76
5.2.3	Echtzeit-Bahnplanung.....	77
5.3	Programmierkonzept für kooperierende Roboter .....	79
5.3.1	Normierte Programmiersprachen für Industrieroboter .....	79
5.3.2	Anforderungen an Programmierung und Bedienung.....	81
5.3.3	Konzeption der Programmierung kooperierender Roboter basierend auf einer normierten Programmiersprache.....	82
5.4	Echtzeitfähige Einfachsteuerungen für intelligente Feldgeräte.....	86
5.4.1	Bewertung von Steuerungen im Feldbereich .....	86
5.4.2	Steuerungskonzept .....	86
5.4.3	Verfahren interner Nachrichtenübertragung .....	87



<b>6</b>	<b>Sensorgestützte Bahn- und Kraftführung von Robotern</b> .....	89
6.1	Motivation und Formen des Sensoreinsatzes für Roboteranlagen .....	89
6.1.1	Bedeutung in der Fertigungsautomatisierung .....	89
6.1.2	Gestaltungsmöglichkeiten der Sensorintegration .....	91
6.2	Entwicklung von Strategien sensor geregelter Bewegungen .....	93
6.2.1	Vorgehen des Reglerentwurfes .....	93
6.2.2	Optimierungsverfahren zur Parameterbestimmung .....	94
6.2.3	Modellbildung der Regelstrecke .....	95
6.2.4	Regelung geometrischer Größen .....	98
6.2.5	Kraftregelung .....	102
6.3	Sensorintegrierter Robotergreifer .....	104
<b>7</b>	<b>Integrierte Sensorsysteme zur Prozeß- und Bewegungsführung</b> .....	107
7.1	Zielsetzung komplexer Sensorsysteme .....	107
7.1.1	Klassifikation von Sensoren in der Produktion .....	107
7.1.2	Prinzipien von zwei- und dreidimensional abstandsmessenden Sensoren .....	109
7.2	Flexibler Lasersensor zur Objektbestimmung .....	111
7.2.1	Konzeption und Aufbau des Sensors .....	111
7.2.2	Meß- und Auswerteverfahren .....	113
7.2.3	Einsatzaspekte des flexiblen Lasersensor .....	115
7.3	Mehrdimensionale Abstands- und Kraftdetektion mit klassischen Sensorprinzipien .....	117
7.3.1	Optischer Triangulationssensor .....	118
7.3.2	Induktive Sensorzeile .....	120
7.3.3	Kapazitiver Zeilensensor .....	121
7.3.4	Piezoelektrischer Kraftsensor .....	123
7.4	Konfigurierbares Signalverarbeitungssystem für mehrdimensionale Sensorik .....	125
7.4.1	Konzeption einer strukturierten Sensordatenverarbeitung .....	125
7.4.2	Modularchitektur .....	127
7.4.3	Konfiguration des Systems .....	129
<b>8</b>	<b>Flexibilitätssteigerung durch Manipulatoren mit höherem Freiheitsgrad</b> .....	131
8.1	Einsatzpotential von Greifern mit hohem Freiheitsgrad .....	131
8.1.1	Situationsanalyse flexibler Greifsysteme .....	131
8.1.2	Analyse von Montagetätigkeiten .....	133

---

8.2	Entwurf eines Dreifingergreifers .....	134
8.2.1	Entwurf einer Dreifinger- Kinematik.....	134
8.2.2	Fingergestaltung und Antrieb.....	135
8.2.3	Steuerungsaufbau .....	138
8.2.4	Hierarchisches Steuerungskonzept zur Bestimmung der Gelenkwinkel.....	139
8.2.5	Entwurf definierter Greifprimitive.....	140
8.3	Verfahren zur Bestimmung der Fingerstellungen aus vorgegebenen Greifprimitiven .....	142
8.3.1	Kinematische Voraussetzungen.....	142
8.3.2	Bestimmung der Kontaktpunkte der Fingerspitzen am Objekt .....	143
8.3.3	Gestaltung des zweiten Fingergliedes.....	146
8.3.4	Bestimmung der Fingergelenkwinkel .....	147
8.4	Kraftgeführte Greifvorgänge von Objekten .....	147
8.4.1	Integration der Kraftsensorik in den Fingergreifer .....	148
8.4.2	Entwurf und Implementierung einer Kraftregelung.....	149
9	<b>Zusammenfassung</b> .....	152
	<b>Literatur</b> .....	155

## Abkürzungsverzeichnis

### Abkürzungen

ASN	Abstract Syntax Notation
CFD	Control Flow Diagram
CSPEC	Controlspecification
DFD	Data Flow Diagram
DMS	Dehnmeßstreifen
FSR	Force Sensing Resistor
IPC	Interprocess Communication (-Handler)
IRL	Industrial Robot Language
LLC	Logical Link Control
MAC	Medium Access Control
MAP	Manufacturing Automation Protocol
MDE	Maschinendatenerfassung
MMS	Manufacturing Message Specification
PDU	Protocol Data Unit
PI	Proportional Integral
PID	Proportional Integral Differential
PLR	Programming Language for Robots
PWM	Pulsweitenmodulation
RT	Real Time
SA	Strukturierte Analyse
SAP	Service Access Point
TCP	Tool Centre Point (Werkzeugeingriffspunkt)
VMD	Virtual Manufacturing Device
VME	VersaModule Europe (Industriestandard eines Steuerungsbusses)

### Formelzeichen

$\alpha_i$	Drehwinkel im Fingeransatz oder Orientierungswinkel
$\beta_i$	Drehwinkel des Greifers oder Orientierungswinkel
$\mu_i$	Kopplungsfaktor zwischen einwirkender Kraft und resultierender Spannung
$\omega$	Kreisfrequenz
$\gamma_i$	Orientierungswinkel
$\varphi$	Phasenverschiebung
$\varphi$	Winkel der Orientierungsänderung
$\vartheta_i$	Winkel der Fingergelenke
$\Phi_{\text{ges}}$	Winkel des Kreisbogens einer Zirkularbahn
B	Breite eines gegriffenen Objektes
b	Koeffizient einer Parabel
b	Halbe Breite eines gegriffenen Objektes
c	Koeffizient einer Parabel
D	Dämpfung

---

d	Bahnparameter der Interpolation
e	Elastizitätsmodul
e	Regelabweichung
$e_i$	Einheitsvektor
$G_i(s)$	Kontinuierliche Übertragungsfunktion
$G_i(z)$	z-Übertragungsfunktion
$\underline{I}$	Einheitsmatrix
K	Drehzahlreglerverstärkung
$\underline{K}$	Koppelmatrix
k	Diskreter Zeitpunkt
l	Bahnlänge oder Abstand
l	Halbe Länge eines gegriffenen Objektes
$M_w$	Werkstückmasse
m	Anstieg einer Funktion
n	Laufvariable
$n(z)$	Nennerpolynom einer z-Übertragungsfunktion
$P_{gi}$	Greifpunkt am Objekt
$P_i$	Bezugspunkt des Greifers
$\underline{P}_i$	Kartesischer Raumpunkt
$p_i$	Zählerkoeffizient einer Übertragungsfunktion
$\overline{P_i P_i}$	Strecke zwischen zwei kartesischen Punkten
p	Halbparameter einer Parabel
$q_i$	Nennerkoeffizient einer Übertragungsfunktion
$\underline{q}_i$	Verschiebevektor
$r_i$	Länge der Greiferfinger
$\underline{S}$	Selektionsmatrix
s	Laplaceoperator
$s_i$	Abstand
$\underline{T}$	Transformationsmatrix
$T_D$	Vorhaltzeit
$t_i$	Tangente
$U_{Di}$	Spannungen der DMS-Brücken
u	Stellgröße
$u(z)$	Diskrete Stellgröße
$W(z)$	Diskrete Führungsfunktion
$\underline{w}$	Führungsgrößenvektor
$\underline{x}$	Positionsvektor
$\dot{x}_s$	Geschwindigkeitswert
$y_v$	Stellgröße Drehzahlregler
$y(z)$	Diskrete Streckenausgangsgröße
$Z(z)$	Diskrete Störfunktion
z	Diskrete Bildvariable
z	Störungsfunktion bei kontinuierlicher Betrachtung
$z(z)$	Zählerpolynom einer z-Übertragungsfunktion

# 1 Einführung

Industrieunternehmen sehen sich heutzutage durch eine Globalisierung der Märkte mit einer verschärften Wettbewerbssituation konfrontiert. Bei sinkenden Stückzahlen und größerer Variantenvielfalt gilt es, unter den veränderten Marktsituationen konkurrenzfähig zu bleiben [125]. Dadurch bedingt, orientieren die Unternehmen auf neue kundenbezogene organisatorische Strukturen und Fertigungsmethoden, um eine höhere Produktqualität, Reduzierung der Kosten und Steigerung der Produktivität zu erreichen [29]. Sich ständig verkürzende Innovationszyklen zwingen zu einer permanenten Verringerung der Entwicklungszeit von der Produktidee bis zum lieferbaren Produkt [104].

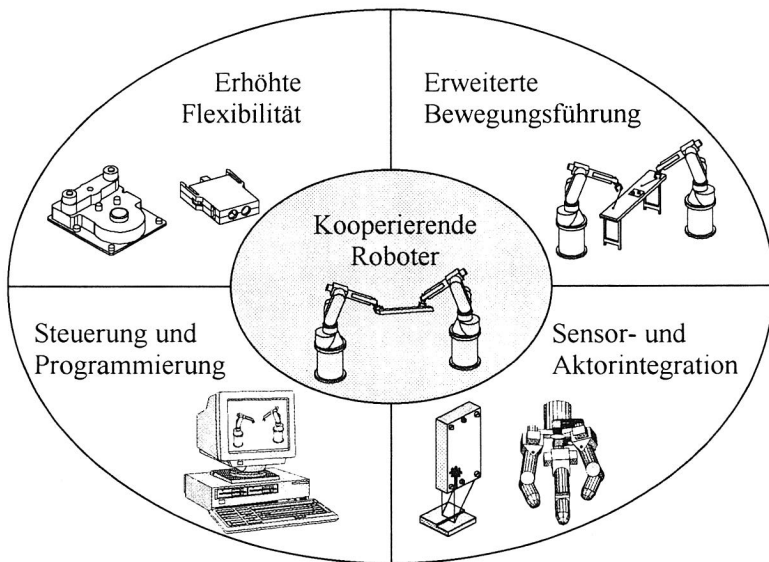
In der automatisierten Produktion erfordern flexible Fertigungs- und Montagesysteme die höchste Anpassungsfähigkeit hinsichtlich sich ändernden Produktionsaufgaben [131]. Dieses Spannungsfeld zwischen Automatisierung und Flexibilität bedingt eine hohe Leistungsfähigkeit der eingesetzten Steuerungs-, Geräte- und Sensortechnik. Produktionsanlagen mit Industrierobotern besitzen das hierzu notwendige hohe Flexibilitätspotential und sind dabei geeignet, eine hohe Anzahl von Varianten in geringen Stückzahlen mit unterschiedlichen Montage- und Bearbeitungstechnologien zu fertigen [118].

Aus der Komplexität der an Industrieroboter gestellte Anforderungen resultieren gegenüber anderen Bereichen der Fertigung eine verstärkte Ausnutzung der Verbesserungspotentiale Leistungsfähigkeit, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit [81]. Gerade im Bereich der Montagetechologie sind die Anwendungen bisher durch eine feste Zuordnung und Ausführung einzelner Fertigungsaufgaben durch dedizierte Roboter gekennzeichnet. Formen des Zusammenwirkens mehrere Roboter und einer koordinierten Bewegungsführung finden sich praktisch bisher nur in Ansätzen. Die Ursachen liegen in einer ungenügenden Leistungsfähigkeit der Steuerungssysteme, in für diese Problemstellung ineffizienten Bahnplanungsmethoden und in einem unzureichenden Funktionsumfang der Bewegungsprogrammierung begründet.

Der hohe Informationsverarbeitungsaufwand zur Steuerung moderner Produktionssysteme und die Forderung nach Flexibilität haben zu einer Strukturierung in organisatorisch und räumlich zusammengehörigen Fertigungszellen geführt [110]. Die zu lösenden Problemstellungen besitzen einen hohen Softwareanteil, der die speziellen Ausprägungen der einzelnen Produktionssysteme aufweist [38]. Nicht nur die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Komponenten und Systeme ist relevant für einen effizienten Ablauf in einer flexiblen Fertigungszelle, sondern eine Integration aller Bestandteile in ein umfassendes Gerätesteuerungssystem muß gewährleistet sein. Hierbei stehen die Steuerung, Koordination und Programmierung der Komponenten, die Anbindung an die Leit- und Steuerungsebenen der Fertigung sowie die Überwachung des Fertigungsablaufes und der Qualität im Vordergrund. Unter diesen Gesichtspunkten erlangt die Bereitstellung von adäquaten Schnittstellen für die datentechnische Verbindung der Komponenten einer flexiblen Fertigungsumgebung eine besondere Bedeutung [99].

Die Leistungsfähigkeit und die Flexibilität von Fertigungsanlagen mit Industrierobotern kann oftmals in der angestrebten Form nur durch die Integration von Sensoren und darauf beruhender Steuerungsstrategien erzielt werden [31]. Eine direkte Beeinflussung und Überwachung der qualitäts- und prozeßbestimmenden Parameter ist durch eine sensorgestützte Führung des Fertigungsprozesses möglich [83]. Komplexe Abläufe in der Fertigung bedürfen Sensornetze zur Erfassung werkstückspezifischer Parameter, wie Art, Form und Lage. Probleme und Defizite bestehen hierbei in der Verfügbarkeit geeigneter kostengünstiger Sensoren, die den hohen Anforderungen nach einer leistungsfähigen Signalgewinnung und -verarbeitung genügen, und deren Integration in die Gerätesteuerung über leistungsfähige Schnittstellen [47].

Für die Montage und Handhabung von Werkstücken finden überwiegend spezifische Werkzeuge Einsatz, die somit die Flexibilität der Industrieroboter bestimmen. Eine Erhöhung des Einsatzspektrums wird durch eine Austauschbarkeit der Werkzeuge und durch Multifunktionsgreifer erzielt [131]. Flexible Greifermechanismen finden hierfür nur einen geringen Einsatz.



*Bild 1: Einflussfaktoren auf die Konzeption von Fertigungszellen mit kooperierenden Robotern*

Die Zielsetzung dieser Arbeit soll es somit sein, durch den Einsatz kooperierender Roboter und der Integration von Sensorik Potentiale aufzuzeigen, die dazu führen, eine weitere Flexibilisierung und Automatisierung von Bearbeitungs- und Montagetechnologien zu erzielen bzw. diese sicherer und in höherer Qualität auszuführen. Aufgaben, die sich mit dem Bewegungsvermögen

einzelner Industrieroboter nicht oder nur unzureichend erfüllen lassen, können durch den Einsatz von kooperierenden Industrierobotern gelöst werden. Einsparungspotentiale liegen darüber hinaus in einer Vereinfachung der Peripheriekomponenten einer roboterintegrierten Montageanlage und einer Verkürzung der Prozeßzeiten durch gleichzeitige Ausführung der Operationen durch zwei Roboter.

Der mechanische Aufbau kooperierender Industrieroboter ist auf der Basis industriell verfügbarer Komponenten unproblematisch realisierbar. Zur Steuerung eines derart komplexen Fertigungssystems sollen effiziente und leistungsfähige Bewegungsverfahren und Steuerungsalgorithmen auf der Basis der Analyse fertigungstechnischer Anforderung entwickelt werden. Der zu konzipierenden Gerätesteuerung der Roboter obliegt die Aufgabe der Ausführung der autonomen und kooperierenden Bewegungen unter Nutzung von Multitasking- und Multiprozessingeigenschaften des Systems. Insbesondere die Frage einer möglichen Kollision zwischen den eingesetzten Robotern gilt es zu analysieren. Zur Koordination und Steuerung des Ablaufes innerhalb der Fertigungszellen soll ein Zellensteuerungssystem entworfen werden, welches seine universelle, konfigurierbare Struktur aufweist und eine anwendungsnahe Programmierung der Abläufe ermöglicht. Sowohl die Bereitstellung leistungsfähiger Schnittstellen und Funktionen innerhalb der Steuerungen als auch die Integration zu einem Gesamtsystem sind hierbei ein entscheidender Faktor.

Resultierend aus den den Anforderungen nach Flexibilität und sicherer Beherrschung des Prozesses bedürfen moderne Steuerungssysteme der Integration von Sensordaten. Durch den Aufbau von Sensorregelungen können Prozeßparameter on line beeinflußt werden, wozu sowohl regelungstechnische als auch steuerungstechnische Gesichtspunkte zu betrachten sind. Für diese Anwendungen ist es erforderlich, zur Aufnahme der Prozeßgrößen leistungsfähige und kostengünstige Sensoren zur Verfügung zu stellen. Der Einsatz angepaßter Systeme auf der Basis einfacher Sensoren bietet hier Lösungsmöglichkeiten, mittels intelligenter und konfigurierbarer Auswertesysteme leistungsfähige Profilsensoren zu entwickeln.

Die Defizite der Erfassung von Anwesenheit, Lage und Orientierung der Werkstücke sollen durch den Entwurf eines geeigneten flexiblen Lasersensors für die Steuerung des Zellenablaufes und der Überwachung der Qualität überwunden werden. Mit einem derartigen Sensorsystem können in einer universellen Weise Abstands- und Oberflächeninformationen gewonnen werden, wodurch ein erhebliches Einsparungspotential bei gleichzeitiger Erhöhung der Flexibilität der Anlagen zu erzielen ist.

Die bisher für automatisierte Montageoperationen kennzeichnende geringe Flexibilität der Greifmechanismen soll durch den Aufbau eines mehrgliedrigen Fingergreifers, dessen Leistungsvermögen aus manuellen Montagetätigkeiten abgeleitet wird, verbessert werden. Anwendungsnahe Steuerungsfunktionen und die Integration einer zusätzlichen Kraftsensorik werden für einen effizienten Einsatz des flexiblen Greifers entworfen.

## **2 Charakterisierung flexibler Fertigungseinrichtungen mit mehreren Robotern**

Das Einsatzpotential kooperierender Roboter in der Fertigung, aber auch in anderen Gebieten der Technik, ist, bedingt durch neue technologische Möglichkeiten und einer Flexibilisierung von Montage- und Bearbeitungsvorgängen, beachtlich. Ausgehend von den Einsatzgebieten und den verschiedenen Formen der Anordnung und Steuerung von Systemen mit mehreren Robotern soll der Entwicklungsstand derartiger Systeme charakterisiert werden. Auf der Grundlage der Anforderungen der Fertigungstechnik an kooperierende Robotersysteme wird der notwendige Bewegungsumfang unter Berücksichtigung technologiespezifischer Bedingungen dargestellt. Ausgehend hiervon wird die Zielsetzung dieser Arbeit formuliert.

### **2.1 Entwicklungstendenzen und Formen der Bewegungssteuerung**

#### **2.1.1 Begriffsbestimmungen**

Das Interesse an Anordnungen mit mehreren Robotern hat in den letzten Jahren stark zugenommen und geht mit dem fortschreitenden Einsatz von Robotersystemen in den verschiedenen Bereichen der Technik einher. Die interessierenden Anwendungen erstrecken sich über die Produktionstechnik hinaus auf Gebiete, wie dem Einsatz in gefährdeter und extremer Umgebung, im Weltraum oder unter Wasser. Gemein ist all diesen Bestrebungen, daß durch den Einsatz von mehreren Robotern eine Manipulationsfähigkeit erreicht werden soll, die der eines Menschen oder auch einer Gruppe angenähert ist.

Bei den Arbeiten zu diesem Themengebiet ist keine feststehende begriffliche Bestimmung der jeweiligen Systeme zu verzeichnen. Für die Anordnung von mehreren Robotern finden die Begriffe „Multiple Robots“, „Kooperierende Roboter“ oder „Redundante Kinematik“ Verwendung [25, 61, 82]. Diese Bezeichnungen korrelieren nur unscharf mit den Fähigkeiten, die von den jeweiligen Systemen zu erwarten sind. Besonders die Ausdrücke „kooperierend“ und „multiple“ werden oftmals synonym verwendet. Man kann hierunter Anordnungen von mehreren Robotern verstehen, deren Leistungsfähigkeit von einer einfachen Synchronisation von zwei getrennten Aufgaben bis hin zu einer koordinierten Bewegungsführung reicht. Mit dem Terminus „redundant“ verbindet sich die Absicht, durch eine Erhöhung des Freiheitsgrades eines Manipulators die Bewegungsfähigkeit zu verbessern. Der Aufbau, ähnlich einer Gliederkette, ermöglicht das Umfahren von Hindernissen oder eine verbesserte Erreichbarkeit beim Greifen von Objekten.



Bisherige Begriffsbestimmungen fordern von kooperierenden Robotern, daß diese aus mehreren Manipulatoren bestehen, die in der Lage sind, zusammenzuarbeiten und komplexe Operationen auszuführen [89]. Darüber hinaus wird in [78] der Aspekt der Vermeidung von Kollisionen und in [35] eine zentrale Steuerung als Merkmal für kooperierende Roboter ergänzend angeführt.

Zusammenfassend soll für diese Arbeit der Terminus „Kooperierende Industrieroboter“ wie folgt definiert werden:

*„Kooperierende Industrieroboter sind eine Anordnung von mindestens zwei Industrierobotern, die die Fähigkeit besitzen, aufeinander abgestimmte räumlich und zeitlich koordinierte Bewegungen und Aktionen durchzuführen.“*

Besonderes Augenmerk wird hierbei auf die Eigenschaft der räumlich und zeitlich aufeinander in Einklang gebrachten Aktionen gelegt. Dies umfaßt Aufgaben, die von einer Synchronisation einzelner Handhabungsvorgänge bis hin zu einer Manipulation von Objekten durch mehrere Roboter reichen.

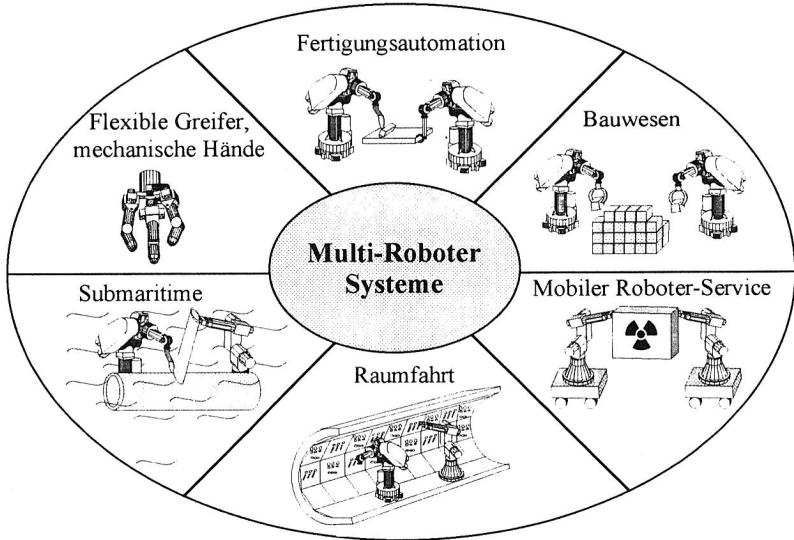
### 2.1.2 Einsatzfelder

Die Anwendungsfelder von mehreren zusammenarbeitenden Robotern erstrecken sich über eine erhebliche Anzahl von technischen Bereichen. In vielfältigen Arbeiten zu diesem Themenfeld wird der Bereich der industriellen Fertigung als potientes Einsatzgebiet angegeben. Hierbei wird besonders eine Verbesserung bisheriger Industrieroboterlösungen, aber auch die Anwendung in neuen Technologien angestrebt. Insbesondere im Bereich der Montage, dem ein starkes Wachstum des Einsatzes von Industrierobotern vorausgesagt wird [118], als auch Gebiete mit hohem Industrierobotereinsatz, wie z.B. die Schweißtechnologie, sind hierfür von Interesse. Eine eingehende Betrachtung diesbezüglich erfolgt in Kapitel 2.2.

Andere produzierende Bereiche, wie beispielsweise die Bauwirtschaft, sind durch einen geringen Grad des Einsatzes von Manipulatoren zum Handhaben von Material und der Durchführung von Tätigkeiten gekennzeichnet [94]. Das ist einerseits in einer nur schwer zu strukturierenden Aufgabenstellung als auch in den noch unzureichenden technischen Voraussetzungen begründet. Durch die Verwendung von mehreren Roboterkinematiken kann die erforderliche Manipulationsfähigkeit zum Ausführen von Bautätigkeiten bei einer geeigneten Größe der eingesetzten Geräte erreicht werden. Die Einsatzfähigkeit von mehreren zusammenarbeitenden mobilen Robotern für den Innenausbau wurde in [66] untersucht.

Besonders mobile kooperierender Roboter können auf den Gebieten der Nukleartechnik oder des Katastrophenschutzes Einsatz finden. Hierbei sind komplexe Handhabungsoperationen in für Menschen gefährdeter Umgebung vorherrschend. Die eingesetzten Systeme können sowohl autonom operierend als auch als mobile Telemanipulatoren ausgeführt sein. Durch den Einsatz von mehreren Robotern ist es möglich, größere und schwerere Objekte zu manipulieren und komplizierte Operationen auszuführen. Darüber hinaus eignen sich derartige Systeme zur

Durchführen von Tätigkeiten, die den Menschen durch ihre Schwere oder Monotonie schwer belasten würden [117].



*Bild 2: Einsatzmöglichkeiten von kooperierenden Robotern*

Vor allem unter Kostengesichtspunkten tendiert die Raumfahrt stärker zu unbemannten Missionen. Um die gewünschten, zum Teil von Menschen ausgeführten Operationen durch entsprechende Manipulatoren verrichten zu können, sind intelligente und kooperierende Systeme notwendig. Die zu lösenden Aufgaben umfassen das Handling von Objekten, die Bedienung von Geräten oder die Ausführung von Reparaturen. Die Steuerungen müssen für diese Aufgaben sowohl autonome wie auch operatorgesteuerte Tätigkeiten in Verbindung mit räumlicher oder auch sensorischer Kopplung unterstützen [45].

Submaritime Anwendungen, wie das Errichten und die Instandhaltung von Anlagen, das Verlegen von Nachrichten- oder Energieverbindungen oder der Bau von Pipelines, bilden für kooperierende Roboter einen anspruchsvollen Einsatzbereich [91]. Durch kooperierende Manipulatoren können diese Arbeiten sehr viel effizienter und in höherer Qualität ausgeführt werden.

Eine besondere Ausprägung kooperierender Kinematiken stellen flexible mehrfingerige Greifer oder auch mechanische Hände dar. Hierbei wird versucht Manipulatoren zu schaffen, die sich durch eine hohe Manipulationsfähigkeit auszeichnen. Sie können Einsatz für Roboter oder auch als Prothesen finden. Vorbild für Entwicklungen auf diesem Gebiet bildet die menschliche Hand [109]. Folglich gleicht der Aufbau dieser Greifer, vor allem in der Anzahl der Finger und

der Gelenke, oftmals der Hand. Der besondere Anspruch dieser Entwicklungen besteht in der aufwendigen Konstruktion der einzelnen Teile, der notwendigen Antriebstechnik und in der Steuerung einer hoch redundanten Kinematik.

Gemeinsames Merkmal dieser Anwendungen von kooperierenden Robotern ist, daß mehrere Manipulatoren in der Art gesteuert werden, daß sie in der Lage sind, gemeinsame Aktionen und koordinierte Bewegungen auszuführen. Vorteile bieten sich hierbei dadurch, daß mit mehreren Robotern Tätigkeiten einfacher als mit einem einzigen auszuführen sind. Gleichzeitig ist eine Vereinfachung der Systeme und eine größere Fehlertoleranz durch das Nutzen von Redundanzen gegeben.

### 2.1.3 Formen der Zusammenarbeit in Systemen mit mehreren Robotern

Das Zusammenwirken der einzelnen Teilsysteme in einer Anordnung mehrerer zusammenarbeitender Roboter kann sich vielgestaltig darstellen und ist dabei eng mit den Anforderungen der beabsichtigten Anwendung verknüpft. Kennzeichnend für eine Einteilung derartiger Systeme sind der Intelligenzgrad der Einzelsysteme, die möglichen Interaktionen, die notwendigen Kommunikationsbeziehungen und das Verhalten der einzelnen individuellen Robotereinheiten zum Erreichen des beabsichtigten Gesamtzieles. Ausgehend von diesen Kriterien wurde in [128] eine Klassifizierung angegeben, die im folgenden betrachtet werden soll, wobei der Bezug zu natürlichen Systemen bewußt gewählt wurde.

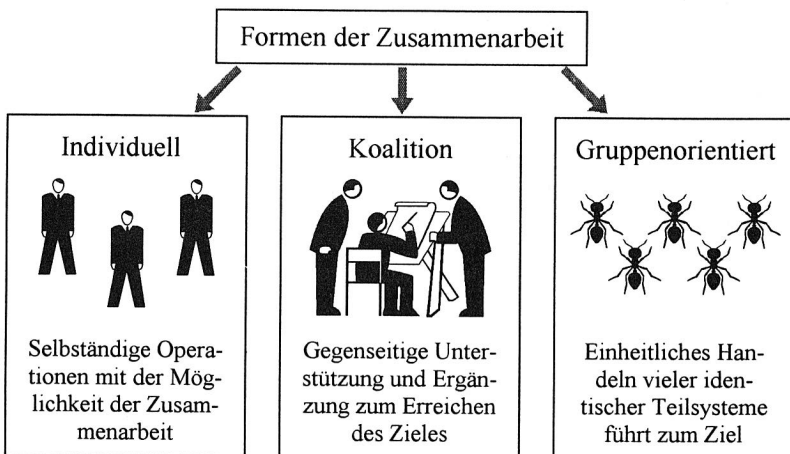


Bild 3: Analogiebeziehungen von natürlichen Systemen mit Formen der Zusammenarbeit von mehreren Robotern

### **Individuell**

Ein hohes Maß an Intelligenz der einzelnen Robotereinheiten ist kennzeichnend für eine weitgehend selbständige und individuelle Ausführung der gestellten Aufgaben. Für Funktionen, die nicht allein erfüllt werden können, besteht die Möglichkeit, über entsprechende Kommunikationskanäle mit anderen Robotern Verbindung aufzunehmen und die geforderte Tätigkeit durchzuführen. Dieses Verhalten läßt sich mit mehreren selbständig arbeitenden Menschen vergleichen.

Derartig individuell strukturierte Robotersysteme zeichnen sich dadurch aus, daß die gestellten Aufgaben effektiv bearbeitet werden können und bei Ausfall einzelner Teilsysteme eine Redundanz durch die Übernahme der Tätigkeiten durch andere Einheiten besteht. Auf diesem Gebiet untersuchte Probleme umfaßten die Bereiche der Steuerungsstrukturen, der Kommunikation und der Koordination der einzelnen Teilsysteme [53]. Außerdem spielen die optimale Verteilung der Teilaufgaben auf die Roboter und die Vermeidung von Kollisionen eine wesentliche Rolle. Besonders diese Art der Zusammenarbeit ist für kooperierende Industrieroboter in der Fertigungsautomatisierung relevant.

### **Koalition**

Koalierende Multirobotersysteme sind auf die Zusammenarbeit mit anderen Robotern des Gesamtsystems angewiesen. Die einzelnen Robotereinheiten besitzen jeweils unterschiedliche Eigenschaften und Fähigkeiten, hinsichtlich ihres Bewegungs- und Manipulationsvermögens. Diese Einheiten können mobile Module, Roboterarme oder Werkzeuge sein. Zur Erfüllung einer Aufgabe bilden diese Einzelelemente Gruppen und führen die geforderten Tätigkeiten aus, wie dies für Arbeitsgruppen typisch ist. Die Steuerung des Ablaufes wird dabei durch einen ausgewählten Master übernommen. Der Nachteil derartiger Anordnungen ist die Tatsache, daß bei Ausfall eines Teilsystems die gesamte Erfüllung der Aufgabenstellung gefährdet ist. Anwendung sollen derartige Systeme im Weltraum oder innerhalb einer automatisierten Produktion, für Transport- oder Fertigungsaufgaben, finden [37, 42].

### **Gruppenorientiert**

Für arbeitsaufwendige Tätigkeiten sind Robotersysteme notwendig, die aus einer Vielzahl von Einzelrobotern bestehen, die jeweils die gleiche Aufgabe erfüllen. Gekennzeichnet sind derartige Roboter durch einen gleichen Steuerungsaufbau und -algorithmus. Die Aufgabe wird bei dieser Art kooperierender Systeme von den separaten Einheiten selbständig und zum Teil ohne gegenseitige Kommunikation [3] an Hand des gegebenen Algorithmus und von Umgebungsinformationen ausgeführt.

Derartige Systeme sind vergleichbar mit Schwärmen von Lebewesen, die alle gemeinsam durch gleiches Handeln zu einem einheitlichen Ziel beitragen, wie es beispielsweise bei Ameisenvölkern der Fall ist. Untersuchungen zum Verhalten derartiger Lebewesen fließen in entsprechende Untersuchungen mit ein [14]. Vorteil einer solchen Anordnung von Robotern ist der

geringfügige Einfluß des Ausfalls einzelner Teilkomponenten für das Erreichen des Endergebnisses. Typische Anwendungsmöglichkeiten derartiger Multirobotersysteme ergeben sich bei der Lösung von Transportaufgaben, durch den Einsatz einer Vielzahl von mobilen Einheiten oder beim Bau von Anlagen in unterschiedlichen Umgebungen [14].

### 2.1.4 Analyse der Steuerungssysteme

Das Kernproblem eines Systems, bestehend aus mehreren Robotern, ist die Konzeption der erforderlichen Komponenten und Funktionen, die Art und Weise der Steuerung und die Form der Zusammenarbeit der Teilsysteme untereinander. Die große Anzahl von Gesichtspunkten zu diesen Problemen dokumentieren sich in einem erheblichen Umfang von Arbeiten zu diesen Forschungsgebieten. Dabei wurden sehr intensive, vor allem theoretisch fundierte Untersuchungen durchgeführt, die sich allerdings nur in einer geringen Anzahl von praktischen oder gar industriellen Anwendungen widerspiegeln [145]. Begründet ist dies überwiegend in einem Fehlen offener und leistungsfähiger Steuerungssysteme mit geeigneten Schnittstellen. Für eine Realisierung der Systeme mußten eigene Steuerungen erstellt werden [48].

Die Analyse der Steuerungssysteme für Anordnungen mit mehreren Robotern kann grundsätzlich nach drei Gesichtspunkten erfolgen:

- Was wird gesteuert und welche Aufgaben sind zu erfüllen?
- Wie wird das System gesteuert, d.h. welche Strukturen werden gewählt?
- Welche Funktionen und Komponenten sind zur Sicherung der geforderten Leistungsfähigkeit notwendig?

#### Steuerungsaufgaben

Für Multirobotersysteme können unterschiedliche Aufgabenfelder innerhalb eines hierarchisch gegliederten Steuerungssystems charakterisiert werden. Hierzu ist es möglich, eine Strukturierung in drei Ebenen [106] vorzunehmen (Bild 4).

Auf einem hohen Niveau werden in Mehrrobotersystemen die gestellten Aufgaben innerhalb der Ebenen der *Organisations- und Taskspezifikation* bearbeitet. Mit Hilfe planerischer Hilfsmittel wird eine effektive Durchführung aller Operationen aus der Sicht der zu lösenden Aufgaben angestrebt. Die vorgegebenen Abläufe sind dahingehend zu untersuchen, wie sie in einer optimalen Art und Weise auf die zur Verfügung stehenden Roboter verteilt werden können, so daß eine gute Auslastung des Gesamtsystems ermöglicht wird [69, 103]. Dies erfolgt durch Optimierung der Reihenfolge der einzelnen Aufträge oder auch durch die Bildung von Unteraufträgen. Zudem gilt es, die zur Verfügung stehenden peripheren Ressourcen optimal auszunutzen und sie den Robotern entsprechend deren Fähigkeiten zuzuordnen. Die Planung des Ablaufes, ausgehend von einer Ausgangssituation hin zu einem zu erzielenden Endzustand, wird unter Zuhilfenahme von Grafendarstellung, durch Petri-Netze oder auch durch Programmiersprachen realisiert [85, 87]. Als potientiell Anwendungsfeld dieser aufgabenorientierten Planungssysteme wird oftmals die automatisierte Montage angesehen [7, 103].

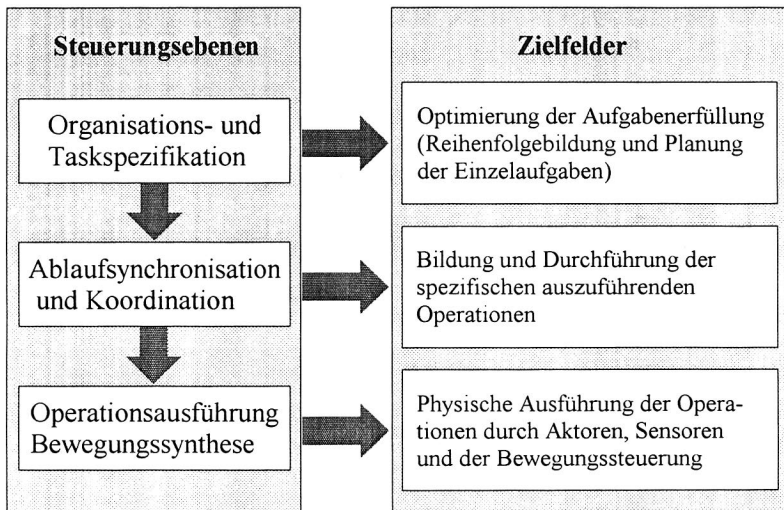


Bild 4: Strukturierung einer Steuerung von mehreren Robotern

Auf der Hierarchiestufe der *Ablaufsynchronisation* und *Koordination* werden die Interaktionen zwischen den einzelnen Teilsystemen eines Mehrrobotersystems und der Umgebung aufeinander abgestimmt. Ausgehend von der gestellten Aufgabe erfolgt eine Unterteilung in einzelne ausführbare Aktionen, wie „Bewegen“, „Greifen“ oder „Warten“ [7]. Aus diesen beschriebenen Abläufen werden die notwendigen Bewegungen erzeugt [69, 87]. Hierbei stehen Probleme der Optimierung dieser Bahnen im Vordergrund, die beispielsweise an Hand der „Traveling Salesman“-Methode gelöst werden [89]. Unter Einbeziehung von zusätzlichen Sensorinformationen lassen sich weitere aktuelle Kriterien für die Steuerung des Ablaufes gewinnen.

Gleichzeitig erfolgt in dieser Ebene die Verwaltung des Zugriffs auf die zur Verfügung stehenden Ressourcen [103] und die Erkennung von Dead-Look-Situationen im Ablauf der Aufgabenausführung oder der Bewegungsplanung [86]. Die Detektion dieser Konfliktsituationen kann mit Hilfe von Methoden der Graphentheorie oder durch die Angabe von Kriterien des Auftretens von Dead-Look-Situationen erfolgen. Hiervon ausgehend werden Maßnahmen zur Lösung dieser Situationen ergriffen.

Wesentlicher Bestandteil der Koordinationsebene ist die Erzeugung von kollisionsfreien Bahnen. Mit Hilfe mathematischer Modelle der Umgebung und der Roboter wird innerhalb einer vorgegebenen Umgebung eine kollisionsfreie Bahn ermittelt. Eine vorgegebene Bewegung kann auf deren Kollisionsfreiheit überprüft und gegebenenfalls durch eine neue Bahnvorgabe ersetzt werden [87, 106].

Die unmittelbare Durchführung aller Aufgaben erfolgt innerhalb der Ebene der *Operationsausführung und Bewegungssynthese*. Sie beinhaltet die Aktoren, die Funktionen der Bahnenergieung und die Überwachung der Umgebung. Ebenfalls Bestandteil dieser Ebene sind die zur Ausführung der Aufgabenstellung notwendige Erfassung von Sensorsignalen und die On-line-Kollisionsvermeidung.

**Steuerungsstrukturen**

Die Art der von einem System mehrerer Roboter auszuführenden operativen Aufgaben bestimmt wesentlich die Steuerungsstruktur. Ausgehend vom Prinzip des Zusammenwirkens der einzelnen Roboter (Kap. 2.1.3) und der beabsichtigten Anwendung können signifikante Steuerungsformen charakterisiert werden. Hierbei lassen sich, vergleichbar mit gleichgelagerten technischen Aufgabenstellungen, drei Strukturformen der Steuerung von Mehrrobotersystemen spezifizieren (Bild 5) [128].

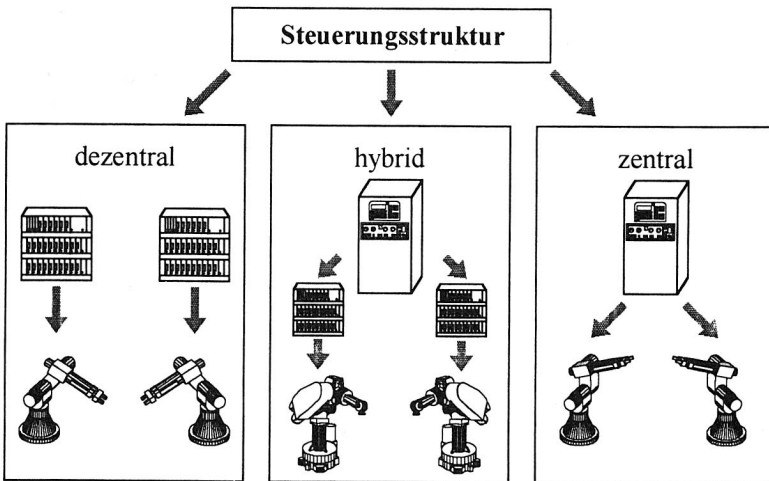


Bild 5: Steuerungsstrukturen von Mehrroboteranordnungen

Zentral organisierte Strukturen zeichnen sich durch die Ausführung der notwendigen Steuerungsfunktionen in einer gemeinsamen Einheit aus. Hierbei hat ein entsprechender Schedulingmechanismus die Aufgabe, einzelne Operationen auf die jeweiligen Robotereinheiten zu verteilen sowie deren Ausführung zu steuern und zu überwachen. Alle Ebenen der Steuerungshierarchie sind hier in einer Einheit konzentriert, wobei sämtliche Informationen über die einzelnen Roboter innerhalb der zentralen Steuerung bekannt sein müssen. Für die Ausführung der Steuerungsfunktionen ist eine leistungsfähige Rechnerarchitektur notwendig. Besonders geeig-

net ist diese Struktur für Aufgaben, bei denen ein hohes Maß an Zusammenarbeit und Kooperation vorhanden ist [37, 128].

Eine Verteilung der Intelligenz auf mehrere lokale Steuerungseinheiten führt zu *dezentralen* Strukturen im Steuerungsaufbau. Verschiedene Operationen der Kooperation und Synchronisation und einfache Bewegungsfunktionen werden durch die jeweilige Robotereinheit selbst ausgeführt. Einzig die globale Steuerungsaufgabe wird zentral bzw. außerhalb des Systems vorgegeben. Durch eine Reduktion des Informationsaustausches zwischen den Robotereinheiten auf die Daten der Synchronisation und Koordination kann hier in Abhängigkeit der Aufgabe ein geringes Kommunikationsaufkommen erreicht werden. Lokale Entscheidungen sind zudem schneller zu fällen, und es bestehen geringere Anforderungen an die Rechenleistung der Steuerungen. Die Komplexität der Abläufe in einem derartigen dezentralen System nimmt gegenüber einer administrativ, zentral organisierten Struktur jedoch zu [61].

Betrachtet man demgegenüber realisierte Systeme, so ist festzustellen, daß eine klare Strukturierung nach zentraler oder dezentraler Anordnung nicht gegeben ist. Hierbei handelt es sich um kombinierte Formen aus diesen, die als *hybride* Strukturen bezeichnet werden können. Es wird versucht, spezifische Vorteile der zentralen oder dezentralen Struktur auf bestimmten Stufen der Steuerungshierarchie auszunutzen [78]. Die höheren Ebenen der Hierarchie, wie Verteilung, Planung, Steuerung und Koordination der Aufgaben, werden zentral realisiert. Bewegungsführung und Sensorintegration erfolgen jedoch in dezentralen Einheiten. Die Unterteilung ist stark vom Grad der Kooperation zwischen den einzelnen Robotern abhängig. So bedingen enge Verbindungen der Abläufe überwiegend zentrale Steuerungsstrukturen, wohingegen autonome Aufgaben vornehmlich mit Hilfe dezentraler Strukturen realisiert werden.

### **Steuerungskomponenten**

Gegenüber Systemen mit nur einem Roboter besitzen Steuerungen für mehrere Roboter wesentlich erweiterte Funktionen und Komponenten, deren effizientes Zusammenwirken von entscheidender Bedeutung für eine leistungsfähige Realisierung der gestellten Aufgaben ist. Die wesentlichen Bestandteile einer derartigen Anordnung sind durch die durchzuführenden Aufgaben gekennzeichnet.

Wie in Bild 6 dargestellt, überwiegt für Steuerungssysteme für mehrere Roboter eine hierarchische Struktur der Steuerungskomponenten, wobei die Querbeziehungen besonders das Zusammenwirken der aufgezeigten Steuerungsaufgaben erkennen lassen. Auf einem hohen Niveau der Steuerung sind Funktionen der Bewegungs- und Ablaufplanung angesiedelt. Hierbei ist die Ausführung von Operationen vorherrschend, die, ausgehend von einer bestimmten beschriebenen Aufgabe, ihre optimale Verteilung auf die zur Verfügung stehenden Geräte durchführt. Für diese Abläufe werden anschließend die notwendigen Bewegungsvorgänge, unter Zuhilfenahme von Softwarewerkzeugen, erzeugt [69, 87]. Mit Hilfe von Simulationswerkzeugen kann ausgehend von diesen erzeugten Bewegungen eine Überprüfung der Kollisi-



ongefahr stattfinden. Andererseits ist die direkte Bestimmung kollisionsfreier Bahnen möglich [106].

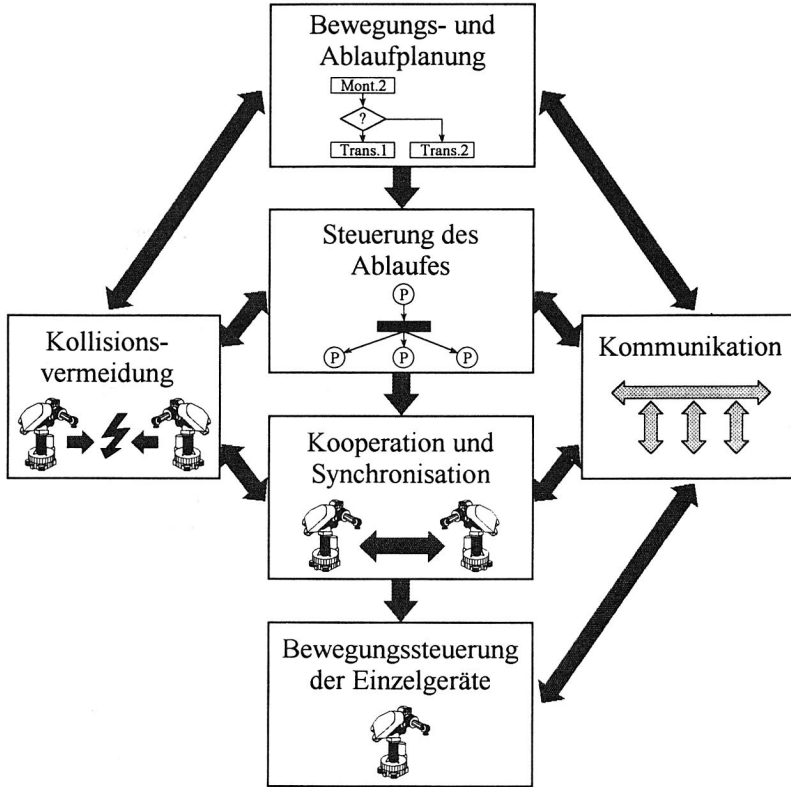


Bild 6: Bestandteile von Steuerungssystemen für kooperierende Roboter

Auf einer niederen Systemebene ist die Durchführung der spezifizierten Abläufe und der definierten Aufgaben zu steuern. Für diesen Zweck stehen die notwendigen Funktionalitäten zur Auslösung, Steuerung und Überwachung zur Verfügung. Diese Funktionen können durch ein hierfür entworfenes Dispatcher-Modul, welches die mittels Petri-Netzen definierten Abläufe ausführt, durch den Einsatz eines Schedulers oder auch durch Agentensysteme realisiert werden [130]. Diese haben die Aufgabe, entsprechend des aktuellen Zustandes des Systems und des vorgesehenen Ablaufes, die zur Verfügung stehenden Ressourcen zu verwalten und die bei der Zusammenarbeit von mehreren Robotern auftretenden Fehlersituationen mittels spezieller Methoden zu lösen [49]. Gleichzeitig können die im Ablauf auftretenden Deadlock-

Situationen erkannt und eliminiert sowie die Funktionen zur Vermeidung des Auftretens von Kollisionen integriert werden [61].

Die Ausführung der von der Ablaufsteuerung initiierten Operationen muß durch geeignete physische Funktionen der Kooperation und Synchronisation auf einer niederen Ebene der Steuerungshierarchie unterstützt werden. Die Realisierung der in Kapitel 2.1.5 aufgeführten Arten der Bewegungsführung kann durch diese Funktionen erfolgen. Eine besondere Art der Zusammenarbeit wird dadurch erreicht, daß mit Hilfe von Sensorinformationen die Vorgänge der einzelnen Roboter untereinander koordiniert werden. Gleichzeitig werden in dieser Ebene Probleme der On-line-Kollisionsvermeidung behandelt [36].

Die erforderlichen, auszutauschenden Koordinaten zwischen den einzelnen Robotern zur Erzeugung einer kooperierenden Bewegung und die Mechanismen zur Synchronisation der Abläufe bedingen hohe Anforderungen an die Kommunikationsfähigkeit der Steuerungskomponenten, besonders im Falle einer dezentralen Struktur. Die Untersuchung der zeitlichen Anforderungen und der Umfang der zu übertragenden Daten haben ergeben, daß besonders die Notwendigkeit einer deterministischen Datenübertragung mit der Nähe zur Bewegungssteuerung zunehmen [53, 78]. In diesem Zusammenhang konnte auch die Einsatzfähigkeit von lokalen Netzwerken bewertet werden [140].

Die Basis des Steuerungssystems für mehrere Roboter bildet die direkte Steuerung und Regelung der jeweiligen Robotereinheiten oder auch nur der einzelner Achsen. Gleichzeitig werden hier die Informationen über die aktuellen Zustände der Roboter und der Umgebung gewonnen.

### **2.1.5 Bewegungsvermögen kooperierender Kinematiken**

Durch den Einsatz von zwei oder mehreren Robotern kann ein wesentlich gesteigertes Bewegungsvermögen gegenüber Systemen mit nur einem Roboter erzielt werden. Daraus ergeben sich entsprechend der Leistungsfähigkeit der eingesetzten Systeme unterschiedliche Formen gemeinsamer Operationen. Es finden sich unmittelbare Analogien zwischen dem Aufbau von Steuerungssystemen mit mehreren Robotern (Kap. 2.1.4) und den von den jeweiligen Systemen realisierten Formen der Bewegungskoooperation. Die Klassifizierung der Zusammenarbeit kann somit nach den Gesichtspunkten des Kopplungsgrades und der kinematischen Beziehungen erfolgen (Bild 7).

#### **Ebenen der Zusammenarbeit**

Die Ebene der Zusammenarbeit und die Art der Erzeugung der Bewegungen sind ein wesentliches Merkmal für die Charakterisierung von gemeinsam operierenden Robotern. Von grundsätzlicher Bedeutung sind die Gestaltung der geometrischen Beziehungen zwischen den Bahnen der eingesetzten Roboter. Die Zusammenarbeit kann in eine unabhängige, synchrone oder räumlich koordinierte Kopplung untergliedert werden [93]. An dieser Stelle soll eine weitergehende Detaillierung vorgenommen werden.

Der Bezug der Formen der gemeinsamen Arbeit mit dem Aufbau von Steuerungssystemen von mehreren Robotern kann an Hand der in Bild 7 dargestellten Klassifikation erfolgen. Dabei wird zwischen aufgaben- und bewegungsorientierter Zusammenarbeit unterschieden. Die Funktionen der Aufgabenplanung erzeugen Teilabläufe, die von den Robotern unabhängig abzarbeiten sind. Es besteht somit nur eine lose Beziehung zwischen den durchzuführenden Tätigkeiten, so daß diese als weitestgehend unabhängig bezeichnet werden können. Ziel der Aufgabenplanung ist eine effiziente und zeitoptimale Durchführung der gestellten Aufgaben [89].

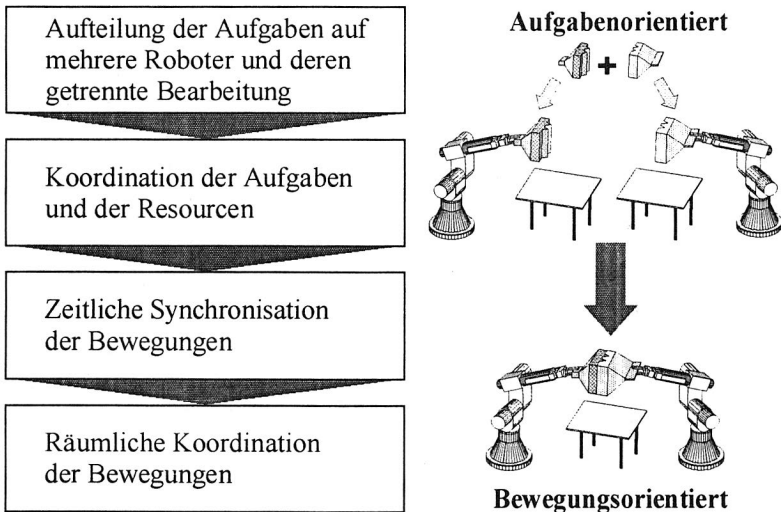


Bild 7: Formen der gemeinsamen Arbeit von mehreren Robotern

Eine engere Kopplung besteht, wenn zwischen den einzelnen Abläufen eine zeitliche Synchronisation erforderlich ist. Der Zugriff auf gemeinsame Ressourcen kann somit beispielsweise realisiert werden [89]. Hierzu müssen von der Steuerung nur grundlegende Funktionalitäten der Koordination zur Verfügung stehen.

Für vielfältige Anwendungen ist es ausreichend, eine zeitliche Kopplung von Bewegungsstart und -endpunkt herzustellen. Dabei werden Synchronisations- und Kommunikationsfunktionen benötigt, um Startzeitpunkt, Geschwindigkeit und Zeitdauer der Bahn abzustimmen.

Höchste Anforderungen an das Steuerungssystem und dessen Echtzeitverhalten werden gestellt, wenn die Bewegungen mehrerer Roboter räumlich koordiniert ausgeführt werden müssen. Hierbei bilden die Roboter eine geschlossene kinematische Kette, so daß an die Berechnung komplexer Bahnen hohe Anforderungen gestellt werden [124, 144].

### Formen der Generierung gekoppelter Bewegungen

Räumlich koordinierte Bewegungsbahnen können durch unterschiedliche Methoden erzeugt werden, wobei prinzipiell zwischen On-line- und Off-line-Generierung unterschieden werden kann (Bild 8). Im Falle einer Off-line-Erzeugung der Bewegung mit Hilfe eines entsprechenden Off-line-Programmiersystems besteht die Möglichkeit, komplexe Vorgaben an die zu erzielende Bewegungsbahn zu stellen [98]. Hierbei wird die ermittelte Bewegungsbahn in kurze Linearsätze zerlegt, so daß eine hinreichende Genauigkeit zur vorgegebenen Kontur erreicht wird [25].

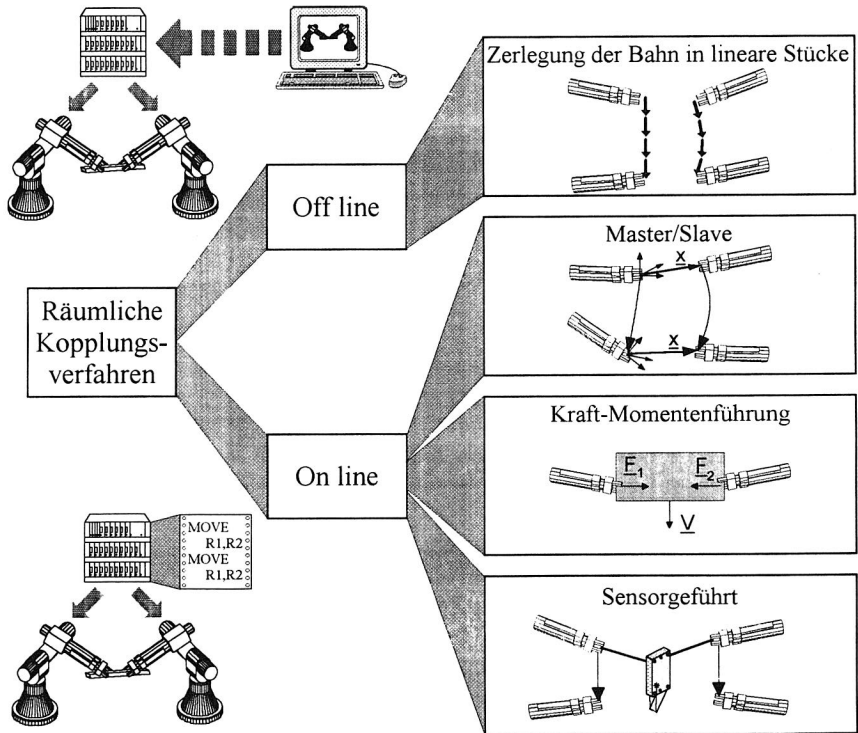


Bild 8: Arten der Generierung von gekoppelten Bewegungen

Diese Bewegungen können mit Hilfe industrieller Robotersteuerungen ausgeführt werden, die um Synchronisationsmöglichkeiten zwischen den eingesetzten Industrierobotern erweitert sind. Eine geringfügige Änderung des Bewegungsablaufes macht hierbei einen neuen Off-line-Programmievorgang notwendig und kann nicht unmittelbar an der Steuerung ausgeführt werden.

Demgegenüber werden die Bahnen bei einer On-Line-Generierung direkt durch das Steuerungssystem der kooperierenden Roboter erzeugt. Hierzu ist es notwendig, die Verfahren zur Interpolation und Bewegungserzeugung von heutigen Single-Roboter-Systemen wesentlich zu erweitern [93]. Diese Kopplung wird oftmals nach einem Master-Slave-Prinzip durchgeführt. Hierbei übernimmt ein Roboter die führende Rolle und fährt eine ihm vorgegebene Bewegungsbahn ab, zu der sich ein zweiter Roboter in einer festen oder einer veränderlichen Relation befindet [124, 144]. Hohe zeitliche Anforderungen werden hierbei an die Übertragung der Daten zwischen den Steuerungsmodulen und an die Verarbeitung der Koordinatenwerte gestellt.

Ausgehend von den Konzepten zur Steuerung von Robotern mittels hybrider Kraft-/Positionsregelungen gibt es Untersuchungen, derartige Algorithmen auch auf Systeme mit mehreren Robotern anzuwenden. Die Verfahren nutzen die Beschreibung des dynamischen Verhaltens der Roboter, um hieraus die Bewegungsbahn zu erzeugen. Somit ist gleichzeitig die Vorgabe einer räumlichen Bahn und die auf die Objekte und die Roboter einwirkenden Kräfte und Momente möglich [17]. Der Einsatz dieser Konzepte macht einen Stelleingriff für die Achsansteuerung auf Momentenebene des Antriebs erforderlich. Dies ist bei heutigen industriell verfügbaren Robotersteuerungen nicht möglich, da hier fast ausschließlich lagegeregelter Antriebssysteme zum Einsatz kommen.

Erfolgt eine Kopplung zwischen den einzelnen Robotereinheiten durch Sensorinformationen, so ist es möglich, auftretende Kräfte beim Halten und Manipulieren eines Objektes zu nutzen, um die Bewegung eines zweiten Roboters zu beeinflussen. Gleichzeitig können auch Abstände zu Bezugsobjekten zur Kopplung genutzt werden. Hierbei erfolgt die Zusammenarbeit nur mittels Sensorinformationen. Die notwendig Steuerungsfunktionalität wird von jedem Roboter autonom durchgeführt [23, 68].

### **Kinematische Beziehungen bei räumlicher Kopplung**

Kooperierende Robotersysteme sind in der Lage, unterschiedliche Formen räumlich gekoppelter Bewegungen auszuführen. Diese lassen sich nach den Anforderungen an die geometrischen Bindungen der Roboter untereinander klassifizieren (Bild 9). Für vielfältige Anwendungen, wie das Manipulieren von biegeschläffen Teilen [16], ist die Einhaltung von exakten räumlichen Beziehungen zwischen den Robotern auf Grund zulässiger Toleranzen der Technologie nicht erforderlich. Diese Bahnen werden durch eine absolute Vorgabe der Raumpunkte beschrieben, und können durch einen Abgleich des Startzeitpunktes und der Geschwindigkeiten zum gleichzeitigen Erreichen der Endpunkte ausgeführt werden.

Für eine eng gekoppelte Bewegung kann von der in [144] angegebenen Systematik ausgegangen werden. Prinzipiell wird hierbei zwischen dem Beibehalten oder einer Veränderung der geometrischen Beziehung zwischen den Manipulatoren während der Bewegung unterschieden. Für die Manipulation eines festen Körpers durch zwei Roboter

wurden besonders die Problemstellungen einer geschlossenen kinematischen Kette und der am Objekt auftretenden Kräfte näher betrachtet [17].

Wird die geometrische Beziehung zwischen den Robotern während der Bewegung verändert, so ist eine zusätzliche Bewegungsgenerierung erforderlich. Für eine Master-Slave-Beziehung kann die Bewegung des Slaves relativ zum Master durch einen zusätzlichen Interpolator erzeugt werden [124]. So ist es möglich, die Montage von zwei Teilen während einer Bewegung auszuführen.

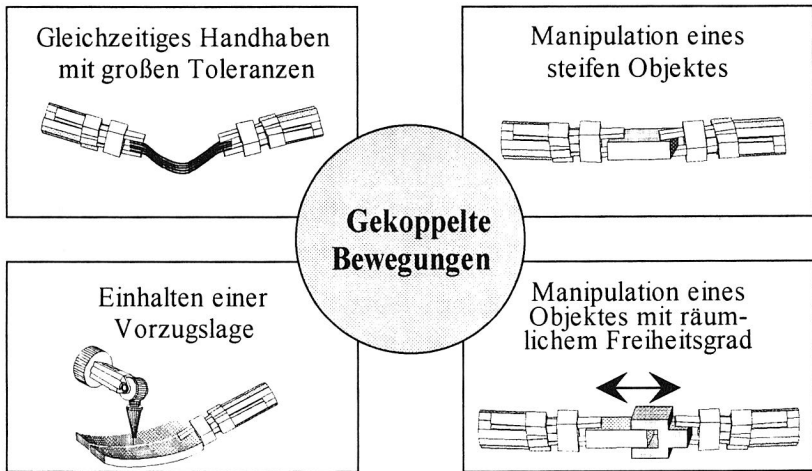


Bild 9: Geometrische Beziehungen für koordinierte Bewegungen

Für industrielle Einsatzfälle, wie der Schweißtechnologie, ist es notwendig, daß ein Roboterwerkzeug eine definierte Lage während der Bewegung einhalten muß. Hierbei kann eine bestimmte Koordinatenrichtung, beispielsweise eine Orientierung, beibehalten werden, wohingegen andere Koordinaten veränderlich sind [25, 98]. Derartige Bewegungsbahnen werden derzeit meist off line erstellt.

## 2.2 Situationsanalyse des Einsatzes in der Fertigungsautomatisierung

### 2.2.1 Nutzenpotentiale von kooperierenden Robotern

Trotz der derzeit noch geringen praktischen Bedeutung von kooperierenden Robotern in der Fertigung besitzen derartige Systeme ein entscheidendes Verbesserungspotential gegenüber einer herkömmlichen, auf den Einsatz eines separat agierenden Roboters abgestimmten Ferti-

gungsumgebung. Obwohl die Anwendung von kooperierenden Handhabungseinrichtungen hohe technische Anforderungen an die Gerätetechnik stellt, ist es möglich, auch unter Kostengesichtspunkten interessante Lösungen aufzuzeigen. Bei der Analyse des Nutzenpotentials können sowohl technische, organisatorische als auch wirtschaftliche Gesichtspunkte in Betracht gezogen werden (Bild 10).

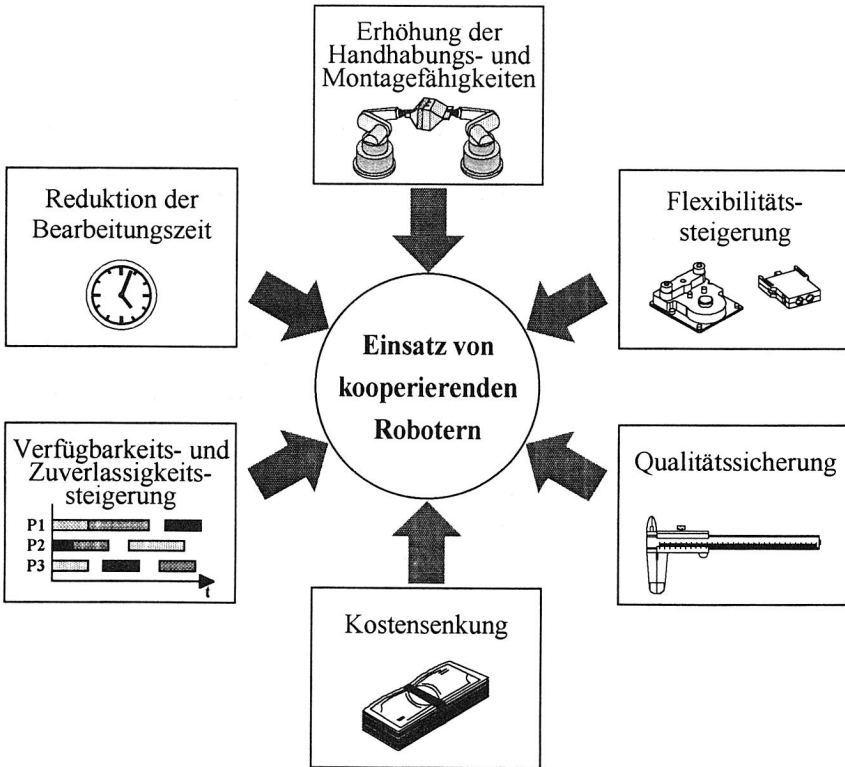


Bild 10: Nutzenpotentiale von kooperierenden Robotern in der Fertigungsautomatisierung

Grundsätzlich begründet sich der Nutzen kooperierender Roboter auf deren wesentlich erweitertes Bewegungsvermögen und das Vorhandensein von mehreren Manipulatoren. Verglichen werden kann dies mit von Menschen vollzogenen Tätigkeiten, die anstatt mit einer Hand, mit zwei Händen ausgeführt werden. Spezifische Handhabungsaufgaben, wie das Manipulieren von forminstabilen Teilen, wie Kabel oder Schläuche, sind besonders geeignet für eine Realisierung mit kooperierenden Robotern [16].

Anspruchsvolle Montageaufgaben bedingen die gleichzeitige Ausführung der Operationen durch zwei Greifer. Hierbei dient entweder ein Roboter zum Halten des Teiles, oder die Montage wird während der Bewegung ausgeführt [124]. Darüber hinaus ist durch die mögliche Bewegung von Werkstück und Werkzeug eine verbesserte Zugänglichkeit von Montage- oder Bearbeitungsstellen gegeben [82]. Auch Tätigkeiten, wie das Wenden der Werkstücke während der Bearbeitung ohne zusätzliche Hilfseinrichtungen, sind auf diese Weise einfach auszuführen [93].

Für Füge-technologien, wie dem Schweißen in Wannenlage oder dem Kleben, sind bestimmte Lagen von Werkzeug zum Werkstück oder von vorgegebenen räumlichen Koordinaten von außerordentlicher Bedeutung für die Einhaltung der Qualitätsparameter [63]. Dies ist durch eine geeignete Bewegungsführung der Roboter möglich, um beispielsweise stets eine senkrechte Orientierung des Werkzeugs bzw. des Werkstücks einzuhalten [82].

Ein bedeutender Aspekt des Einsatzes von Fertigungssystemen mit kooperierenden Robotern ist deren wesentlich höhere Flexibilität gegenüber Systemen mit nur einem Roboter [89]. Sie begründet sich einerseits in einem erhöhten Bewegungsvermögen und andererseits in der Reduktion der notwendigen, peripheren Komponenten. So kann auf einer derartigen Anlage ein größeres Teilespektrum mit unterschiedlichen Montage- und Bearbeitungsoperationen gefertigt werden. Dabei ist es möglich, Tätigkeiten für das Umrüsten wesentlich zu vereinfachen, da die Führung und Handhabung der Werkstücke durch die Roboter selbst durchgeführt werden kann. Zusätzliche Flexibilität kann erzielt werden, wenn mit Hilfe von Sensoren Prozessparameter, wie z.B. die Lage von Schweißnähten, durch einen Roboter erfaßt werden und mit einem zweiten Roboter die Bearbeitung erfolgt [23].

Bei der Ausführung einzelner Fertigungsschritte kann durch den Einsatz von mehreren Industrierobotern eine Zeiteinsparung erzielt werden, da Arbeitsschritte untergliedert und von mehreren Robotern ausgeführt werden können. Dies stellt zwar ausschließlich eine zahlenmäßige Erweiterung der Anlagen dar, jedoch sind die Problemstellung der Verteilung der Aufgaben auf mehrere Roboter und deren Koordination typische Fragen von Mehrrobotersystemen. Darüber hinaus kann durch die Ausnutzung von höheren Relativgeschwindigkeiten ein Zeitgewinn erzielt werden [25].

Systeme mit mehreren zusammenarbeitenden Robotern können in der Fertigung zu einer Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitssteigerung der Gesamtanlage führen, wenn bei auftretenden Problemen eine Umgruppierung der Arbeitsgänge durch vorhandene Redundanzen auf andere Roboter oder die Ausführung der Arbeiten durch nur einen Roboter erfolgen kann [89, 93].

Diese neuen und erweiterten Fähigkeiten und Bewegungsmöglichkeiten kooperierender Roboter und einer damit verbundenen, verbesserten Beherrschung der Technologie in der Montage und Bearbeitung bedingen somit eine weitere Erhöhung der Qualität der Produkte. Andererseits können durch die Automatisierung bisher von Hand durchgeführter Tätigkeiten gleichzeitig Qualitätssteigerungen erreicht werden.



Trotz des augenscheinlichen Mehraufwandes für kooperierende Robotersysteme ist es möglich, durch deren Einsatz Kosteneinsparungen zu erzielen. So kann der Einsatz zweier zusammenarbeitender kleinerer Robotern günstiger sein, als wenn ein Roboter mit einer wesentlich höheren Leistungsfähigkeit benötigt wird [128]. Ein ausschlaggebender Vorteil ist die Vereinfachung der peripheren Komponenten, wie Montagehilfen oder Werkstückaufnahmen. Tätigkeiten, wie das Halten oder Zuführen von Teilen, können direkt vom Robotersystem übernommen werden. Somit ist zugleich ein Einsparungspotential für Umrüsttätigkeiten bei Produktwechsel durch Verringerung des Aufwandes für Werkstückaufspannungen oder Teilezuführungen gegeben. Diese Reduktion des Geräteaufwandes stellt einen markanten Kostengesichtspunkt dar. Weiterhin können Arbeitsschritte, die auf zwei Anlagen gefertigt werden, zusammengelegt und in einer Produktionsanlage mit kooperierenden Robotern ausgeführt werden, was zu einer Verringerung der Zahl der Fertigungszellen und damit zu einer Reduktion der notwendigen Produktionsfläche führt [89].

### **2.2.2 Problemfelder des Einsatzes**

Obwohl vielfältige Arbeiten auf dem Gebiet der kooperierenden Roboter die Fertigungsautomatisierung als ein wesentliches Zielfeld des Einsatzes derartiger Systeme ansehen, fanden diese Entwicklungen in der industriellen Praxis bisher nur geringe Umsetzung. Dies wird mit der bisher unzureichenden Leistungsfähigkeit der Roboter- und Gerätesteuerungen, aber auch in einer unzureichenden Beherrschung und Unterstützung der fertigungstechnischen Problemstellungen begründet [25]. Moderne Industrierobotersteuerungen bieten überwiegend die Möglichkeit der Ansteuerungen von mehr als sechs Achsen, jedoch werden diese ausschließlich als Zusatzachsen betrachtet und nur ihre Verfahrszeit mit der der Roboterbewegung abgeglichen. Eine interpolierte Bahn von gleichzeitig mehreren Handhabungsgeräten ist somit nicht möglich. Ausgehend davon können für den Einsatz kooperierender Robotern typische Problemfelder aufgezeigt werden (Bild 11).

An die Programmierung von Systemen mit mehreren, zusammenarbeitenden Robotern werden auf Grund der gleichzeitigen Beherrschung mehrerer Kinematiken besondere Anforderungen gestellt. Für verfügbare Industrieroboter hat die Technik der Programmierung einen Stand erreicht, die einem breiten Feld von gestellten Anforderungen gerecht wird. Neben der heute vorherrschenden On-line-Programmierung ist ebenfalls die Erstellung von Programmen off line von der eigentlichen Roboteranlage industriell eingeführt. Die Zielsetzung, Programme zwischen unterschiedlichen Roboterherstellern austauschen zu können, hat zu einer Normierung der Programmiersprache geführt [19, 59]. Diese unterstützt jedoch nur die gleichzeitige Ansteuerung eines einzelnen Industrieroboters.

Ansätze für die Programmierung von mehreren Robotern werden in [93] dargestellt. Hierbei wird besonders die Synchronisation der gekoppelten Bewegungsführung betrachtet. Demgegenüber wurden die Probleme der Programmierung in [25] mit Hilfe von Verfahren der Off-line-Programmierung gelöst. Dies erfordert für die Erstellung und Änderung der Programme

das Vorhandensein eines Off-line-Programmiersystems. In der industriellen Praxis wird jedoch erwartet, daß die Programmabläufe unmittelbar an der Fertigungszelle bearbeitet werden können. Um den Anforderungen der Praxis gerecht zu werden, ist es notwendig, für die Programmierung kooperierender Roboter normierte Programmiertechniken einzusetzen, wobei besonderer Wert auf die Möglichkeit einer effizienten Bewegungsvorgabe für kooperierende Industrieroboter gelegt werden muß.

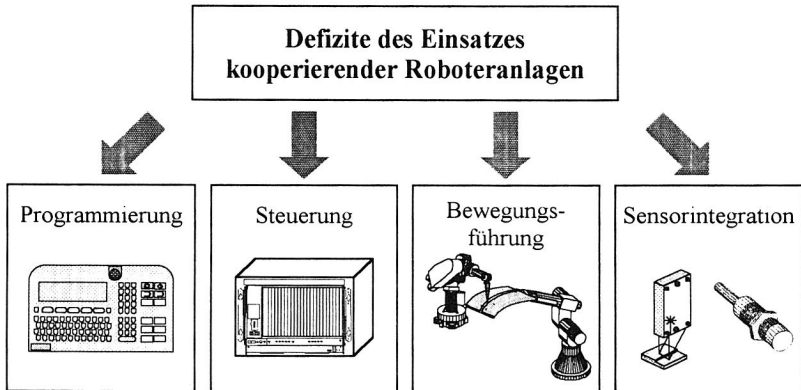


Bild 11: Bestehende Hemmnisse für den Einsatz von kooperierenden Robotern

Um die Bewegungen von kooperierenden Robotern auszuführen, sind leistungsfähige Steuerungssysteme notwendig, die mit umfangreichen Funktionen der Bewegungs- und Prozeßsteuerung ausgestattet sind. Eine Lösung auf der Basis industriell nicht verfügbarer RISC-Prozessorsysteme wird in [61] vorgestellt. Es ist jedoch anzustreben, die notwendigen Funktionen der Steuerung von kooperierenden Robotern auf industriell verfügbare Hardwarekomponenten zu implementieren. Hierzu haben sich für Roboter sowohl Einprozessor- als auch Mehrprozessorsysteme etabliert [111]. Somit können die Hardwarevoraussetzungen für den Aufbau modularer Steuerungssysteme für Fertigungseinrichtungen mit kooperierenden Robotern als gegeben angesehen werden. Als Grundlage ist beispielsweise der Einsatz von Mehrprozessorsystemen auf VME-Bus-Basis möglich.

Das hauptsächliche Problem eines derartigen Steuerungssystems ist die Wahl eines geeigneten Betriebssystems und der darauf aufbauenden Steuerungssoftware. Für diese Fragestellung und die der notwendigen Grundfunktionen können die Arbeiten von [124] als Basis angesehen werden, für deren nähere Detaillierung auf Kapitel 5.1 verwiesen wird. Ausgehend davon gilt es, die Problemstellung einer praxisorientierten Bewegungs- und Funktionssteuerung auf der Basis diese Grundsysteme zu lösen.

Die Bewegungsführung und die Bahnplanung von Industrierobotern kann derzeit als technisch ausgereift betrachtet werden. Vielfältige Entwicklungen haben hierbei zu entsprechenden Methoden geführt, die eine optimale Bewegung des Roboters im Raum auf verschiedenen geometrischen Bahnen ermöglichen [6, 107]. Praktischen Einsatz finden jedoch überwiegend Punkt-zu-Punkt-, Linear- und Kreisbewegungen sowie der stete Übergang zwischen einzelnen Bahnabschnitten. Ausgehend von den vorherrschenden Fertigungsprozessen, ist es für den Einsatz von kooperierenden Robotern im industriellen Umfeld erforderlich, die notwendigen Bewegungen zu analysieren und abzuleiten.

Vielfältige Bearbeitungstechnologien, die vorzugsweise mit Industrierobotern durchgeführt werden, erfordern den Einsatz von Sensoren. Erst damit kann der Prozeß hinreichend sicher beherrscht, die Produkte mit einer hohen und gleichbleibenden Qualität gefertigt und eine geringe Taktzeit für die Bearbeitung erzielt werden. Verschiedene Problemstellungen, wie die Anpassung von off line erstellten Programmen an die reale Umgebung, der Ausgleich von Abweichungen zwischen der programmierten und der tatsächlichen Bahn, bedingt durch Werkstücktoleranzen oder sich verändernde Prozeßbedingungen, oder auch eine grundsätzliche sensorgeführte Bearbeitung können gelöst werden. Heute im Bereich der Fertigungsautomatisierung eingesetzte Industrieroboter besitzen jedoch ungenügende Schnittstellen zur schnellen Integration von externen Sensordaten [96].

Derartige Problemstellungen sind besonders beim Einsatz von kooperierenden Industrierobotern signifikant, da hier bei der Manipulation eines Teiles mit zwei Robotern bereits geringfügige Positionsdifferenzen zu unerwünscht hohen Kräften führen können. Die Sensordatenintegration sollte für einen effektiven Einsatz von kooperierenden Robotern unmittelbar in den Systementwurf einbezogen werden. Möglichkeiten hierzu wurden in [68, 124] dargestellt.

## **2.3 Zielsetzung und Vorgehensweise**

Ausgehend vom derzeitigen Stand der Steuerungssysteme für Industrieroboter und den davon abgeleiteten Defiziten des Einsatzes in der Fertigungsautomatisierung besteht die Notwendigkeit, kooperierende Robotersysteme für ihre Anwendbarkeit in der Fertigung zu qualifizieren. Ziel dieser Arbeit soll es sein, Wege aufzuzeigen, wie durch eine Verbesserung der Steuerungs- und Sensortechnik eine weitere Leistungssteigerung und Flexibilitätserhöhung von Produktionsanlagen durch kooperierende Roboter erreicht werden kann.

Diese Zielsetzung bedingt die Untersuchung unterschiedlicher Problemfelder der Steuerung von Fertigungszellen mit kooperierenden Robotern. Die angestrebte Lösung trägt zu einem homogenen Gesamtsystem bei, welches in der Lage ist, die geforderten Leistungsmerkmale zu erfüllen (Bild 12). Besonderer Wert soll hierbei auf ein effizientes Zusammenwirken aller Komponenten der Zelle, wie Industrieroboter, Zellensteuerung und Sensoren, gelegt werden. Nur so ist es möglich, eine Leistungsfähigkeit zu erreichen, die einen sinnvollen Einsatz derartiger Systeme in der Praxis gewährleistet.

Zur Beherrschung der vielfältigen Anforderungen an Fertigungszellen mit kooperierenden Robotern sind effiziente Steuerungskonzepte und -strategien notwendig. Hierzu ist es erforderlich, die Komponenten der Zellensteuerung, die Programmierung und Bedienung der Gerätesteuern der Zell sowie die Prozeßführung und -überwachung auf ihre Anforderungen hinsichtlich benötigter Eigenschaften und Fähigkeiten zu untersuchen. Davon abgeleitet werden Methoden erarbeitet, die eine effektive Durchführung der Fertigung mit derartigen System unterstützen.

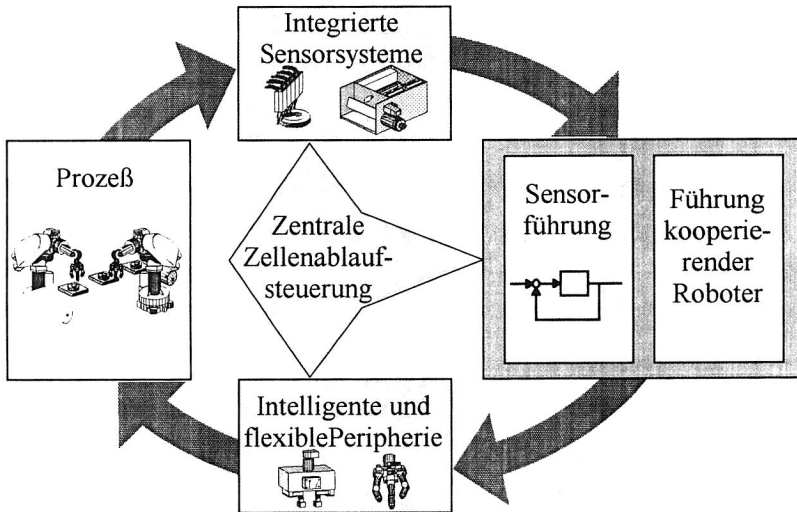


Bild 12: Aufgabenschwerpunkte für ein Steuerungssystem von kooperierenden Robotern

Die hierarchische und dezentrale Struktur der Produktion bedingt flexible Fertigungszellen, für die ein leistungsfähiges Steuerungs- und Koordinationssystem zu entwerfen ist, welches sich in die Informationsstruktur der Fertigung eingliedert. Die Beherrschung der Abläufe auf Zellen- und Prozeßebene erfordert effiziente Strategien und Konzepte zur Auftragsbearbeitung, Prozeßführung und -überwachung, Programmierung und Bedienung der Komponenten und Geräte. Für die Verbindung einzelner Komponenten einer Fertigungszelle werden standardisierte Kommunikationssysteme eingesetzt. Das Design des Steuerungssystems wird mit Hilfe strukturierter Entwurfshilfsmittel durchgeführt.

Kooperierende Roboter benötigen zur Ausnutzung ihrer Fähigkeiten eine leistungsfähige Bahngenerierung, die auf der Grundlage praxisorientierter Bewegungsformen neu spezifiziert und erweitert wird. Für die bei der Zusammenarbeit mehrerer Roboter verstärkt auftretenden Probleme von Kollisionen sind entsprechende Strategien zu deren Vermeidung in das Steue-

runge system zu integrieren. Betrachtet werden hierfür On-line-Kollisionsvermeidungsstrategien, die direkt Einfluß auf die Bewegungen der Roboter nehmen.

Die Realisierung komplexer Bewegungsformen und Fertigungsabläufe verlangt von einem Gerätesteuerungssystem umfangreiche Fähigkeiten und Funktionen. Ausgehend vom Entwurf der Bewegungsgenerierung, den Anforderungen der Sensorintegration als auch der Steuerung des Gesamtsystems sind Struktur und Funktionalität einer derartigen Gerätesteuerung zu konzipieren. Hierbei erfolgt eine Abbildung der Operationen zur Bewegungssynthese auf die einzelnen Module der Steuerung. Gleichzeitig wird die Einbindung von Sensorinformationen und die Funktionalität der Kollisionsvermeidung untersucht. Wesentliches Einsatzkriterium eines derartigen Steuerungssystems ist zweifelsohne eine effiziente Bedienung und Programmierung. Auf der Basis industriell normierter Programmierertechniken für Industrieroboter sind Methoden zu entwickeln, die den Anwender in geeigneter Weise unterstützen.

Zur Sicherung von Prozeß und Fertigungsqualität erlangt die Integration von Sensordaten eine zunehmende Bedeutung. Die On-line-Verarbeitung von Sensorinformationen während des Prozeßablaufes ermöglicht es, die Prozeßgrößen situationsabhängig zu beeinflussen. Ausgehend von der Betrachtung des Sensoreinsatzes in der Fertigung, erfolgt ein Entwurf von Sensorregelungen, die eine optimale Anpassung an herrschende Prozeßbedingungen bieten. Gleichzeitig werden die Möglichkeiten von sensor- und positionsgeführten Bewegungen untersucht.

Für die flexibel automatisierte Fertigung werden leistungsfähige und gleichzeitig wirtschaftliche Sensorsysteme benötigt. Ausgehend von den gestellten Anforderungen, können Einsatzcharakteristiken für komplexe Sensorsysteme abgeleitet werden. Auf der Basis eines Lasersensors wird ein Sensorsystem entwickelt, welches in der Lage ist, Anwesenheit und Formen von Werkstücken in der Fertigung zu bestimmen. Für vielfältige Anwendungen wird ein derartiger Leistungsumfang nicht benötigt. Für diese Problemstellung sollen Systeme aus zeilenförmig angeordneten Sensoren entworfen werden, die auf optischen, induktiven und kapazitiven Meßprinzipien beruhen und die Erfassung von Konturen ermöglichen. Zur Detektion von einer, auf eine Fläche einwirkenden Kraft wird ein piezoelektrischer Matrixsensor entwickelt. Für die Verarbeitung dieser Sensorinformationen soll ein universell konfigurierbares Auswertesystem konzipiert werden.

Um das hohe Flexibilitätspotential von Industrierobotern ausnutzen zu können, ist es notwendig, möglichst universelle Greifmechanismen für ein breites Spektrum an Teilen mit unterschiedlichen Geometrien und Formen zur Verfügung zu stellen. Basierend auf den Anforderungen an derartige Greifsysteme, soll die Mechanik, der Antrieb und die Steuerung eines mehrfingerigen Greifersystems untersucht werden. Mit Hilfe eines hierarchischen Steuerungskonzeptes und einer objektbezogenen Definition der zu greifenden Werkstücke wird eine verständliche Programmierung und Steuerung angestrebt. Durch zusätzliche Nutzung von Kraftsensoren können unterschiedliche Greifkräfte erreicht werden.

## **3 Integration und Steuerung der Systemkomponenten flexibler Montagezellen**

Die Fertigung von Industriegütern ist durch eine hierarchische Strukturierung in verschiedene, funktionsorientierte Schichten gekennzeichnet. Derzeitige Tendenzen zu mehr Dezentralisierung in autonome Einheiten führen zur Bildung von organisatorisch und räumlich zusammengehörigen Betriebsmitteln. Für diese flexiblen Fertigungszellen ist ein leistungsfähiges System der Steuerung und Koordination zu entwerfen, welches sich in die Informationsstruktur der Fertigung eingliedert. Zur Beherrschung der vielfältigen Anforderungen auf Zellen- und Prozessebene werden Strategien und Konzepte benötigt, die den Aufgaben der einzelnen Bereiche, wie Auftragsbearbeitung, Programmierung, Bedienung, Prozeßführung und -überwachung gerecht werden. Der Entwurf des Zellensteuerungssystems wird mit Hilfe strukturierter Entwurfswerkzeuge durchgeführt. Die Verbindung zwischen den Steuerungskomponenten der Fertigungszelle erfolgt über ein standardisiertes Kommunikationssystem.

### **3.1 Steuerung hierarchisch strukturierter Fertigungszellen mit mehreren Robotern**

#### **3.1.1 Flexibilitätsaspekte und Klassifikation der Steuerungssysteme**

Zielsetzung von modernen Strukturen der Fertigung sowie des Einsatzes von kooperierenden Robotern ist eine hohe Flexibilität für unterschiedliche Anforderungen der Produktion. Die hier einzusetzenden Steuerungssysteme müssen diesen Ansprüchen Rechnung tragen, um somit der bestehenden Forderung nach einer entsprechenden Integration in die Fertigung als auch einer allgemeinen Anwendbarkeit gerecht zu werden.

Trotz einer unterschiedlichen Bewertung der Flexibilitäts Gesichtspunkte in der Fertigung kann von einer wesentlichen Grundeigenschaft ausgegangen werden, die sich in der Fähigkeit ausdrückt, sich ändernden Situationen und Anforderungen in der Produktion anpassen zu können. Dabei kann nach verschiedenen, produktionsbedingten Gesichtspunkten unterschieden werden (Bild 13), die besonders für den Einsatz von Fertigungszellen mit kooperierenden Robotern von Bedeutung sind [120].

Sollen bei der Bearbeitung der anfallenden Aufträge nicht im vorab vorgegebene Fertigungseinrichtungen genutzt werden, sondern soll diese Entscheidung in Abhängigkeit des aktuellen Zustandes der Anlage erfolgen, so ist hierfür eine *Geräteflexibilität* notwendig. Für eine Fertigungszelle mit kooperierenden Robotern bedeutet dies, daß die Zuweisung eines Auftrages zur Bearbeitung durch einen bestimmten Roboter in Abhängigkeit der aktuellen Bearbeitungssituation in der Zelle erfolgen kann.

Bedingt durch die hohe Bewegungs- und Manipulationsfähigkeit von Fertigungsanlagen mit kooperierenden Robotern, ist eine besonders hohe *Produktflexibilität* gegeben. Verschiedene Produkte können auf ein und derselben Anlage ohne erheblichen Umrüstaufwand gefertigt werden. Gleichzeitig ist eine Integration von unterschiedlichen Montage- und Fertigungsschritten in eine Anlage mit kooperierenden Robotern möglich, womit eine *Prozessflexibilität* gewährleistet werden kann.

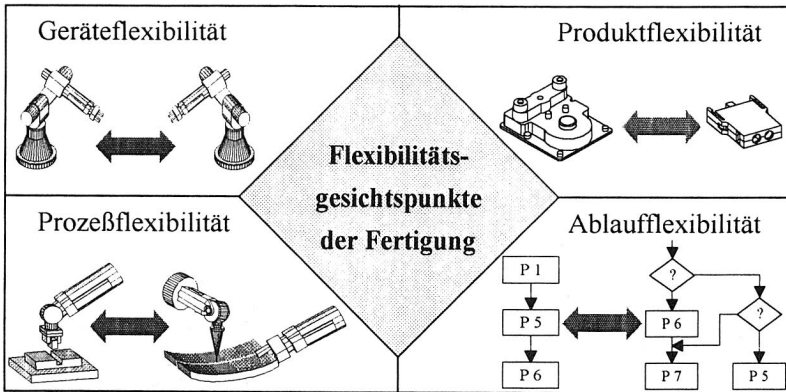


Bild 13: *Flexibilitätssteigerung durch den Einsatz von kooperierenden Robotern*

Um einen auf die jeweiligen Anforderungen abgestimmten Verlauf der Fertigung zu ermöglichen, müssen die Anlagen eine entsprechende *Ablaufflexibilität* bieten. Sie spiegelt sich besonders in einer Varianz der Reihenfolge der Bearbeitung der Produkte wieder. Hierzu sind entsprechende Steuerungsfunktionalitäten notwendig, die eine zustandsabhängige Zuordnung zu Robotereinheiten realisieren.

Zur Sicherung der Fertigung bei plötzlich auftretenden Störungen oder zur Bearbeitung von Eilaufträgen ist es notwendig, eine Reaktion entsprechend der gegebenen Situation zu gewährleisten. So kann an Hand des Zustands einer Fertigungszelle oder in Abhängigkeit von Sensorinformationen über den jeweiligen Fertigungsfortgang entschieden werden. Zum Aufbau derart flexibler Systeme bedarf es besonders programmierbarer und konfigurierbarer Komponenten und Steuerungsmodulen, die mit einer leistungsfähigen Sensortechnik ausgestattet sind.

Die Anforderungen an derart flexible Systeme haben zur Strukturierung in einzelne, organisatorisch abgeschlossene Fertigungszellen geführt. Diese sind gekennzeichnet durch eine Zusammengehörigkeit von Teilsystemen der Bearbeitung, des Transports und der Fertigungssteuerung, wobei ein oder mehrere Arbeitsschritte innerhalb einer Zelle mit unterschiedlichen Werkstücken durchgeführt werden können. Diese dezentralisierte Fertigung ist durch eine lokale Steuerung und Entscheidungsfindung gekennzeichnet, die sich in überschaubare, teils

autonome und leistungsfähige Einheiten in einem insgesamt komplexen Produktionsgefüge gliedern [26]. Die Aspekte verteilter, dezentraler Systeme, wie Transparenz, Wartbarkeit, Strukturierung, Übersichtlichkeit, Erweiterbarkeit, Wiederverwendbarkeit der Software, Austauschbarkeit, Modularität und kürzere Entscheidungswege, treffen hier in vollem Umfang zu [133].

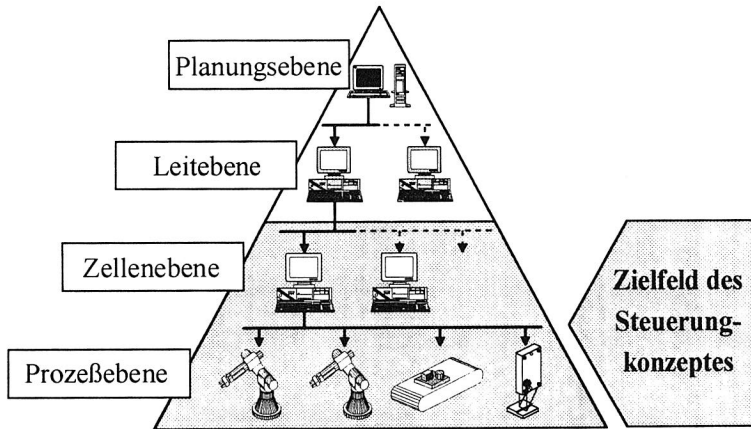


Bild 14: Einordnung der Zellensteuerung in den Informationsfluß der Fertigung [99]

Flexible Fertigungszellen bilden die unterste Ebene im Gefüge des Informationssystems der Produktion [30]. Sie sind integriert in eine hierarchische Anordnung, an deren oberer Ebene die Planung und Steuerung der Fertigung angeordnet ist. An dieser Stelle sind besonders dispositive Aufgaben, die Stammdatenverwaltung und die Generierung von Fertigungsaufträgen für die unterlagerte Leitebene vorherrschend. Diese Leitebene übernimmt ihrerseits die Auftragssteuerung innerhalb der Fertigung und auch die Koordination und Überwachung der Fertigungszellen. Die Zellensteuerung führt die Steuerung der Abläufe zwischen den Komponenten der Zelle, wie Robotern und NC-Bearbeitungsmaschinen, Sensoren und Transporteinheiten, aus.

Ziel des zu erstellenden Konzeptes soll es sein, für Fertigungszellen mit kooperierenden Robotern ein Steuerungskonzept zu entwickeln, welches die Ebenen der Steuerung der Prozesse innerhalb der Zelle und die Bereiche der Geräte und Komponenten umfaßt. Besonderes Augenmerk wird hierbei auf eine Durchgängigkeit des Informationsflusses und der -verarbeitung gelegt.



### 3.1.2 Aufgabenfelder und Zielsetzungen von Zellensteuerungssystemen

Das Steuerungssystem einer flexiblen Fertigungszelle nimmt eine vermittelnde Rolle zwischen Leitsystem der Produktion und der eigentlichen ausführenden Ebene ein. Vorrangige Aufgabe der Zellensteuerung ist die Ausführung der vom Leitsystem vorgegebenen Aufträge [110]. Hierzu hat es kommunikative, organisatorische und operative Funktionen zu erfüllen [26], die der Überwachung und Steuerung der organisatorisch und räumlich zusammengefaßten Betriebsmittel des Fertigungsprozesses dienen.

Zur Erreichung der Flexibilitätsziele des Steuerungssystems einer Fertigungszelle leiten sich nachfolgende Gestaltungsbestrebungen ab [99,111]:

- Anpaßbarkeit und Konfigurierbarkeit,
- Anwenderprogrammierbarkeit,
- Modularität,
- Verwendung standardisierter Schnittstellen.

Der universelle Charakter eines Zellensteuerungssystems bedingt das Bestreben, eine Anpassung an die Gegebenheiten der Zelle durch eine zielgerichtete Konfiguration der Funktionen und Module durchzuführen, um somit eine Vielzahl von Individuallösungen zu vermeiden. Hierbei ist anzustreben, diese Anpassung ohne Änderung des Quellcodes der Steuerungssoftware vorzunehmen, sondern mit Hilfe definierter Variablen diese Adaption auszuführen. Gleichzeitig besteht die Anforderung, den Fertigungsablauf innerhalb der Zelle entsprechend der vorgegebenen Aufgabe gestalten zu können und diese Problematik durch den Anwender des Systems an Hand der Fertigungsaufgabe ausführen zu lassen. Für diese Tätigkeit ist es notwendig, die Programmierung und Bedienung der einzelnen Geräte der Zelle in ein Zellensteuerungssystem zu integrieren.

Ausgehend von der Forderung nach Flexibilität wird ein weitgehend modularer Aufbau der Anlage angestrebt. Dies bedeutet, neben einer Gestaltung von dedizierten Funktionseinheiten besonders die Möglichkeit einer Erweiterung der Anlage durch neue Geräte und deren Einbeziehung in das Steuerungssystem. Hierfür sind besonders einheitliche und standardisierte Schnittstellen von Bedeutung [147], was durch die Verwendung eines genormten Kommunikationsprotokolls, das die Möglichkeit einer einfachen Austauschbarkeit der Geräte und der Verwendung einheitlicher Softwaremodule bietet, erzielt wird.

Für die Realisierung der geforderten Funktionalitäten können für Zellensteuerungssysteme spezifische Funktionselemente charakterisiert werden, die sowohl der Verbindung mit der überlagerten Leitebene als auch zur unterlagerten Prozeß- und Steuerungsebene dienen (Bild 15) [110]. Im Fertigungsprozeß werden von einem Leitsystem Fertigungsaufträge für die Zellensteuerung ausgelöst. Diese muß die Aufträge, entsprechend den aktuellen Gegebenheiten in der Zelle und der vorgegebenen Dringlichkeit, zur Bearbeitung einplanen. Gegebenenfalls kann dies zu Verschiebungen im Ablauf der anstehenden Aufträge führen, wenn solche mit

höherer Priorität oder durch Fehlen von Material bei anderen Aufträgen vorgezogen werden. Für die Ermittlung des Zustandes einer Zelle stehen dem Leitrechnersystem Funktionen zur Diagnose und Statusabfrage zur Verfügung. Hierdurch ist es möglich, den Auftragsfortschritt zu überprüfen, aktuelle Anlagen- und Qualitätsparameter zu ermitteln oder aufgetretene Fehler zu analysieren.

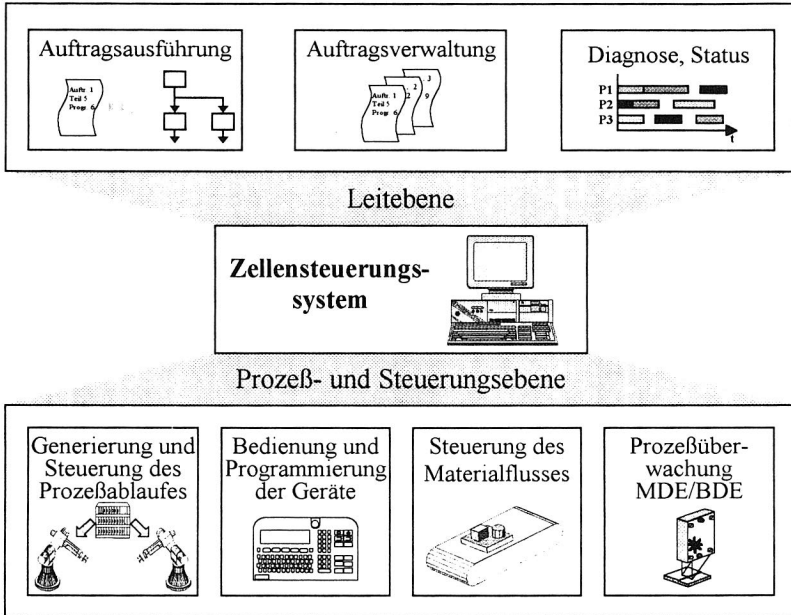


Bild 15: Funktionen der Zellensteuerung bezüglich der über- und unterlagerten Fertigungsebenen

Die essentielle Funktion eines Zellensteuerungssystems besteht in der automatischen Ausführung des Zellenauftrages. Hiervon ausgehend werden die spezifizierten Abläufe der einzelnen Steuerungen und Geräte der Zelle koordiniert, die Programme und Daten übermittelt und der Ablaufschritt überprüft. Diese Vorgänge ergeben sich anwendungsspezifisch in Abhängigkeit der zu fertigenden Produkte. Hierzu sind effiziente und benutzerfreundliche Werkzeuge zur Programmierung derartiger Abläufe notwendig. Diese Hilfsmittel sollten gleichzeitig eine Programmierung, Konfiguration und Bedienung der Gerätesteuern ermöglichen.

Verbindendes Element zwischen der Fertigungszelle und dem gesamten Produktionsablauf sowie innerhalb der Zellen stellt der Materialfluß dar. Dieser übernimmt die Aufgabe, den Transport der Werkstücke und Werkzeuge, sowohl innerhalb der Zelle als auch die Übergabe an das Transportsystem der Fertigung, zu steuern.

Zur Sicherung von Prozeß und Qualität werden Zustandsgrößen aus der Fertigungszelle benötigt, die durch Funktionen der Betriebs- und Maschinendatenerfassung zu protokollieren sind. Bei diesen Daten kann es sich sowohl um durch Sensorsysteme erfaßte Werte als auch um Systemdaten der eingesetzten Gerätesteuern handeln. Ausgehend von diesen erfaßten Daten ist es möglich, eine Steuerung des Ablaufes und des Fertigungsprozesses vorzunehmen.

All diese Funktionen bilden ein Steuerungssystem, das einem Zellenrechner zuzuordnen ist und sich durch eine hohe Leistungsfähigkeit und ein benutzerfreundliches, grafikorientiertes Mensch-Maschine-Interface auszeichnen soll [72].

### 3.2 Systematisierung und Entwurf der Zellensteuerung für kooperierende Roboter

#### 3.2.1 Methodisches Vorgehen zum Entwurf des Steuerungssystems

Die Anforderungen und die Komplexität des Zellensteuerungssystems gebieten ein systematisches und methodisches Vorgehen beim Entwurf der Steuerungssoftware. Bedingt durch die Tatsache, daß die Zellensteuerung auf Ereignisse innerhalb der Zelle und von darüberliegenden Steuerungsebenen reagieren muß, kann man Analogien zu Steuerungssystemen ohne harten Zeitbezug herstellen. Aus diesem Grund wird hier eine für den Steuerungssystementwurf entwickelte Methode eingesetzt.

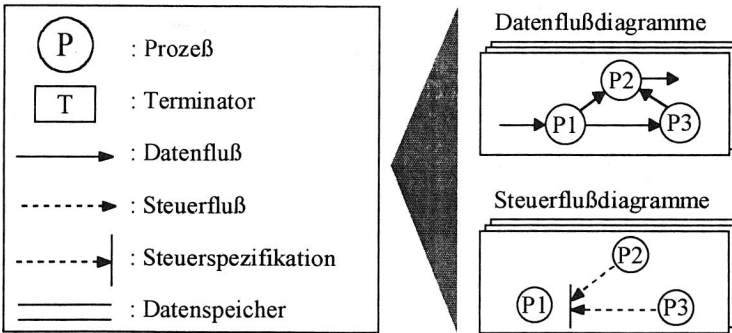


Bild 16: Symbole und Grundstrukturen von SA/RT-Modellen

Zellensteuerungssysteme sollen im Gegensatz zu konventionellen EDV-Systemen auf asynchrone Ereignisse in einem angemessenen zeitlichen Rahmen reagieren. Auf das selbe Ereignis erfolgt aber meist eine differenzierte Reaktion des Steuerungssystems, da das Verhalten von zusätzlichen internen Bedingungen oder Zuständen abhängt. Die Modellierung dieses Zustandsverhaltens ist damit ein wesentlicher Bestandteil beim Entwurf eines Steuerungssy-

stems. Formale Methoden helfen dabei, in der Planungs- und Analysephase die Anforderungen an das zu realisierende System zu erkennen, zu strukturieren und mit geeigneten Notationen festzuhalten. [119]

Zunächst müssen die Anforderungen an das System unabhängig von Implementierungsformen beschrieben werden. Dazu wurde von [18] ein neuer Ansatz zur Analyse von Systemen, der als „Strukturierte Analyse (SA)“ bezeichnet wird, vorgestellt. Das Ergebnis der „Strukturierten Analyse“ ist ein Modell des zu entwickelnden Systems, das die Systemanforderungen implementierungsunabhängig bis zu einem hinreichend genauen Detaillierungsgrad beschreibt, so daß das Design des Softwaresystems vorgenommen werden kann. Steuerungssysteme weisen aber oft Eigenschaften auf, die durch SA nicht modelliert werden können. Die Methodenerweiterung „Real Time (RT)“ stellt nun Beschreibungsmethoden zur Verfügung, die dies ermöglichen. Die Erweiterung der Strukturierten Analyse (SA) wird im weiteren mit SA/RT bezeichnet. [41]

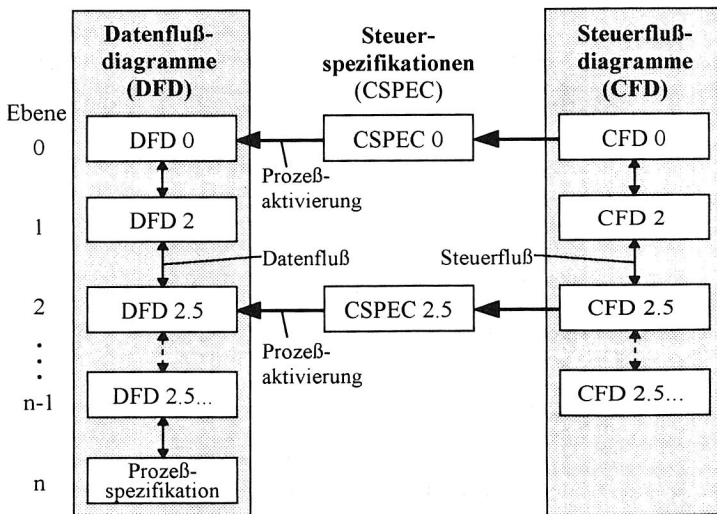


Bild 17: Abstraktes Prozeß- und Steuermodell eines Steuerungssystems [41]

Wesentlicher Bestandteil von SA/RT sind die Datenflußdiagramme (DFD), die die einzelnen Prozesse des untersuchten Systems und deren Datenaustausch darstellen. Prozesse sind Funktionen, die beschreiben, wie aus einem gegebenen Input ein Output erzeugt wird. Der Datenaustausch zwischen Prozessen erfolgt über Datenkanäle, die nur Daten- aber keine Steuerinformation transportieren können. Außerdem können in Datenflußdiagrammen Datenspeicher vorkommen, die den Prozessen erlauben, auf benötigte Daten jederzeit selbständig zugreifen zu können. Analog zu den Datenflußdiagrammen lassen sich Steuerflußdiagramme (CFD) erarbei-

ten, die den Austausch von Steuerinformation zwischen Prozessen und Steuerspezifikationen beschreiben. Steuerspezifikationen (CSPEC) charakterisieren die Verarbeitung von Steuerflüssen und internen Systemzuständen, deren Ergebnis eine mögliche Aktivierung eines im Datenflußdiagramms spezifizierten Prozesses ist.

Die SA/RT-Modellierung beginnt mit einer Beschreibung des Daten- und Steuerflußverhalten des Basisprozesses mit der Systemumgebung, die unter Verwendung des Elements Terminator modelliert wird. Die Darstellung eines SA/RT-Modells erfolgt dann über mehrere Ebenen, wobei jeder Prozeß in der nachfolgenden Ebene weiter detailliert wird. Diese Detaillierung der Daten- und Steuerflußdiagramme erfolgt solange, bis eine weitere Untergliederung nicht mehr erforderlich ist und die Basisprozesse in der Prozeßspezifikation verbal beschrieben werden können. Die Modellierung eines Steuerungssystems mit SA/RT stellt somit sicher, daß das Verhalten des Steuerungssystems systematisch erarbeitet wurde und übersichtlich und verständlich darstellbar ist.

Die Methode SA/RT wurde für den Entwurf des Steuerungssystems des Zellenrechners weitgehend genutzt, um so einen systematischen, strukturierten und gut dokumentierten Entwurf des Systems zu gewährleisten. In den nachfolgenden Kapiteln wird diese Beschreibung zur Darstellung der Steuerungsfunktionalität verwendet.

### **3.2.2 Konzeption eines Systems zur modularen Steuerung kooperierender Roboter**

Zielsetzung des zu konzipierenden Steuerungssystems ist die Integrität aller Bestandteile einer flexiblen Fertigungszelle, charakterisiert durch eine modulare und offene Struktur. Diese Modularität kennzeichnet sowohl das Gesamtsystem als auch die darin enthaltenen Funktionseinheiten, deren Verbindung untereinander durch ein leistungsfähiges Kommunikationssystem sichergestellt ist. Ausgehend von bestehenden Konzepten werden hierbei vor allem die Aspekte der Steuerung in einer flexiblen Fertigungszelle mit kooperierenden Robotern betrachtet [38, 110].

Die spezifizierten Funktionalitäten werden zu Modulen zusammengefaßt und sind hierdurch als abgeschlossene Einheiten in das Gesamtsystem einzuordnen. Grundsätzlich wird dabei die Funktionsebene der Zellensteuerung und die der Gerätesteuerung unterschieden. Die Probleme der Gerätesteuerungen werden in Kapitel 5 näher betrachtet. Verbindendes Element zwischen diesen beiden Funktionseinheiten stellt ein leistungsfähiges, standardisiertes Kommunikationssystem dar (Kap. 3.3).

Für das System wurde eine horizontale und vertikale Strukturierung nach den Gesichtspunkten der durchzuführenden Aufgaben und der Wirkungsbereiche der Funktionen innerhalb des Zellensteuerungssystems vorgenommen. Diese Gliederung bewirkt eine dedizierte Trennung der einzelnen Module nach unterschiedlichen Aufgabenschwerpunkten und somit sowohl eine hohe Übersichtlichkeit und Transparenz als auch eine Erweiterbarkeit der Funktionsmodule.

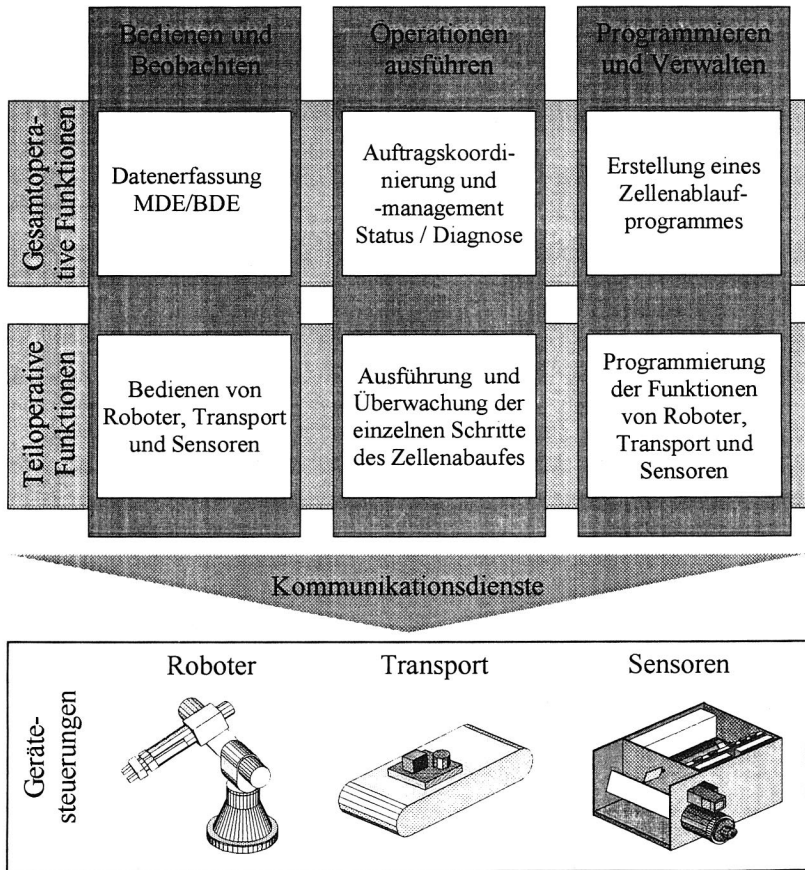


Bild 18: Strukturierung der Zellensteuerung

Die vertikale Untergliederung kennzeichnet die durchzuführenden Funktionen eines Zellensteuerungssystems unter dem Gesichtspunkt der Ausführung von operativen Handlungen. Dies umfaßt in erster Linie das Management und die Koordinierung von Aufträgen, die durch eine Werkstattsteuerung vorgegeben werden. Andererseits ermittelt die Zellensteuerung Zellenstatusinformationen, die der Leitebenen zur Verfügung stehen. Weiterhin umfassen operative Handlungen die Ausführung eines vorgegebenen Zellenprogrammes und damit die Realisierung der Prozessschritte. Hierzu sind die Parametrierung der Anlagen und Geräte, die Auslösung von Montage- oder Bearbeitungsschritten und die Überwachung der Funktionsausführung notwendig.

Ein weiteres Element der Struktur stellt die Erstellung und die Verwaltung von Programmen zur Steuerung der Zelle und für die einzelnen Komponenten des Prozesses dar. Hierbei wird sowohl die Programmierung als auch der Test durch geeignete Softwarewerkzeuge unterstützt. Dritte Komponente der Strukturierung sind die Funktionen der Bedienung, des Beobachtens und Visualisierens Bestandteile des Steuerungssystems, die ein zentrales, operatives Handling der Geräte des Fertigungsprozesses ermöglichen.

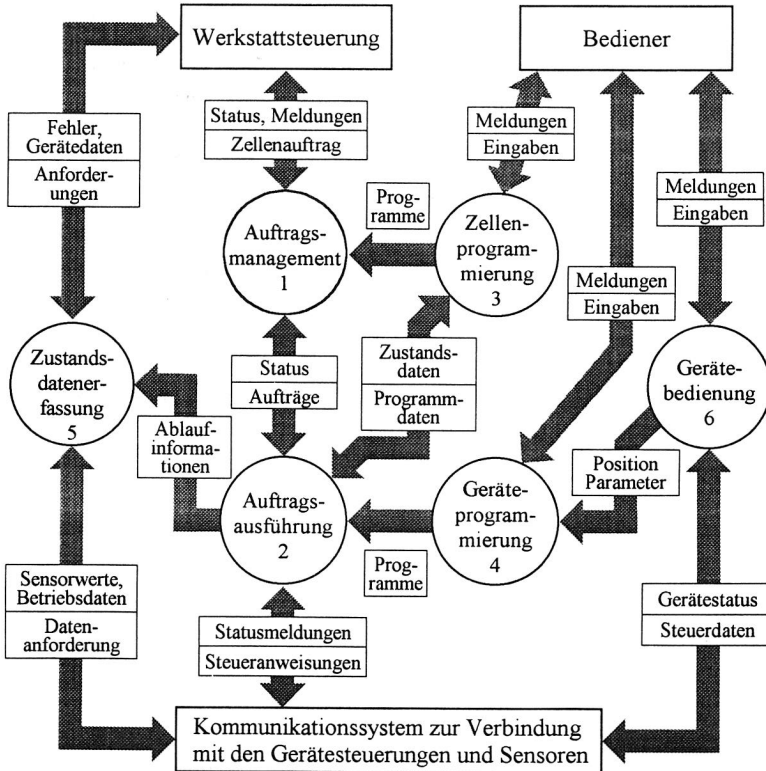


Bild 19: Informationsmodell der Zellensteuerung

Diese vertikalen Strukturelemente lassen sich horizontal weiter untergliedern, wobei der Wirkungsbereich der durchzuführenden Handlungen maßgebend ist. Auf einer oberen Ebene sind solche Module angeordnet, die Aufgaben übernehmen, die auf die gesamte Zelle Auswirkung haben. Dies sind die Auslösung und das Erstellen von Zellenprogrammen oder die Dienstbringung gegenüber der Werkstattsteuerung. Auf einer niederen horizontalen Strukturierungsebene angeordnete Funktionsmodule wirken auf einzelne Komponenten der Fertigungs-

zelle, wie die Programmierung, Bedienung und Ansteuerung der einzelnen Geräte. Eine gleichfalls auf dieser Ebene angeordnete Aufgabenstellung eines Zellenrechners ist die Erfassung und Verarbeitung von Maschinen- und Betriebsdaten des Produktionsprozesses, mit deren Hilfe eine Protokollfunktion und Darstellung des Fertigungsablaufes realisiert werden kann. Darüber hinaus können aus diesen Daten Fehlerzustände ermittelt und somit Maßnahmen zur Sicherung des Prozesses eingeleitet werden, die zu einer Erhöhung der Verfügbarkeit führen [146].

Das Steuerungssystem wird mit Hilfe der SA/RT-Methode entworfen (Bild 19). Die konzipierten Kernbestandteile des Zellenrechnersystems werden als Prozesse dargestellt, deren Verknüpfungen durch die untereinander auszutauschenden Informationen und Signale gekennzeichnet sind. Diese bestimmen die inneren Zustände der Prozesse in der Art, daß hierdurch der geforderte Verarbeitungsablauf realisiert wird. Die detaillierte Betrachtung der Daten- und Steuerflüsse erfolgt bei der Behandlung der einzelnen Zellensteuerungsprozesse (Kap. 3.2.3 - 3.2.7).

Die Realisierung der Zellensteuerung erfolgte auf einem Personalcomputer unter der grafischen Benutzeroberfläche MS-Windows. Hierdurch werden einheitliche benutzerfreundliche Bedien- und Programmierinterfaces der Steuerungen erzielt, welche mittels leistungsfähiger Softwarewerkzeuge entwickelt werden können. Für Bedien- und Programmierarbeiten direkt an der Anlage, wo der Einsatz von mobilen Bediengeräten notwendig ist, können, bedingt durch die Verfügbarkeit leistungsfähiger tragbarer Industriecomputer und deren Netzwerkfähigkeit, die Softwaremodule der Zellensteuerung eingesetzt werden.

### **3.2.3 Auftragsmanagement und Zellenablaufsteuerung**

Die Zellensteuerung tritt mit den Funktionen des Auftragsmanagements mit der Werkstattsteuerung in Verbindung. Vorgegebene Aufträge werden übernommen und auf ihre Gültigkeit hin überprüft (1.1). Entsprechend der Zulässigkeit erfolgt eine Einlastung in einen Auftragspool und die Bestätigung des Empfangs des Auftrags gegenüber der Werkstattsteuerung. In gleicher Weise ist es notwendig, eine Tilgung von Aufträgen durchzuführen.

Die Reihenfolge, in welcher die Fertigungsaufträge zur Ausführung gebracht werden, wird an Hand des Einlastzeitpunktes und einer vorgegebenen Priorität durch die hierfür zuständige Instanz entschieden (1.2). Mit dem zur Ausführung kommenden Auftrag werden die notwendigen Zellenprogrammdateien verknüpft und an die realisierende Funktion übergeben.

Der Fortschritt der Bearbeitung wird durch einen eigenständigen Prozeß (1.4) überwacht, der nach Beenden eines Auftrags dessen Löschen im Pool und die Aktivierung einer neuen Auftragseinlastung ausführt. Gleichzeitig werden Informationen über den Fertigungsablauf generiert und der Zellenzustandsüberwachung (1.3) zur Verfügung gestellt. Diese stellt eine Auskunftsfunktion gegenüber der Werkstattsteuerung dar.



Eingeladete Aufträge gelangen zu ihrer Abwicklung an eine Ausführungsinstanz (Bild 21). Sie bestehen aus einem zeilenorientierten lesbaren Zellenablaufprogramm mit einem zugehörigen spezifischen Datensatz. Um einen Systemzustand der Zelle bei einem jeweiligen Programmschritt dokumentieren zu können, ist dieses Programm um einen Satz von Zustandsinformationen erweitert. Somit können eingenommene Zustände nach Fehlersituationen oder bei Programmstart hergestellt werden. Diese Zustandsdaten können während des Prozesses oder bei der Programmerstellung erzeugt werden.

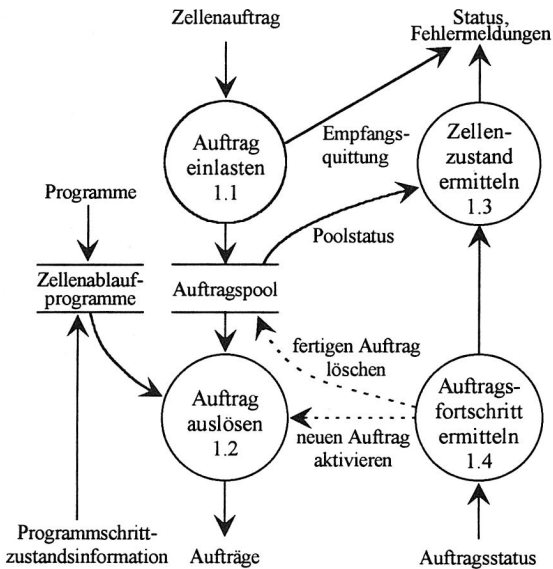


Bild 20: Modell des Auftragsmanagements

Die Ausführung eines derartigen Zellenprogrammes erfolgt durch zeilenweise Bearbeitung durch einen Interpreter (2.1). Beim Start eines Fertigungsablaufes ist es erforderlich, daß sich die Fertigungszelle in einem definierten Ausgangszustand befindet. Dieser ist als Zustandsinformation im Zellenablaufprogramm enthalten und ist mit den herrschenden Bedingungen zu vergleichen. Bestehen hierbei Abweichungen, so wird ein Bedieneringriff oder ein automatisiertes Setzen notwendig, um den erforderlichen Zustand herzustellen. Die während der Programmbearbeitung auftretenden Zellenzustände sind vor der Ausführung eines Programmschrittes für weitere Programmläufe zu ermitteln und als Programmschrittzustandsinformation zu sichern.

Die Programmbearbeitung durch einen Interpreter erfolgt satzweise durch die Ermittlung der Art der durchzuführenden Aktivität. Hierzu generiert er aus den vorgegebenen Programmdateien

die Anweisungen für die Steuerungsmodule der in der Zelle existenten Geräte, wie Roboter, Transport und Sensoren. Nach erfolgter Aktivierung ist die Steuerung der Geräte zu übernehmen.

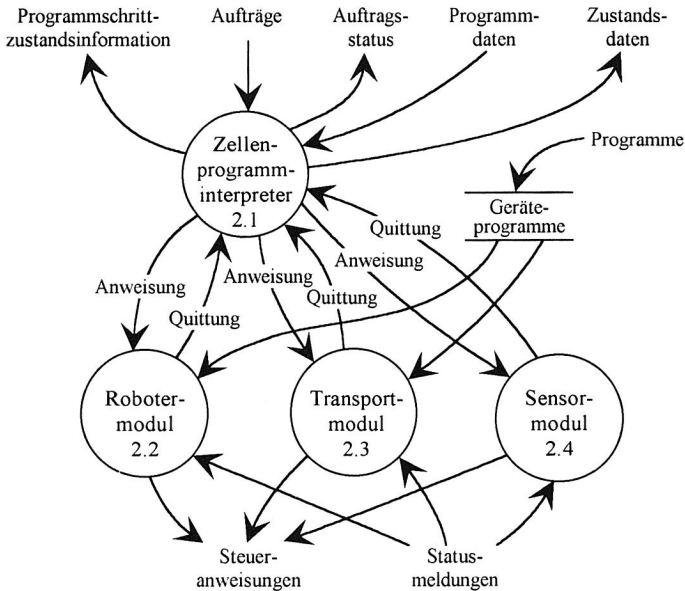


Bild 21: Datenfluß der Ausführung von Zellenaufträgen

Gleichzeitig hat der Interpretierer Funktionen zur Verfügung zu stellen, die es ermöglichen, Zellenprogramme während deren Entwicklung zu testen. Dies umfaßt den Start von Programmen, Schrittbetrieb und die Ermittlung von Programmschrittzustandsinformationen für den späteren, automatischen Ablauf.

Die Steuerungsmodule für die jeweiligen Gerätetypen (2.2 - 2.4) realisieren die Aktionsausführung der Geräte und bedienen sich zu diesem Zweck der Funktionen des Kommunikationssystems, wie der Übertragung und dem Quittungsempfang für vorgenommene Anweisungen (Kap. 3.3). Typische, operative Aktionen sind hierbei das Laden von Programmen, die Erzeugung von Steueranweisungen und die Ermittlung von Gerätezuständen.

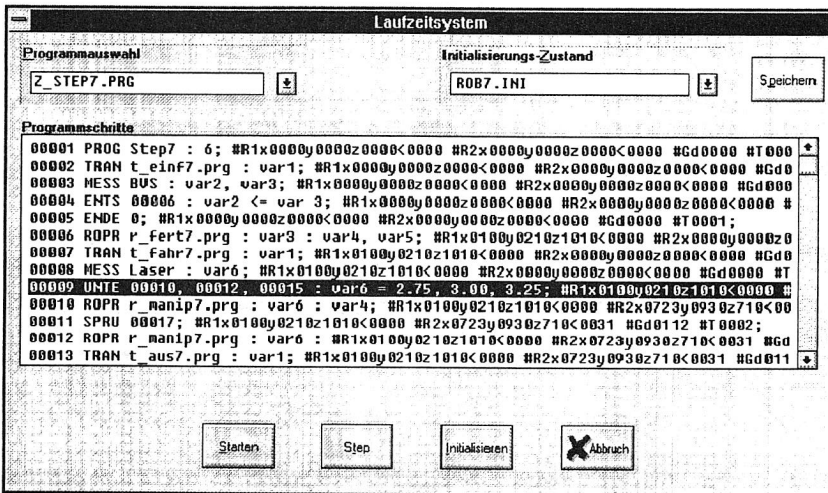


Bild 22: Bedienfunktionen der Zellenprogramminterpretation

### 3.2.4 Grafisch geführte Beschreibung des Zellenablaufes

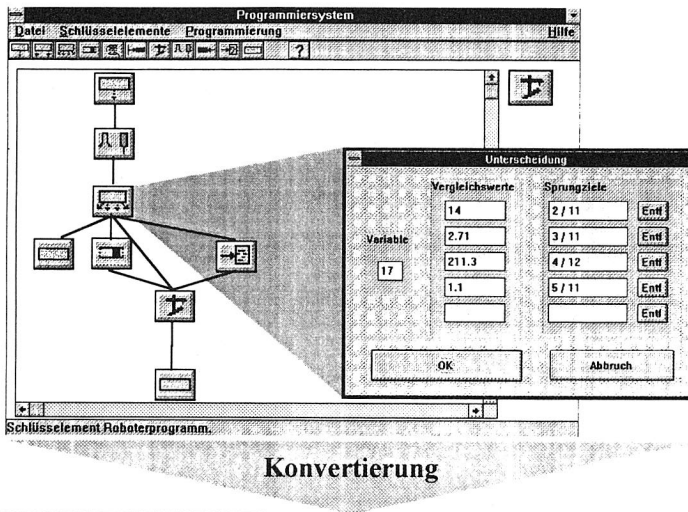
Das hier konzipierte Zellensteuerungssystem versteht sich als ein Grundsystem, welches mit der konkreten Anwendung durch geeignete Programmierung und Konfiguration verknüpft wird. Diese Programmierung erfolgt nicht auf der Ebene des Betriebssystems, sondern durch eine aufgabenorientierte Beschreibung des Ablaufes. Mit dem Ziel einer hohen Anschaulichkeit der Ablaufstruktur und einer hohen Benutzerfreundlichkeit können grafische Beschreibungsmöglichkeiten der Vorgänge genutzt werden, die eine Anschaulichkeit, wie sie von Programmablaufplänen her bekannt sind, bieten.

Die Elemente der grafischen Programmrepräsentation umfassen sowohl Komponenten zur Beschreibung des Ablaufes und des Informationsflusses als auch solche zur Durchführung der operativen Gerätesteuerung (Bild 23). Somit ist es möglich, Zellenabläufe zu erstellen, die sich durch eine strukturierte Programmierung auszeichnen.

Die Programmelemente zur Steuerung des Ablaufes umfassen Programmstart und -ende, mögliche Verzweigungen und Programmunterteilungen, die auf Grund von Zuständen oder Variablen basieren können. Zur Ausführung paralleler Operationen, wie der getrennten Steuerung verschiedener Roboter, ist eine parallele Programmbearbeitung möglich, für die die notwendigen Programmelemente zur Verfügung stehen. Die operativen Komponenten beinhalten neben der Steuerung der Geräte der Zelle auch solche zur Ermittlung der aktuellen Zustände, zur Manipulation der internen Variablen oder zur Ausgabe von Daten auf verschiedene Medien, wie Drucker, Display oder Dateien.



Die Konfiguration von Elementen der Gerätesteuerung erfolgt durch Angabe der auszuführenden Programme und der zugehörigen Parameter. Mittels Zustands- oder auch Sensorabfragen können herrschende Gerätestati oder Sensorinformationen gewonnen und in Variablen abgelegt werden. Diese Informationen finden Anwendung für Programmverzweigungen oder dokumentieren den Zellenablauf durch Ausgabe auf ein Protokollmedium.



```

Ausführbares Zellenprogramm
0001 PROG Step1 : 6 ;
0002 MESS BVS : var2, var3 ;
0003 UNTE 0004 0005 0006 0008 : var17 = 14, 2.71, 211.3, 1.1 ;
0004 ENDE 0;
0005 TRAN t_einf7.prg : var1;
      :
      :
  
```

Bild 25: Konvertierung der grafischen Darstellung in ein ausführbares Zellenprogramm

Ausgehend von dieser grafischen Darstellung erfolgt eine Konvertierung des Programms und der zugehörigen Parameter in eine Textdarstellung, um dieses geeignet durch einen Interpreter ausführen zu lassen (Bild 25). Dieses Programm wird zeilenorientiert bearbeitet, bestehend aus einer Zeilennummer, einem Schlüsselwort und dazu gehörigen Parametern. Um eine eindeutige Zuordnung zwischen grafischer Darstellung und Programmtext zu gewährleisten, werden gleichzeitig die grafischen Informationen gesichert. Zusätzlich erfolgt die Zuordnung der Programmschrittzustandsinformationen zu den Programmzeilen, um somit den Zellenzustand wäh-

rend des Programmes dokumentieren zu können. Dies gewährleistet eine weitestgehende Datenkonsistenz zwischen bestehenden Programmen und zugehörigen Zellenzuständen.

Für den Test und die Inbetriebnahme der Zellensteuerungsprogramme steht ein entsprechender Bedienerdialog im Modul der Auftragsausführung zu Verfügung (Bild 22). Dieser ermöglicht den Start, die Bearbeitung einzelner Programmzeilen oder die Ermittlung von Zellenzuständen.

### 3.2.5 Programmierung der Gerätesteuierungen

Die Ausführung der Fertigungsschritte der Zelle erfordert eine spezifische Programmierung der einzelnen Gerätesteuierungen. Diese ist Bestandteil der Zellensteuerung, um somit eine einheitliche Bedienung und Steuerung zu gewährleisten. Für Fertigungszellen mit kooperierenden Robotern umfaßt dies besonders die Programmierung der Industrieroboter und des Transportsystems. Der Programmierer der Anlage nutzt für diese Aufgaben die Funktionen der Gerätebedienung.

#### Robotersteuerung

Moderne Programmierverfahren für Industrieroboter sind zunehmend von den Anforderungen nach komfortablen Werkzeugen gekennzeichnet, wobei neben der industriell noch überwiegend angewandten Teach-in-Programmierung zunehmend auch der Einsatz von Off-line-Programmierverfahren zu verzeichnen ist [100]. Dieser Entwicklung stehen jedoch derzeit noch mehrere Problemstellungen gegenüber, die besonders den Aufwand eines Off-line-Programmiersystems bezüglich der Investition und der Erstellung der notwendigen Modelle betreffen. Zusätzlich ist ein erheblicher Anpassungsaufwand der off line erstellten Programme an die reale Anlage zu verzeichnen [143].

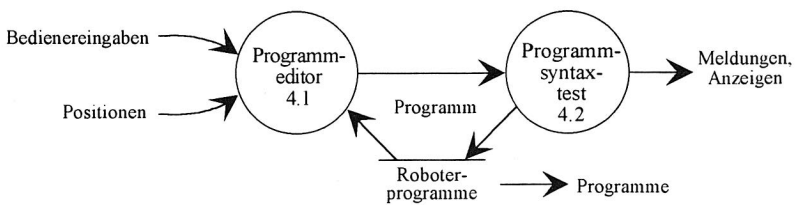


Bild 26: Funktionen der Roboterprogrammerstellung

Für die Problemstellung der Programmierung der kooperierenden Roboter ist sowohl die Funktionalität der On-line- als auch der Off-line-Programmierung zu unterstützen. Programme können unabhängig von der Roboteranlage textuell erstellt werden, wofür eine Überprüfung über die syntaktische Richtigkeit der Programme vorzunehmen ist, um etwaige Eingabefehler zu korrigieren. Eine Teach-in-Programmierung der Roboter wird dadurch ermöglicht, daß durch die Nutzung der Gerätebedienmöglichkeiten des Zellensteuerungssystems während der

Programmerstellung ein direktes Anfahren der geforderten Positionen und deren Übernahme in das Programm gegeben ist. Korrekt erstellte Programme werden gespeichert und somit anderen Modulen verfügbar gemacht. Der Test der Programme kann mit Hilfe der Gerätebedienfunktionen erfolgen (Kapitel 3.2.6).

### Transportsteuerung

Im industriellen Umfeld werden für die Transportsteuerung meist speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) eingesetzt, oder die Robotersteuerungen übernehmen diese Aufgaben zusätzlich zu ihrer Bewegungsausführung. Hierbei sind unterschiedliche Formen der Programmierung kennzeichnend, die sich an einer Darstellung von binären Ein- und Ausgängen orientieren. Anschaulicher für den Anwender sind hingegen Darstellungsformen, die den Transportvorgang implizit beschreiben. Für die Ausführung derartiger Programme ist es notwendig, entweder eine Umsetzung in ein SPS-Programm unter Zuhilfenahme der Konfiguration des Transportsystems durchzuführen oder die Transportsteuerung zur Bearbeitung dieser Programme zu befähigen.

Für die hier vorliegende Aufgabenstellung wurde eine Programmierung eines Palettentransportsystems durch Konfiguration von Transportaufträgen entworfen. Innerhalb eines Auswahlsystems können die entsprechenden Einstellungen für ein Transportprogramm vorgenommen werden (Bild 28), wobei zwischen verschiedenen Arten von Transporten unterschieden werden kann. Paletten können entweder aus- oder eingeschleust oder innerhalb der Zelle bewegt werden, wofür die Start- und Zielpunkte vorzugeben sind.

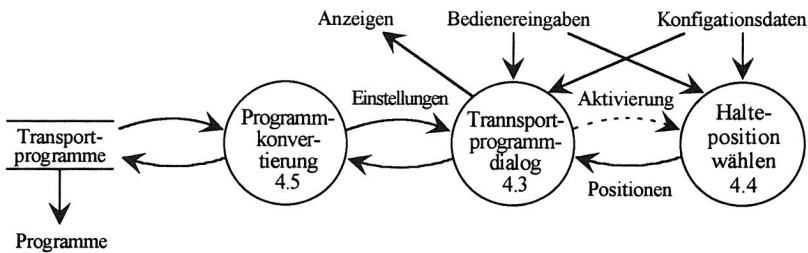


Bild 27: Darstellung der Transportsystemprogrammierung

Um eine Identifikation und Protokollierung des Transportablaufes vornehmen zu können, ist es erforderlich, die in der Zelle befindlichen Paletten zu kennzeichnen. Dies kann durch eine Vergabe von Kennungen im Programmablauf erfolgen oder durch die Nutzung von Kennzeichnungen der Paletten.

Die in dieser Form konfigurierten Transportaktivitäten werden in einer spezifizierten Textdarstellung repräsentiert. Die Auftragsausführung und die Gerätebedienung kann auf diese Programme zurückgreifen und sie zur Bearbeitung an die Transportsteuerung übergeben. Diese ist

in der Lage, sie zu interpretieren und den Transport ausführen. Der Aufbau einer derartigen Steuerung ist auf der Basis von Standardprozessorsystemen mit zusätzlichen Ein-/Ausgabebaugruppen unproblematisch möglich. Für die Ein- und Ausschleusung der Paletten ist eine Unterstützung durch Sensoren notwendig, die die Bereitschaft und das Zusammenwirken mit dem zellenexternen Transportsystem koordinieren. Zum Test der Transportprogramme werden die Funktionen der Gerätebedienung genutzt.

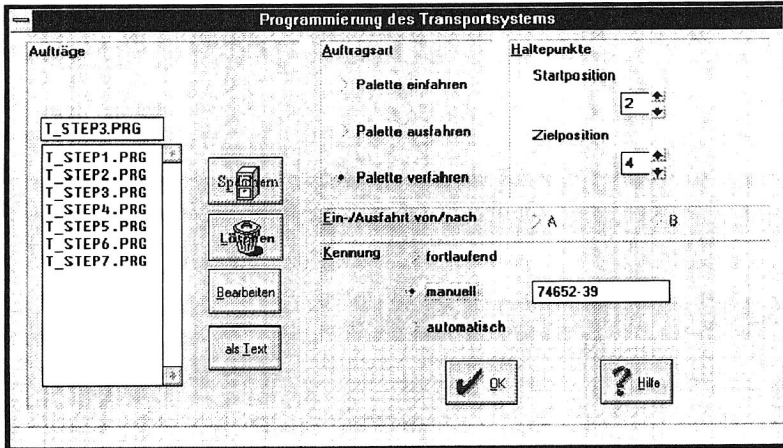


Bild 28: Dialog der Transportsystemprogrammierung

### 3.2.6 Bedienfunktionen der Zellenkomponenten

Eine essentielle Funktionalität von Zellensteuerungssystemen ist die Möglichkeit der Beobachtung und Bedienung der Aktivitäten innerhalb einer Fertigungszelle. Hierbei sind die Darstellung der aktuellen Gesamtabläufe und der Einzelgeräte für den Bediener der Anlage relevant. Gleichzeitig besteht die Anforderung nach einer Bedienbarkeit der einzelnen Komponenten, um Aufgaben der Konfiguration und Inbetriebnahme der Anlage, den Test von Programmen und die Behebung von Fehlersituationen durchführen zu können. Hierbei ist anzustreben, diese Tätigkeiten durch benutzerfreundliche Bedienmenues und Visualisierungen zu unterstützen.

Ausgangspunkt der Bedienfunktionen des konzipierten Zellensteuerungssystems bildet die Visualisierung der Aktivitäten innerhalb der Zelle (Bild 29). Die Darstellung aller Komponenten erfolgt entsprechend ihrer Anordnung innerhalb der Zelle bei einer gleichzeitigen Symbolisierung des Gerätezustandes. Somit ist es möglich, die korrekte Funktion oder die Störung einer Zellenkomponente zu erkennen. Die ständige Aktualisierung der Visualisierungsdaten wird durch einen eigenen Prozeß realisiert, der in definierten Zeitabständen die Daten von den einzelnen Geräten ermittelt und sie gleichzeitig den Bedienmodulen der Steuerungsgeräte zur



Verfügung stellt. Aus der zentralen Zellenvisualisierung heraus lassen sich die Bedien- und Anzeigefunktionen der Geräte aktivieren.

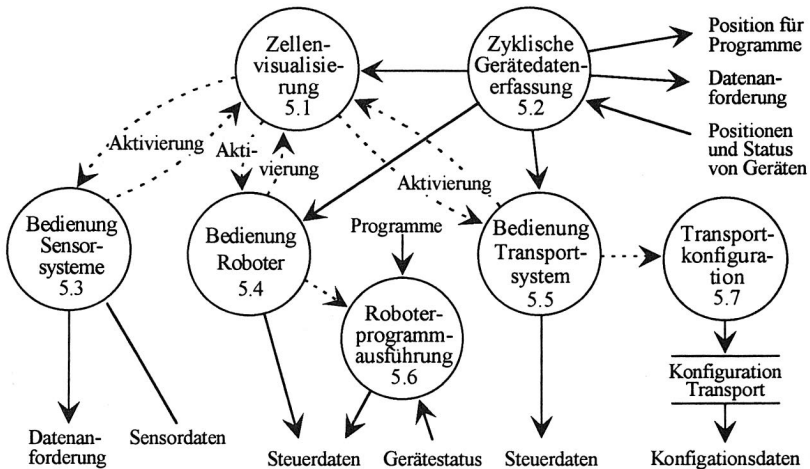


Bild 29: Informationsfluß der Bedienfunktionen

Von industriellen Robotersteuerungen werden Bedienoperationen erwartet, wie die Handsteuerung der Roboter und Greifer sowie die Aktivierung und der Test der Programme im Einzelschritt- oder Automatikmodus. Eine gleichzeitige Aktivierung der Bedienung und der Programmherstellung machen eine Teach-in-Programmierung möglich.

Bedienergeführte Transportoperationen dienen der Ausführung einzelner Palettentransporte oder der Aktivierung von Transportaufträgen. Gleichzeitig können mit Hilfe dieser Funktionen eine Konfiguration des Transportsystems, wie die Erweiterung oder die Entfernung von einzelnen Stationen, durchgeführt werden. Diese Daten stehen gleichfalls der Transportsystemprogrammierung zur Verfügung.

Zur Überwachung und Sicherung des Prozesses sind verschiedene Sensorsysteme in einer flexiblen Fertigungszelle integriert, für deren Test und Inbetriebnahme Sensorwerte angefordert und angezeigt werden können. Die Darstellungsweise ist von der Art der eingesetzten Sensorsysteme abhängig.

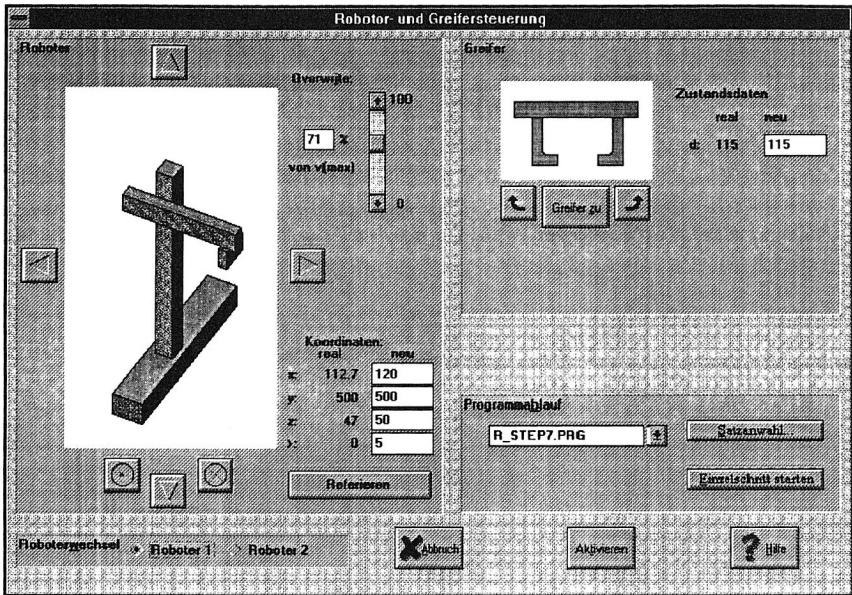


Bild 30: Dialog der Roboterbedienung

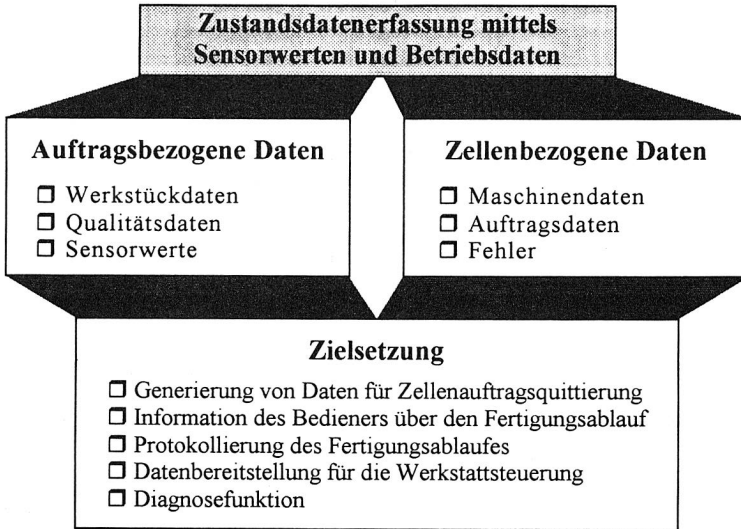
### 3.2.7 Erfassen und Protokollieren von Zellenzustandsdaten

Flexibel automatisierte Produktionssysteme zeichnen sich durch eine hohe Komplexität und die große Anzahl von eingesetzten Komponenten aus. Zu deren Steuerung und Überwachung durch die unterschiedlichen Systeme sind stets aktuelle und vollständige Daten erforderlich. Innerhalb einer flexiblen Fertigungszelle können unterschiedliche Datenquellen, wie die Auftragsausführung, die Gerätesteuernngen oder die Sensoren, genutzt werden. Diese Daten lassen sich in auftrags- und zellenbezogenen Kategorien klassifizieren.

Für die Aufnahme der Daten sind im Zellensteuerungssystem eigenständige Module erforderlich. Die auftragsbezogenen Daten umfassen Fertigungsdaten, die die durchgeführten Bearbeitungsschritte dokumentieren. Dies können beispielsweise Angaben über die Anzahl der ordnungsgemäß gefertigten Werkstücke, durch Sensoren aufgenommene werkstückspezifische Parameter oder aufgetretene Fehler sein. Bedingt durch die Notwendigkeit einer zunehmenden, durchgängigen Qualitätsüberwachung und -sicherung gewinnt gerade dieser Aspekt der Datenerfassung eine immer größere Bedeutung.

Zusätzlich zu diesen, an einen Auftrag gebundenen Daten, besteht die Anforderung, Fertigungsdaten zu gewinnen, die über einen längeren Zeitraum den Produktionsablauf charakterisieren. Hierzu gehören Angaben über die durchgeführten Aufträge, über die Laufzeit der Anla-

gen und die dabei aufgetretenen Störungen. Diese Daten dienen einerseits der Information der Bediener und werden von den Systemen der Produktionsplanung und -steuerung benötigt.



*Bild 31: Möglichkeiten und Zielsetzungen der Datenerfassung*

Aufbauend auf diese ermittelten Daten können innerhalb der Zelle Diagnosefunktionen integriert werden, die zur Fehlererkennung, Fehlerlokalisierung und Fehlerbehebung dienen können [146]. Grundsätzlich kann eine Datendarstellung erfolgen, die dem Bediener eine Bestimmung und Behebung der Fehlerursache ermöglicht. Andererseits können durch Diagnosefunktionen Fehlerursachen lokalisiert und dem Bediener zur Beseitigung angezeigt werden. Aber auch die automatische Diagnose und eine daran anschließende Fehlerbehebung, wie zum Beispiel durch Recovery, sind an dieser Stelle einsetzbar.

### 3.3 Steuerungsintegration in einer Fertigungszelle durch standardisierte Kommunikation

#### 3.3.1 Kommunikation mit MMS in der Fertigung

In der automatisierten Fertigung geht der Trend zunehmend zu verteilten und vernetzten Strukturen zur Bewältigung der steigenden Anforderungen nach Flexibilität und Leistungsfähigkeit. Diese komplexen Systeme erfordern einen durchgängigen Informationsfluß von der Planungs- bis zur Steuerungsebene. Zur Lösung der spezifischen Anforderungen werden Komponenten unterschiedlicher Hersteller auf verschiedenen Hardwareplattformen eingesetzt. Hierbei besteht die Forderung nach einheitlichen, normierten und herstellernunabhängigen Schnittstellen, um individuelle Lösungen mit den damit verbundenen hohen Kosten zu vermeiden [99, 111]. Zudem soll der Anwender keine speziellen Kenntnisse über die einzelnen Geräte mehr benötigen, sondern die Verbindung erfolgt über genormte Schnittstellen.

Unter diesem Gesichtspunkt der Vereinheitlichung des Datenflusses wurde die Norm „Manufacturing Automation Protocol“ (MAP) für die Belange der Fertigungsautomatisierung geschaffen [10]. Sie baut auf das ISO/OSI-7-Schichten-Referenzmodell [54] auf, wobei die Anwenderschicht durch das Protokoll „Manufacturing Message Specification“ (MMS) [55] definiert wird. Diese ist gekennzeichnet durch ein Client-Server-Verhalten der Kommunikationspartner, wobei ein Client einen bestimmten Dienst anfordert, der von einem Server erbracht wird. Somit ist eine einheitliche Sichtweise auf die einzelnen Geräte gegeben.

Ein Automatisierungsgerät wird bei MMS durch ein „Virtual Manufacturing Device“ (VMD) repräsentiert. Dieses beinhaltet eine Menge von Objekten, die die Funktionalität und das Verhalten des Gerätes abstrakt darstellen. Die Art der Objekte ist dabei abhängig von der Implementierung des Servers.

Ein Client nutzt die Funktionalität eines VMD mit definierten Diensten auf dessen Objekte. Die Gruppe der administrativen Dienste dient der Aufnahme, dem Abbruch und der Steuerung der Verbindungen zwischen den Geräten. Der Informationsaustausch zwischen den Partnern erfolgt bei MMS stets verbindungsorientiert, d.h. es muß vor einem Datenaustausch eine Verbindung zwischen Client und Server aufgebaut werden. Die produktiven Dienste stehen zur Erzeugung, Löschung, Manipulation oder Abfrage von Objekten zur Verfügung [10].

Die alle 7 Schichten umfassende Full-MAP-Architektur hat sich vor allem in den Bereichen der oberen Fertigungshierarchie etabliert. Für die Ebenen der prozeßnahen Steuerungen auf Zellebene ist der Aufwand hinsichtlich Implementierung und notwendiger Rechenleistung zu hoch [39]. Dadurch bedingt, bildeten sich für das Umfeld der Prozeßsteuerungen eigene Feldbusstandards, wie beispielsweise der PROFIBUS [8] und der FIP-Bus [5] heraus. Diese verzichten auf Schichten der Kommunikationsarchitektur, um somit ein verbessertes Zeitverhalten

und eine Minimierung des Aufwandes zu erreichen. Sie sind jedoch nicht konform mit der MMS-Spezifikation. Doch gerade diese Konformität ist entscheidend für die Zielstellung eines durchgängigen Informationsflusses [4].

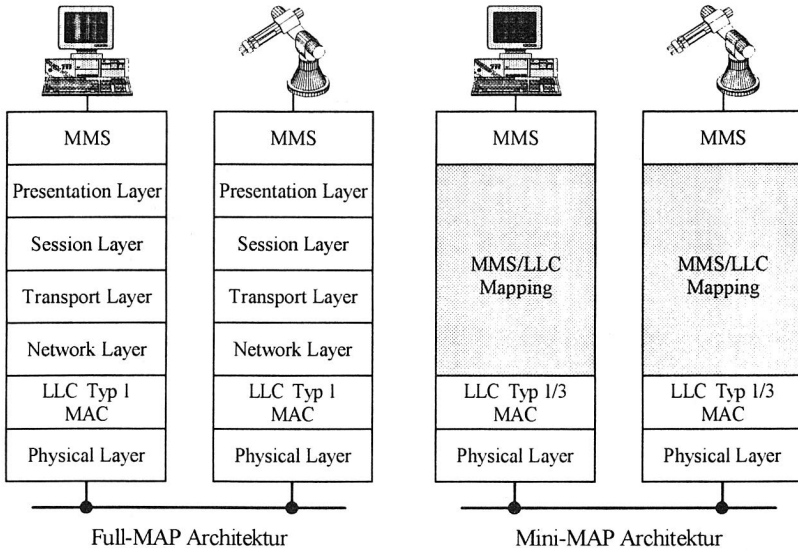


Bild 32: Reduktion des Protokollaufwandes durch Mini-MAP

Basierend auf diesen Anforderungen wurde eine Mini-MAP-Architektur geschaffen, die auf die Schichten 3-6 verzichtet (Bild 32). Dies führt zu einer wesentlichen Vereinfachung der Protokollbearbeitung und damit zu einer Aufwandsreduktion [39], was ein ausschlaggebender Grund für die Einsatzfähigkeit von Mini-Map für zeitkritische Prozesse in der Fertigungsumgebung ist. Seine erste Ausprägung fand die Mini-MAP-Architektur in dem japanischen Feldbusstandard FIAS [132]. Bedingt durch den Wegfall der Transportschicht, die die Verbindung der Kommunikationspartner überwacht, wurden für die Schicht 2 weitere Dienste definiert, die eine verbindungslose Kommunikation mit sofortiger Bestätigung ermöglichen. Diese Dienste vom Typ „Logical Link Control 3“ (LLC3) ermöglichen darüber hinaus die Übermittlung einer Nachricht an mehrere Netzteilnehmer sowie eine Datenübertragung des angesprochenen Teilnehmers direkt mit der Meldungsquittung [57].

### 3.3.2 Integrationsaspekte von MMS in eine flexible Roboterzelle

Um die anwendungsspezifischen Eigenschaften der verschiedenen Automatisierungsgeräteklassen berücksichtigen zu können, wurden MMS-Companion-Standards geschaffen. Zu den

bereits in MMS vorhandenen umfangreichen Diensten und Objekttypen werden hier für die jeweiligen Geräteklassen Erweiterungen und neue Definitionen hinsichtlich der speziellen Anforderungen getroffen.

Für den Bereich der Robotersteuerungen ist der „Companion Standard for Robotics“ entwickelt worden [56]. Dieser beinhaltet besonders Erweiterungen der VMD-Attribute (Bild 33). Die Gesichtspunkte der Sicherheitsfunktionen, der Betriebsbereitschaft und der Zustand der Meßsysteme des Roboters wurden somit gesondert beachtet. Gleichzeitig ist es möglich, über ein ergänzendes Attribut den Zustand der Programmausführung zu ermitteln.

Die Struktur anderer Objekte wurde nicht verändert, aber es wurden hierfür Standardisierungen eingeführt. Mit diesen lassen sich die spezifischen Eigenschaften des Roboters und zusätzlicher Einrichtungen darstellen. Für die hier vorliegende Fertigungszelle wurden die kooperierenden Roboter als ein VMD modelliert. Darüber hinaus legt der Companion-Standard Dienste fest, die einerseits der Ermittlung des VMD-Status und andererseits der Steuerung des Programmablaufes und des Roboters dienen.

<b>Objekt:</b>	<b>VMD</b>
<b>All MMS defined Attributes</b>	
Attribute:	Safety Interlocks Violated (TRUE, FALSE)
Attribute:	Robot Operation State (ROBOT-IDLE, ROBOT-LOADED, ROBOT-READY, ROBOT-EXECUTING, ROBOT-PAUSED, MANUAL-INTERVENTION-REQUIRED)
Attribute:	Any Physical Resource Power On (TRUE, FALSE)
Attribute:	All Physical Resources Calibrated (TRUE, FALSE)
Attribute:	Local Control (TRUE, FALSE)
Attribute:	Reference to Selected Controlling Program Invocation

*Bild 33: Darstellung eines Robotersystems als VMD-Objekt [56]*

Die Umsetzung von MMS erfolgt auf einem Zellenrechner, dessen Anwendungsfunktionen unter MS-Windows erstellt werden und einer Robotersteuerung, die als Grundlage das Echtzeitsystem OS-9 [80] besitzt (Bild 34). Auf Grund des schlechten Zeitverhaltens von MS-Windows wurde eine Echtzeiterweiterung [90] genutzt, die es erlaubt, die zeitproblematischen Kommunikationsfunktionen als Hintergrundprozeß durchzuführen. Die Verbindung erfolgt dabei über einen „Inter-Process-Communication-Handler“ (IPC-Handler) und gemeinsame Speicherbereiche.

Die Strukturierung der Verarbeitung der Prozeßdaten zwischen Robotersteuerung und Zellenrechnersystem erfolgt entsprechend der Abstract Syntax Notation (ASN.1) [58]. Hieraus werden die entsprechenden Routinen für die Erzeugung und Analyse der Prokolldateneinheiten (PDU) generiert und in das jeweilige Echtzeitsystem implementiert. Der Zugriff auf die Sicherungsschicht (LLC3) erfolgt über deren Dienstzugangspunkte (SAP). Die Dienste der medien-

unabhängigen LLC3-Schnittstelle sind für die Datenübertragung und -überwachung über die Medienzugangsstelle (MAC) verantwortlich. Der hierfür notwendige Prozeß ist ebenfalls innerhalb des Echtzeitsystems realisiert.

Unterhalb der MAC-Schnittstelle wurde ein nicht im MAP-Standard vorgesehenes Protokoll eingesetzt. Hierfür fand das im Bereich der Bürokommunikation weit verbreitete Arcnet Anwendung [74]. Hauptgesichtspunkt war vor allem, die Verfügbarkeit eines entsprechenden Controllers, der den Aufbau von Anschaltungen ermöglicht und den Softwareaufwand reduziert. Um die im Bereich der Fertigungsautomatisierung notwendige Störsicherheit für den Einsatz von Arcnet zu erzielen, wurde eine physikalische Übertragung entsprechend dem RS-485-Standard gewählt.

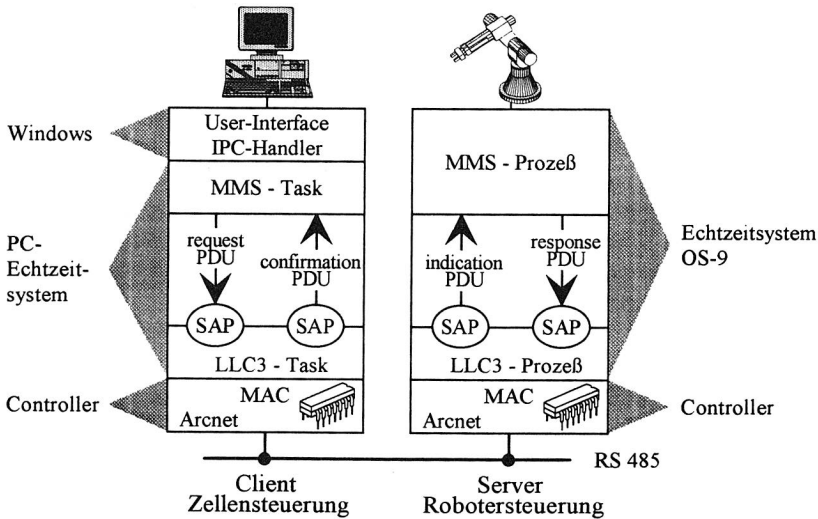


Bild 34: Umsetzung der MAP-Architektur auf die Roboterzelle

Das Arcnet-Protokoll nutzt zur Zuteilung der Senderechte ein gleichberechtigtes Token-Passing-Verfahren, wodurch sich eine maximale Antwortzeit in Abhängigkeit der Teilnehmerzahl an der MAC-Schnittstelle angeben läßt. Der Empfang einer Nachricht wird durch den Teilnehmer sofort bestätigt, was den Dienst der LLC3-Schnittstelle unmittelbar unterstützt. Arcnet bietet zudem eine hohe Datenübertragungsrate von 2,5 MBit/s, wodurch ein Einsatz für Kommunikationaufgaben in der Fertigung gegeben ist.

## 4 Bewegungssynthese und Kollisionsvermeidung für kooperierende Roboter

Verschiedene Fertigungstechnologien bedingen beim Einsatz von kooperierenden Robotern kennzeichnende Bewegungsabläufe. Für deren Anforderungen sind geeignete Bahnplanungsmethoden zu konzipieren, die den Integrationsanforderungen in die Robotersteuerung genügen. Zur Einbeziehung von zusätzlichen Sensorinformationen ist es darüber hinaus notwendig, den Bewegungsprozeß derart zu gestalten, daß eine sensor- und positionsgeführte Bahnbewegung realisiert werden kann. Gleichzeitig treten beim Betrieb von Anlagen mit mehreren Robotern die Probleme der Vermeidung von Kollisionen verstärkt zu Tage. Bedingt durch unabhängige Bewegungen der Roboter oder durch Sensordatenintegration, ist eine Vorausbestimmung der exakten Bewegungsbahn oftmals nicht möglich, so daß On-line-Verfahren zur Kollisionsvermeidung hierfür von besonderer Bedeutung sind.

### 4.1 Methoden zur Bahnplanung und Bahnführung von kooperierenden Robotern

#### 4.1.1 Kinematische Voraussetzungen

Die Bahnplanung von kooperierenden Robotern erfordert, bedingt durch eine geschlossene kinematische Kette, erweiterte Formen der Bewegungserzeugung. Für die Darstellung der kinematischen Beziehungen ist es notwendig, die räumliche Lage der Roboterhand oder eines daran befestigten Werkzeuges geometrisch beschreiben zu können [136]. Hierzu werden den Robotern je ein im Greifer lokalisiertes, kartesisches Koordinatensystem ( $R_1$ ,  $R_2$ ) zugeordnet, dessen Stellung in einem raumfesten Basissystem ( $B$ ) durch Position und Orientierung gekennzeichnet ist (Bild 35). Hierbei wird von einem einzigen Bezugskordinatensystem ausgegangen, in dem die Beschreibung der Positionen beider Roboter erfolgt.

Die Darstellung von Koordinaten eines Koordinatensystems in einem anderen wird mittels homogener Transformationen durchgeführt (Gl. 1) [136].

$${}^B_{R_1}\underline{T} = \begin{bmatrix} {}^B_{R_1}\underline{e}_x & {}^B_{R_1}\underline{e}_y & {}^B_{R_1}\underline{e}_z & \underline{q}_{R_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 1}$$

Bei dieser Beschreibungsform ist eine Angabe der Lage eines Koordinatensystems in einem anderen durch drei Rotations- und einen Translationsvektor gegeben. Bedingt durch die hohe Redundanz der Positionsbeschreibung, erfolgt die Positionsangabe üblicherweise in einer Framedarstellung  $\underline{f} = (x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)^T$  durch die kartesischen Position und die Orientierung in Eulerwinkeln.



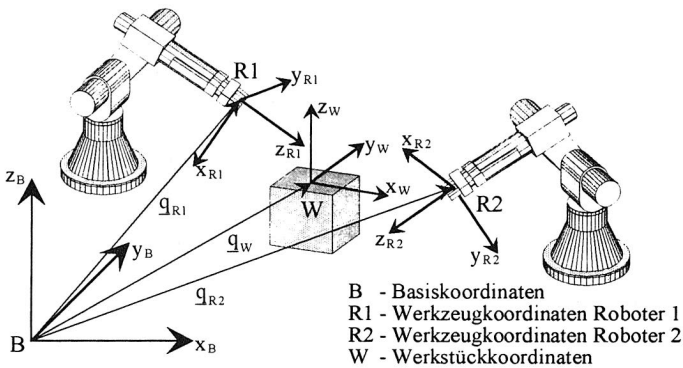


Bild 35: Koordinatensysteme innerhalb einer Roboterzelle

## 4.1.2 Formen der Bahnplanung

### Linearinterpolation

Die Erzeugung von kartesischen Raumkurven erfolgt durch punktweise Interpolation entsprechend vorgegebener, geometrischer Beziehungen. Die Bewegung von einem Startpunkt  $\underline{P}_s$  zu einem Zielpunkt  $\underline{P}_z$  auf einer Geraden wird in Abhängigkeit eines Bahnparameters  $d$  durchgeführt [107].

$$\underline{P}_s = (x_s, y_s, z_s, \alpha_s, \beta_s, \gamma_s)^T \quad ; \quad \underline{P}_z = (x_z, y_z, z_z, \alpha_z, \beta_z, \gamma_z)^T \quad \text{Gl. 2}$$

Der Bahnparameter  $d$  bestimmt sich aus der zurückzulegenden Bahnlänge oder Orientierungsänderung im Verhältnis zur Gesamtstrecke (Gl. 3), wodurch eine overrideunabhängige Bewegungsführung gewährleistet werden kann. Die Entscheidung, ob der Bahnparameters  $d$  in Abhängigkeit des zurückgelegten Bahnlänge oder der Orientierung bestimmt wird, erhält man an Hand der benötigten Bewegungszeit.

$$d = \frac{l}{\sqrt{(x_z - x_s)^2 + (y_z - y_s)^2 + (z_z - z_s)^2}} \quad \text{oder} \quad d = \frac{\varphi}{\sqrt{(\alpha_z - \alpha_s)^2 + (\beta_z - \beta_s)^2 + (\gamma_z - \gamma_s)^2}} \quad \text{Gl. 3}$$

Der momentan zurückgelegte Weg wird aus den geforderten Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsgrößen der Bewegung bestimmt. Hiermit ergibt sich die zyklisch zu ermittelnde Interpolationsfunktion eines aktuellen Punktes  $\underline{P}_A$  zu:

$$\underline{P}_A = \underline{P}_s + d \cdot (\underline{P}_z - \underline{P}_s) \quad \text{Gl. 4}$$

### Zirkularinterpolation

Für die Interpolation eines Kreisbogens ist es notwendig, neben dem Startpunkt  $\underline{P}_S$  und dem Zielpunkt  $\underline{P}_Z$  einen weiteren Hilfspunkt  $\underline{P}_H$  auf der Kreisbahn anzugeben. Zur Vereinfachung der geometrischen Verhältnisse wird ein Hilfskoordinatensystem im Startpunkt festgelegt, welches eine Interpolation in der neuen x-y-Ebene erlaubt (Bild 36) [65]. Die Richtungsvektoren dieses Koordinatensystems lauten somit:

$$\begin{pmatrix} \underline{e}_{x_s} \\ \underline{e}_{y_s} \\ \underline{e}_{z_s} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{P_S P_H}^* \\ \left( \overline{P_S P_H}^* \times \overline{P_S P_Z}^* \right) \times \overline{P_S P_H}^* \\ \underline{e}_{x_s} \times \underline{e}_{y_s} \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad \overline{P_S P_H}^* = \frac{\overline{P_S P_H}}{|\overline{P_S P_H}|} \quad \text{Gl. 5}$$

$$\overline{P_S P_Z}^* = \frac{\overline{P_S P_Z}}{|\overline{P_S P_Z}|}$$

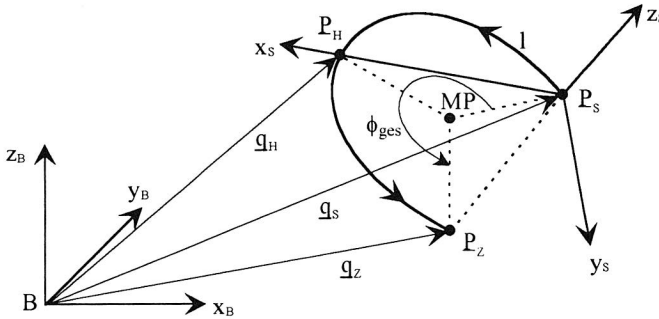


Bild 36: Bezugssysteme für die Zirkularinterpolation

Die Transformationsbeziehung eines Punktes in das Basissystem ergibt sich mit Hilfe der Richtungsvektoren des Hilfskoordinatensystem zu:

$${}^B \underline{T}_S = \begin{pmatrix} \underline{e}_{x_s} & \underline{e}_{y_s} & \underline{e}_{z_s} & \underline{q}_s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 6}$$

Die Koordinaten des Mittelpunktes im Hilfskoordinatensystem und der Radius des Kreisbogens können aus den Punktkoordinaten der drei Stützpunkte ermittelt werden:

$$\begin{pmatrix} x_M \\ y_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}(x_H - x_S) \\ \frac{(x_Z - x_S)^2 + (y_Z - y_S)^2 + (x_H - x_S)(x_Z - x_S)}{2(y_Z - y_S)} \end{pmatrix} ; \quad r = \sqrt{x_{MP}^2 + y_{MP}^2} \quad \text{Gl. 7}$$

Gleichzeitig ist es möglich, den zu durchlaufenden Winkel  $\phi_{ges}$  zu bestimmen. Die Interpolation der Kreisbahn erfolgt vergleichbar mit der Linearinterpolation, wobei der Bahnparameter  $d$  aus

der Länge des zurückgelegten Weges  $l$  auf dem Kreisbogen ermittelt wird. Die Bahnpunkte können in Basiskoordinaten somit wie folgt angegeben werden:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = {}^B_{P_s} T \cdot \begin{pmatrix} r \cdot \cos(k \cdot \phi_{ges}) + x_M \\ r \cdot \sin(k \cdot \phi_{ges}) + y_M \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} ; \quad \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = d \cdot \begin{pmatrix} \alpha_z - \alpha_s \\ \beta_z - \beta_s \\ \gamma_z - \gamma_s \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \alpha_s \\ \beta_s \\ \gamma_s \end{pmatrix} \quad \text{mit } d = \frac{l}{l_{ges}} \quad \text{Gl. 8}$$

**Überschleifen**

Besteht die Forderung nach einem stetigen Geschwindigkeitsübergang zwischen zwei Bahnsegmenten, so ist hierfür eine geeignete Übergangsfunktion notwendig, die von einem Startpunkt  $P_U$  auf der ersten Bahn über einen Zwischenpunkt  $P_M$  in den Endpunkt  $P_E$  der zweiten Bahn verläuft (Bild 37). Für einen stetigen Bahnverlauf können unterschiedliche Übergangsfunktionen, wie kubische Splines [6] oder Funktionen höherer Ordnung [16], eingesetzt werden. Mit dem Ziel eines geringen Berechnungsaufwandes der Algorithmen wurde für die Überschleif-funktion eine quadratische Parabel gewählt, die sich asymptotisch an die beiden Bewegungs-bahnen in den Übergangspunkten anschmiegt [107]. Die Punkte des Überschleifbeginns und -endes können in Abhängigkeit der aktuellen Geschwindigkeit oder als absoluter Bahnpunkt vorgegeben werden.

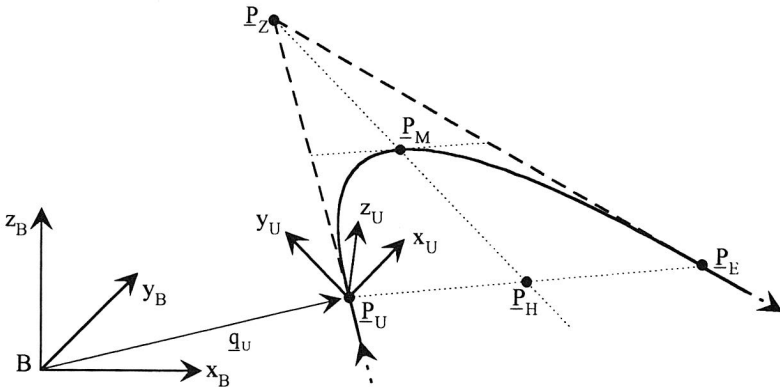


Bild 37: Überschleifen zwischen zwei Bahnsegmenten

Ausgangspunkt der Betrachtungen bildet das Überschleifen von zwei linearen Bewegungs-bahnen. Die Ermittlung der Interpolationspunkte der Überschleifbewegung erfolgt zur Vereinfachung der Berechnungen in einem Hilfskoordinatensystem im Startpunkt. Zusätzlich wird ein Stützpunkt  $P_H$  im Mittelpunkt der Geraden  $\overline{P_U P_E}$  eingeführt, so daß sich die Richtungsvektoren des Koordinatensystems wie folgend ergeben:

$$\begin{pmatrix} \underline{e}_{x_U} \\ \underline{e}_{y_U} \\ \underline{e}_{z_U} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{P_H P_Z}^* \times \left( \overline{P_U P_E}^* \times \overline{P_H P_Z}^* \right) \\ \overline{P_H P_Z}^* \\ \overline{P_U P_E}^* \times \overline{P_H P_Z}^* \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad \begin{aligned} \overline{P_U P_E}^* &= \frac{\overline{P_U P_E}}{|\overline{P_U P_E}|} \\ \overline{P_H P_Z}^* &= \frac{\overline{P_H P_Z}}{|\overline{P_H P_Z}|} \end{aligned} \quad \text{Gl. 9}$$

Für die Parabel gelten die Randbedingungen, daß der Anstieg des Überschleifbeginns und -endes gleich dem der linearen Bahnen im Start- und Endpunkt ist. Somit kann folgende Beziehung im neuen Koordinatensystem angegeben werden:

$$f(x) = bx^2 + cx = \frac{m_E - m_U}{2x_E} x^2 + m_U x \quad \text{mit} \quad \begin{aligned} m_U &= \frac{y_Z - y_U}{x_Z - x_U} \quad \text{Steigung in } P_U \\ m_E &= \frac{y_Z - y_E}{x_Z - x_E} \quad \text{Steigung in } P_E \end{aligned} \quad \text{Gl. 10}$$

Die Interpolation erfolgt in Abhängigkeit der zurückgelegten Bahnlänge  $l$ . Dazu ist die Gesamtlänge des Parabelbogens erforderlich, die sich ausgehend von Scheitelpunkt  $\underline{P}_M$  bis zu einem Punkt auf der Parabel wie folgt bestimmt:

$$l(y) = \frac{p}{2} \left( \sqrt{\frac{2y}{p} \cdot \left( \frac{2y}{p} + 1 \right)} + \ln \left( \sqrt{\frac{2y}{p}} + \sqrt{1 + \frac{2y}{p}} \right) \right) \quad \text{mit} \quad p = \frac{1}{2 \cdot |b|} \quad \text{Gl. 11}$$

als Halbparameter der Parabel

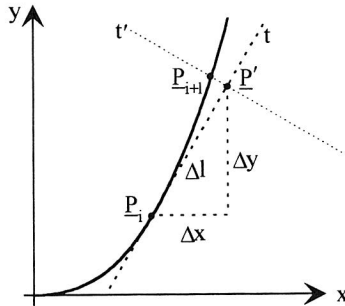


Bild 38: Abbildung der Bahninkremente auf die Parabel

Die Überschleifbewegung kann sowohl für gleiche als auch für unterschiedliche Geschwindigkeiten im Start- und Endpunkt erfolgen. Für die Abbildung der ermittelten Weginkremente  $\Delta l$  auf die Parabel wurde ein Näherungsverfahren herangezogen (Bild 38). Hierzu wird im aktuellen Punkt  $P_i$  eine Tangente  $t$  an die Parabel gelegt. Auf dieser ist in Richtung der Bewegung der Punkt  $P'$  mit dem Abstand  $\Delta l$  anzutragen. Die Tangente  $t$  wird in diesem Punkt von der

Senkrechten  $t'$  geschnitten, die gleichzeitig die Parabel im gesuchten Punkt  $P_{i+1}$  schneidet. Die Gerade  $t'$  bestimmt sich zu:

$$y = -\frac{1}{m_i} \left( x - (x_i + \Delta l \cdot \cos \varphi) \right) + (y_i + \Delta l \cdot \sin \varphi) \quad \text{mit} \quad \tan \varphi = f'(x_i) = m_i \quad \text{Gl. 12}$$

Bedingt durch die Mehrdeutigkeit der Bestimmung der Koordinaten des Schnittpunktes von  $t'$  mit der Parabel, muß an Hand des aktuellen Bahnpunktes entschieden werden:

$$x_{i+1} = -\frac{1}{2b \cdot m_i} \pm \sqrt{\frac{1}{4b^2 \cdot m_i^2} - \frac{1}{b} \left( c - \frac{(x_i + \Delta l \cdot \cos \varphi)}{m_i} - (y_i + \Delta l \cdot \sin \varphi) \right)}$$

$$y_{i+1} = f(x_{i+1}) \quad \text{Gl. 13}$$

Mit diesem Verfahren können die Koordinaten des Punktes  $P_{i+1}$  nur näherungsweise bestimmt werden, wobei jedoch bei kleinen Werten für  $\Delta l$ , wie dies hier gegeben ist, eine hinreichende Genauigkeit erzielt wird. Die Transformation der Punkte in das Basissystem erfolgt mittels der in Gl. 9 ermittelten Richtungsvektoren und der Lage des Startpunktes der Überschleifbahn. Die Orientierung ist entsprechend nach Gl. 8 zu bestimmen.

**Überschleifen einer Kreisbahn**

Erfolgt ein Überschleifen zwischen einer Kreis- und einer Linearbewegung oder zwei Kreisbahnen, so ist festzustellen, daß die Tangenten der beiden Bewegungen windschief zueinander liegen können. Um trotzdem das Verfahren des Überschleifens mittels eines Parabelbogens anwenden zu können, wird die Bewegung in zwei Bereiche eingeteilt. Am Start- und Endpunkt der Überschleifbahn wird eine Tangente  $t$  gelegt (Bild 39), auf der sich ein Hilfspunkt  $\underline{P}_H$  befindet. Der Abstand von  $\underline{P}_U \underline{P}_{H1}$  entspricht dabei der halben Distanz von  $\underline{P}_U \underline{P}_Z$  auf dem zu überschleifenden Kreisbogen.

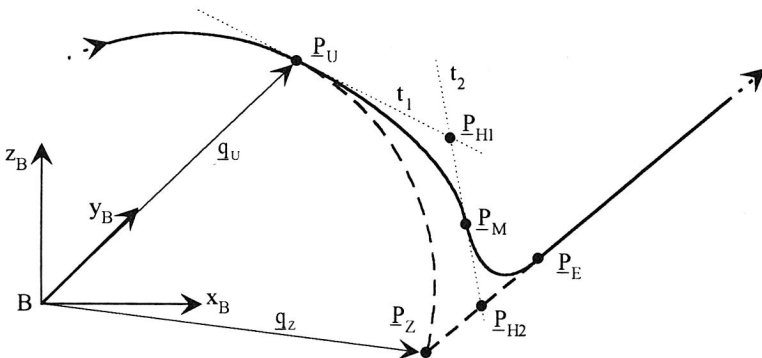


Bild 39: Bahnüberschleifen zwischen einem Zirkular- und Linearstrich

Im Falle einer zweiten Linear- anstelle einer Zirkularbahn wird der Punkt  $\underline{P}_{H2}$  mittig zwischen  $\underline{P}_Z$  und  $\underline{P}_E$  angeordnet. Die beiden zusätzlichen Punkte  $\underline{P}_{H1}$  und  $\underline{P}_{H2}$  dienen der Darstellung der Geraden  $t_2$ , auf der sich zwischen beiden ein Übergangspunkt  $\underline{P}_M$  befindet. Dieser bildet die Nahtstelle zwischen zwei ebenen Parabelinterpolationen. Die Anstiege der beiden Parabelbögen werden durch die Tangenten in  $\underline{P}_U$  und  $\underline{P}_E$  sowie die Gerade  $t_2$  gegeben, so daß sich eine Über-schleifbewegung wie zwischen drei Geraden ergibt.

### 4.1.3 Kooperierende Bahnführung mit virtuellem Master

Wie bereits in Kapitel 2.1.5 eingeführt, ergeben sich für kooperierende Roboter unterschiedliche Bewegungsformen. Für unabhängige oder synchronisierte Bahnen können die vorgestellten Interpolationsverfahren uneingeschränkt eingesetzt werden. Besteht die Forderung, koordinierter Bewegungen mehrerer Roboter mit gleichen Start- und Endzeitpunkten auszuführen, so kann dies durch einen Abgleich der Geschwindigkeiten und Beschleunigungen erfolgen.

Kooperierende Bewegungen mit definierten, kinematischen Beziehungen zwischen den einzelnen Robotern erfordern erweiterte Methoden der Bewegungsführung. Hierbei bilden die Roboter eine geschlossene kinematische Kette. Die Lösung dieser Problemstellung durch Bahnvorgabe im kartesischen Raum erfolgte bisher vornehmlich nach dem Prinzip der Master-Slave-Steuerung [93, 144]. Hierbei wird einem Roboter eine Bewegungsbahn im Raum zugeordnet, zu der ein Slave eine relative Lage einnimmt oder sich zu ihr bewegt. Die Beschreibung der Bewegung kann andererseits durch eine zusätzlichen Kinematik erfolgen [82]. Diese und weitere Verfahren [98] wurden überwiegend in Off-line-Programmiersystemen zur Generierung der Bewegungsbahnen genutzt.

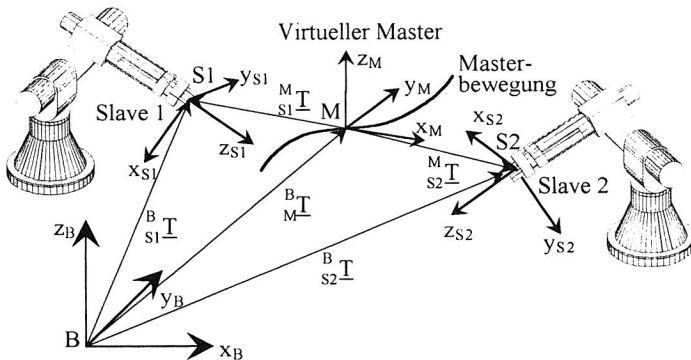


Bild 40: Koordinationsprinzip eines virtuellen Masters

Das hier vorgestellte Bewegungskonzept hat demgegenüber die Zielsetzung, Bahnplanungsverfahren zu entwerfen, die auf den vorgestellten Interpolationsverfahren beruhen und eine

kooperierende Bahnbewegung mit definierten, gegenseitigen geometrischen Beziehungen zwischen mehreren Industrierobotern ermöglicht. Diese Verfahren sollen derart gestaltet sein, daß sie on line in der Robotersteuerung ausgeführt werden können. Zur Beschreibung dieser kooperierenden Bahnen wird ein virtuelles, positionsveränderliches Masterkoordinatensystem eingeführt (Bild 40). Dessen Bewegungen sind maßgebend für die gesamten auszuführenden Operationen. Die Beschreibung der Bahnen der Slaves erfolgt relativ zu diesem Mastersystem. Dadurch ergeben sich mehrere überlagerte Bahnbewegungen, die letztlich die Bahn für den einzelnen Roboter bestimmen. Somit kann die Position des Werkzeugkoordinatensystems durch die sich ergebende Transformationsbeziehungen beschrieben werden.

$$\begin{aligned}
 {}^B_{S1}T &= {}^B_M T \cdot {}^M_{S1}T && \text{Slave 1} \\
 {}^B_{S2}T &= {}^B_M T \cdot {}^M_{S2}T && \text{Slave 2}
 \end{aligned}
 \tag{Gl. 14}$$

Die Interpolation erfolgt durch eine unabhängige Bestimmung der Bahnen von Master und Slave. Hiermit ist neben einer kooperierenden Steuerung von mehreren Robotern auch die Erzeugung von erweiterten Formen von überlagerten geometrischen Bahnen auf der Basis einfacher Interpolationsalgorithmen für einzelne Roboter möglich.

#### 4.1.4 Formen kooperierender Bewegungen

Ausgehend vom Prinzip eines virtuellen Masters lassen sich unterschiedliche Bewegungsformen spezifizieren (Bild 41). Sie unterscheiden sich hauptsächlich in der zeitlichen Synchronisation und in einer Schachtelung von Einzelbewegungen.

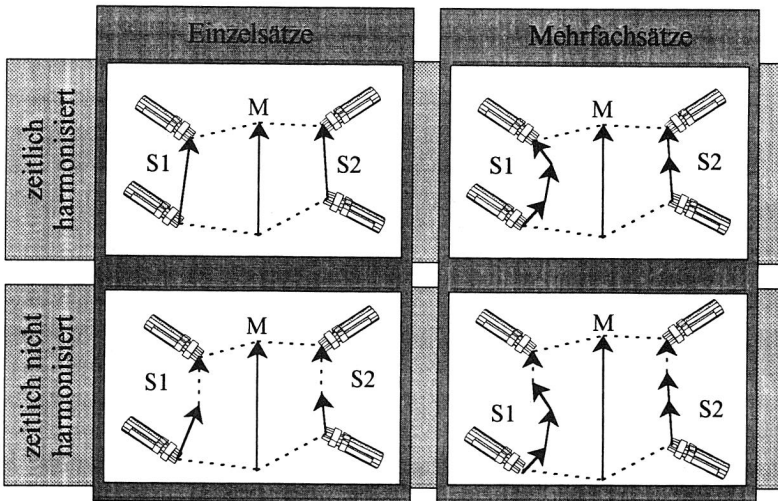


Bild 41: Prinzipien kooperierender Bewegungen

Grundform ist die gleichzeitige Ausführung eines Bewegungssatzes des Masters und einer Relativbewegung der Slaves mit einer Harmonisierung der Bewegungszeiten. Eine zeitliche Harmonisierung der Bewegungen ist gegeben, wenn sich die Roboter zu gleichen Zeitpunkten an den Start- und Endpunkten ihrer Bahnen befinden. Fallen zusätzlich die Koordinatensysteme von Master und einem Slave zusammen, so wird dadurch das bereits erwähnte einfache Master-Slave-Verfahren erzielt.

Besteht technologisch die Notwendigkeit, eine gegenseitige Beeinflussung der Bewegungszeiten auszuschließen, so kann dies durch eine teilweise oder gänzliche Auflösung der zeitlichen Bindungen erfolgen. Somit können beispielsweise nur die Harmonisierung zwischen den Slaves beibehalten werden.

Bei den bisherigen Lösungen war es notwendig, daß eine gleiche Anzahl von Bewegungen für alle Roboter gegeben war [93]. Besteht jedoch die Problemstellung, von einem Slave mehrere kurze Bewegungen auszuführen, wohingegen der Master nur eine einzige Bahn verfahren soll, so ist die Masterbewegung in entsprechende Teilstücke zu zerlegen. Hierfür wurde eine geeignete Bewegungsform konzipiert, die die Möglichkeit schafft, mehrere Slave- zu einer Masterbewegung auszuführen. Bei dieser Form werden die Einzelbewegungen den jeweiligen Slaves zugeordnet und anschließend gemeinsam ausgeführt. Einsatz kann dies bei Montageoperationen finden, wo ein Roboter ein Grundteil bewegt und ein zweiter Roboter die Teilemontage durchführt. Die Bewegung des Grundteils muß dabei nicht unterbrochen werden. Hier ist gleichfalls eine anwendungsbedingte Unterscheidung nach einer zeitlichen Harmonisierung der Bahnen gegeben.

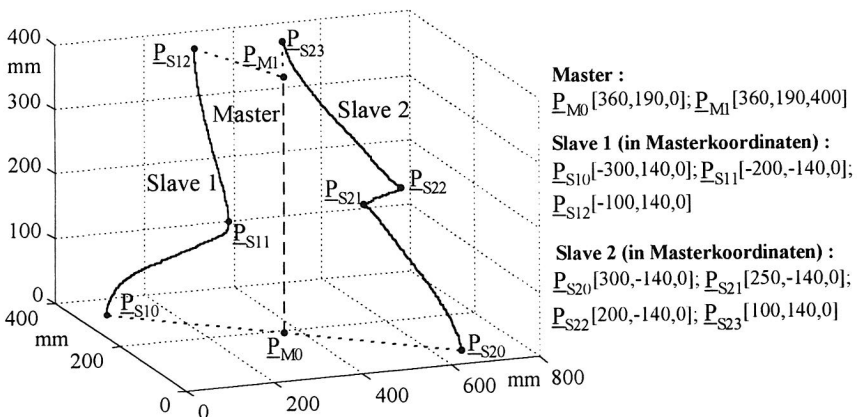


Bild 42: Kooperierender Betrieb mit mehreren Slavebewegungen und Überschleifen bei zeitlicher Harmonisierung





Verschiedene Technologien, wie Entgraten oder Schleifen, sind dadurch gekennzeichnet, daß Bewegungsfreiheitsgrade durch Umgebungsbedingungen beschränkt oder technologisch vorgegeben sind und andere in freier Bewegung ausgeführt werden können. Auch bei der Handhabung von Werkstücken mit zwei Robotern ist es zur Vermeidung von Verspannungen notwendig, einzelne Bewegungskordinaten kraft- oder momentengeführt zu steuern. Unter den Begriffen „Hybride Kraft-/Positionsregelung“ oder „Compliant control“ werden verschiedene Konzepte zur Sensor- und Bahnführung von Robotern verstanden [107, 129]. Überwiegend wird die Positions- und die Sensorregelung getrennt betrachtet und anschließend eine Synthese der Stellsignale vorgenommen. Unter praxisrelevanten Gesichtspunkten ist es jedoch notwendig, von Robotersteuerungen auszugehen, die eine geschlossene Achspositionierung besitzen und der somit eine Sensorregelung überlagert werden muß. In [67, 129] wurde von einer derartigen Konstellation ausgegangen, wobei jedoch der Einfluß der Bahnplanung nicht hinreichend beachtet worden ist.

Für die Definition der Freiheitsgrade der sensor- und positionsgeführten Bewegung wird hierzu ein „compliance frame“ oder auch Bezugskordinatensystem C einführt [75]. Dessen Koordinatenachsen stimmen mit den beabsichtigten Freiheitsgraden des Sensoreingriffs überein (Bild 44). Die Festlegung der positions- und der sensorgeführten Freiheitsgrade wird anwendungsabhängig mit Hilfe der Selektionsmatrix  $\underline{S}$  durch Besetzen der Positionen in der Hauptdiagonalen vorgenommen.

$$\underline{S} = \begin{bmatrix} 0/1 & & & & & \\ & 0/1 & & & & \\ & & 0/1 & & & \\ & & & 0/1 & & \\ & & & & 0/1 & \\ & & & & & 0/1 \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 15}$$

Die Bewegungsführung soll derart erfolgen können, daß das Bezugssystem sowohl ortsfest als auch an die Roboterhand gebunden sein kann [68, 75]. Somit ist ein Bezug zu einem feststehenden Werkstück oder zu einem sich bewegendem Werkzeug möglich.

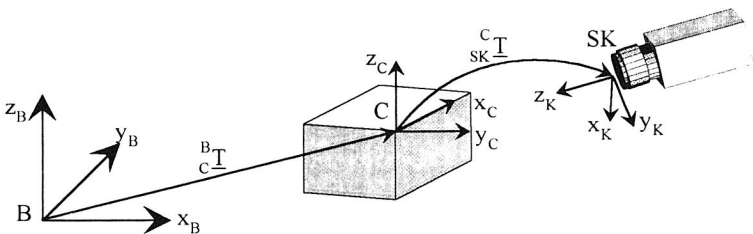


Bild 44: Werkstückbezogenes Koordinatensystem für sensorgeführte Bewegungen

### 4.2.2 Koordinierte Sensor- und Bahnführung

Für die positions- und sensorgeführten Bewegungen ist es grundsätzlich erforderlich, alle Funktionen im Bezugssystem auszuführen. Grundlage der Bestimmung der Bewegungsbahn ist die Beziehung, daß sich die Bewegung aus einer Bahn- und einer Sensorführung zusammensetzt [67].

$$\underline{x}_c(k+1) = \underline{x}_c(k) + (\underline{I} - \underline{S}) \cdot \Delta \underline{x}_p + \underline{S} \cdot \Delta \underline{x}_k \tag{Gl. 16}$$

Zur Ermittlung der Sensorkorrektur ist es notwendig, die Sensordaten aus dem Sensorkoordinatensystem SK in das Bezugssystem zu transformieren, sofern die Sensoren nicht in geeigneter Weise konform hierzu angebracht sind. Hieraus wird eine Regeldifferenz gebildet und einem Regler zugeführt. Anschließend werden die Stellgrößenänderungen bestimmt und mit Hilfe der Selektionsmatrix ausgewählt. Die Bestimmung der Sensorkorrektur erfolgt separat für jede Koordinatenrichtung.

Die Ermittlung der Positionsänderung erfordert eine Transformation aus dem Basiskoordinatensystem ins Bezugssystem. Diese Werte liegen hierfür in homogener Matrixform vor, woraus anschließend die Position und die Orientierungen für die sechsdimensionale Framedarstellung bestimmt werden können.

$$\Delta \underline{x}_p = \underline{x}_p(k+1) - \underline{x}_p(k) = {}^B_c \underline{T}^{-1}(k) \cdot \underline{x}(k+1) - {}^B_c \underline{T}^{-1}(k) \cdot \underline{x}(k) \tag{Gl. 17}$$

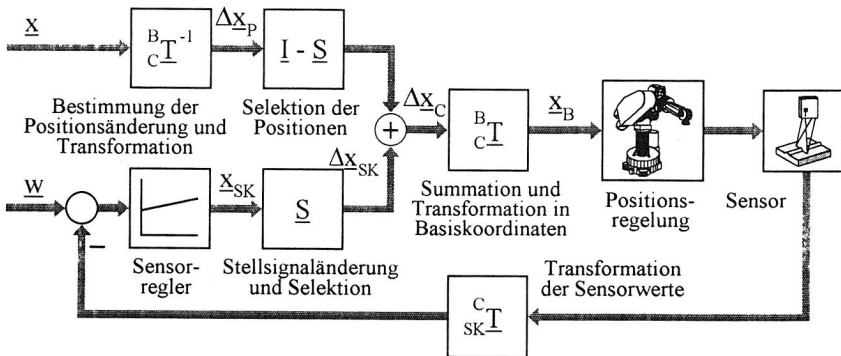


Bild 45: Struktur für eine sensor- und positiongeführten Roboterbewegung

Die selektierten Positionsänderungen werden anschließend mit den differentiellen Werten der Sensorregelung verknüpft. Anschließend erfolgt die Transformation der resultierenden Positionsänderung und der aktuellen Position in das Basiskoordinatensystem. Hierzu ist es erforderlich, die sechsdimensionale Framebeschreibung in eine homogene Matrixform umzuwandeln.

$$\underline{x}_B(k+1) = {}^B_c \underline{T}(k) \cdot \underline{x}_c(k+1) = {}^B_c \underline{T}(k) \cdot (\underline{x}_c(k) + \Delta \underline{x}_c) \tag{Gl. 18}$$

Die so ermittelte Position wird als neuer Bahnstützpunkt an die Achspositionierung des Roboters übergeben. Für den Fall eines ortsfesten oder eines sich im Werkzeug angeordneten Bezugskordinatensystems können jeweils spezifische Vereinfachungen der Berechnungen vorgenommen werden, auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden soll.

### 4.3 Kollisionsvermeidung beim Betrieb mehrerer Roboter

#### 4.3.1 Ursachen und Möglichkeiten von deren Abwendung

Der Arbeitsraum kooperierender Roboter ist durch sich überschneidende Arbeitsbereiche gekennzeichnet, die eine besondere Gefahr für das Auftreten von Kollisionen bei kooperierenden oder unabhängigen Operationen darstellen. Ziel muß es daher sein, ausgehend von der Programmierung und Planung des Bewegungsablaufes bis hin zu dessen eigentlicher Ausführung, Kollisionen sicher zu erkennen und Maßnahmen zur deren Abwendung einzuleiten, um somit die Sicherheit der Anlage und deren Verfügbarkeit zu gewährleisten.

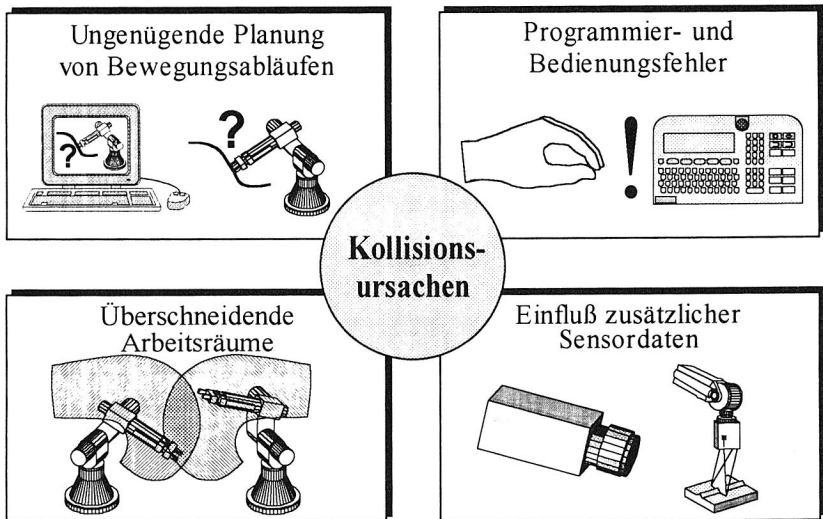


Bild 46: Einordnung der unterschiedlichen Bedingung von Kollisionen

Die Ursachen für Kollisionen sind vielschichtig und können nach den Bereichen ihres Auftretens gegliedert werden (Bild 46), wobei ihre Existenz nicht ausschließlich auf kooperierende Systeme beschränkt ist [2]. Anlagen, die off line programmiert werden, bedingen die Problemstellung, daß ein Abgleich zwischen Rechnermodell und realer Umwelt nur ungenügend genau erfolgen kann oder daß Hindernisse durch nachträgliche Einbauten an der Anlage nicht erkenn-

bar sind. Zudem kann der zeitliche Ablauf unabhängig operierender Roboter im Prozeß und somit eine bestehende Kollisionsgefahr im vorab nicht genau genug bestimmt werden.

Oftmals führen Bedienungs- und Programmierfehler zu Kollisionen, da besonders bei der gleichzeitigen Arbeit mehrerer Roboter die Übersichtlichkeit erschwert und die Möglichkeit einer Fehlhandlung erhöht ist. Somit sollten die Funktionen zur Verhinderung von Kollisionen, vor allem auch bei der Inbetriebnahme und dem Test, zur Verfügung stehen.

Durch den Einsatz von Sensoren kommt es zu Änderungen der Bewegungsbahn. Nehmen diese Bahnkorrekturen größere Werte an, so kann hierdurch eine Kollisionsgefahr entstehen, die nicht vorhersehbar und damit im voraus nicht zu bestimmen ist. Somit besteht die Notwendigkeit, unmittelbar während des Bewegungsablaufes eine Überprüfung der Kollisionsgefahr vorzunehmen.

Maßnahmen zur Vermeidung von Kollisionen können auf den unterschiedlichen Ebenen der Steuerung integriert werden. Verfügbarer Off-line-Programmiersysteme beinhalten neben der Planung des Bewegungsablaufes von Industrierobotern gleichzeitig Module zur Kollisionserkennung [71]. Diese grafisch orientierten Systeme ermöglichen während der Programmerstellung eine simulative Überprüfung möglicher Kollisionen zwischen einzelnen Robotern und der Peripherie.

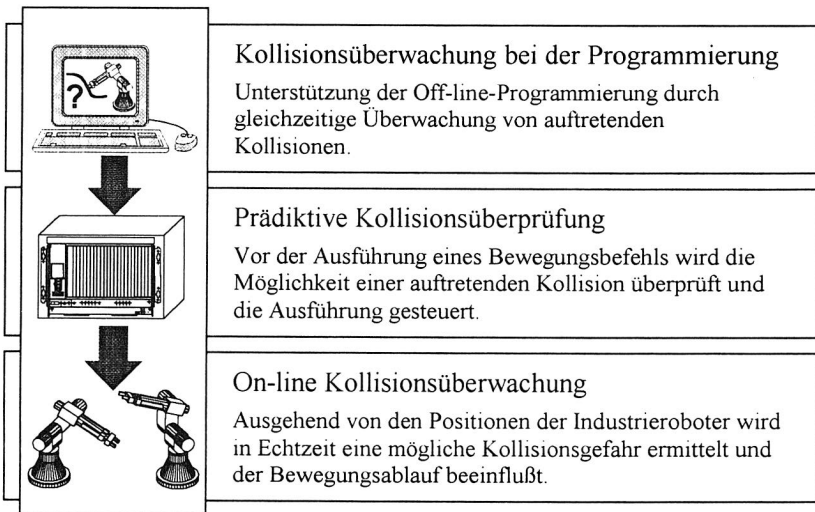


Bild 47: Anwendungsbereiche unterschiedlicher Kollisionsvermeidungsstrategien

In Anwendungsbereichen, bei denen erst zur Laufzeit eine Kollisionsüberprüfung möglich ist, kann dies unmittelbar vor der Ausführung eines Bewegungsbefehles geschehen. Ausgehend

von der ermittelten Kollisionsgefahr, wird die Ausführung der Bewegung beeinflusst. Soll eine Neuplanung der Bahn stattfinden, so kann dies in Verbindung mit einem Off-line-System erfolgen. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, eine Kollisionsüberprüfung auf der Basis von Sensorinformationen über den Zellenzustand durchzuführen [127].

Eine Kollisionsüberwachung während der Bewegungsausführung ist gegeben, wenn on line ausgehend von den Positionen der einzelnen Roboterachsen mögliche Kollisionen ermittelt werden. Die hierbei gewählten Methoden basieren auf Erfahrungen mit Off-line-Systemen, die für die Anforderungen der On-line-Kollisionsvermeidung optimiert wurden [2, 12, 122]. Bedingt durch die bewegungsbegleitende Ausführung der notwendigen Algorithmen, werden hierbei hohe Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit der eingesetzten Systeme gestellt.

### 4.3.2 Analyse der Modellierungsmethoden des Arbeitsraumes

Grundlage einer effektiven Kollisionsvermeidung ist eine geeignete Modellbildung der Umwelt, da diese entscheidenden Einfluß auf die Methoden zur Kollisionsbestimmung hat. Zur mathematischen Beschreibung wurden vielfältige Modelle entwickelt, die sich in ihrer Komplexität und der darauf anwendbaren Methoden der Bestimmung von Kollisionen unterscheiden (Bild 48). Für die speziellen Belange der Kollisionserkennung in Echtzeit wurde, ausgehend von diesen Methoden, eine Modellvereinfachung vorgenommen, um eine zeitoptimierte Ausführung bei einer Reduktion der erzielbaren Genauigkeit zu ermöglichen.

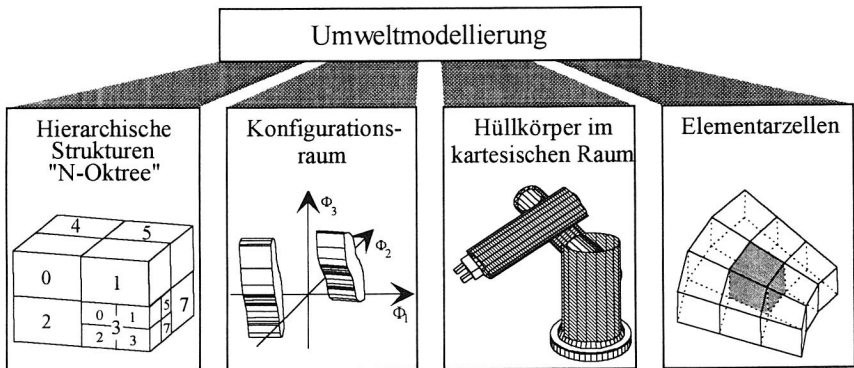


Bild 48: Modellierungsmethoden der Umwelt in einer Roboterzelle

Zur Segmentierung des Arbeitsraumes werden sogenannte „N-Oktree“ eingesetzt, die dadurch gekennzeichnet sind, daß ein kubisches Raumvolumen in acht gleich große Volumina unterteilt wird, bis sich eine vollständige Materiefreiheit ergibt. Somit lassen sich hierarchische Strukturen aufbauen, bei denen zur Überprüfung der Kollision die jeweiligen Volumina durchsucht

werden müssen. Die Anzahl der Raumelemente ist abhängig von der Objektanzahl, wobei die Genauigkeit von der Tiefe der Schachtelung begrenzt wird [122].

Eine abstrakte Abbildung der Umgebung stellt die Darstellung von Hindernissen im Konfigurationsraum dar, der durch die möglichen Achsstellungen des Roboters aufgespannt wird. In diesen werden alle Objekte abgebildet, so daß eine Kollisionserkennung zwischen Roboter und Umgebung durch einen Zugriff der Punkte im Konfigurationsraum erfolgt [2, 71]. Dieses Verfahren wird insbesondere für Probleme der kollisionsfreien Bahnplanung bei Off-line-Programmiersystemen eingesetzt.

Zur schnellen Kollisionserkennung werden Hindernisse und Industrieroboter mit Hilfe einfacher geometrischer Körper, wie Flächen, Kugeln oder Zylindern, dargestellt. Die Ermittlung der Kollisionen erfolgt durch Vergleich dieser Körper untereinander oder durch einzelne Punkte auf diesen. Als Hilfsmittel dienen hierbei Entscheidungstabellen, die die zu vergleichenden Objekte spezifizieren, oder durch Regelwerke, aus denen die Gefahr einer Kollision hervorgeht [12, 36].

Eine Strukturierung des Arbeitsraumes in Elementarzellen ergibt sich, wenn in Zylinderkoordinaten eine gleichmäßige Einteilung in einzelne Zellen erfolgt. Deren Granularität bedingt eine minimale räumliche Genauigkeit. Jede Zelle ist durch ihre Füllung gekennzeichnet, wobei eine Kollisionsüberprüfung an Hand der Belegung einzelner Zellen erfolgen kann [105].

### 4.3.3 Modellierung der Zelle und Strategie der Kollisionsvermeidung

Für die Belange der Steuerung einer flexiblen Fertigungszelle mit kooperierenden Robotern wurde eine On-line-Kollisionsvermeidung entworfen, die auf die speziellen Anforderungen des kartesischen Aufbaus der eingesetzten Roboter abgestimmt ist. Bedingt durch den umfangreichen Einsatz von Linearsystemen und Portalrobotern in der Fertigung ist die Relevanz für vielfältige Anwendungen gegeben. Die Funktionen der Kollisionsvermeidung werden durch ein eigenständiges Rechnersystem ausgeführt, welches eine enge Datenkopplung zur Robotersteuerung besitzt (Kap. 5.2). Ziel ist es somit, einen zyklischen Ablauf zu ermöglichen, der aus einer Modellbildung der Umgebung, der Ermittlung der Kollisionsgefahr und aus einem Eingriff in den Bewegungsablauf der Robotersteuerung besteht.

Eine schnelle Bestimmung möglicher Kollisionen erfordert eine effektive Abbildung der Fertigungsumgebung in ein Rechnermodell. Für die Modellierung der Roboter, der peripheren Geräte und der Werkstücke wird eine Darstellung durch quader- und zylinderförmige Hüllkörper gewählt. Eine situationsabhängige Auswertestrategie ermöglicht in einem ersten Schritt eine Annäherung aller Objekte durch Quader, die parallel zu den Koordinatenachsen des Basiskoordinatensystems ausgerichtet sind (Bild 49), um somit die Effizienz des Verfahrens zu erhöhen. Erst in einem zweiten Schritt wird für kollisionsgefährdete Beziehungen eine genauere Modellierung der Körper herangezogen, indem die Drehung und eine eventuelle Zylinderdarstellung berücksichtigt wird. Bei der Modellierung wird für eine sichere Verhin-

derung von Kollisionen die Einhaltung eines Sicherheitsabstandes  $l_{\text{sicher}}$  in der Bewegungsrichtung berücksichtigt. Dieser wird aus der momentanen Geschwindigkeit  $v$ , der Beschleunigung  $a$  des Roboters sowie aus einer Verzögerungszeit  $t_{\text{Reaktion}}$  für den Eingriff der Kollisionsvermeidung bestimmt.

$$l_{\text{sicher}} = \frac{v^2}{2a} + v \cdot t_{\text{Reaktion}} \quad \text{Gl. 19}$$

Grundlage der Kollisionserkennung bildet die Methodik, einen Schnitt in der z-Ebene für relevante Körpereckpunkte zu legen, um somit einen Vergleich in einer Ebenen durchführen zu können. Somit ist es möglich, einfache Algorithmen einzusetzen, die zu einer beschleunigten Ausführung des Kollisionstest führen.

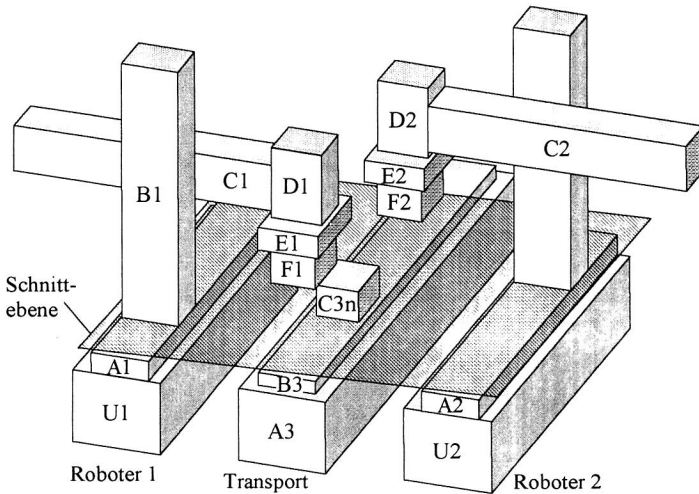


Bild 49: Modellierung der Roboterzelle mit Hüllkörpern

In diese Schnittebene werden diejenigen Quader eingetragen, für die eine potentielle Kollisionsgefahr besteht. Die Auswahl erfolgt an Hand einer Entscheidungstabelle (Tab. 1), die die möglichen Kollisionspaarungen angibt, um somit nur interessierende Objekte betrachten zu müssen. Für diese ausgewählten Paarungen werden mit Hilfe des Analysealgorithmus eventuelle Überschneidung der Flächen festgestellt.



	A1	B1	C1	D1	E1	F1	U1
A3	X	X	X	X	A3E1	A3F1	X
B3	X	X	X	X	B3E1	B3F1	X
C3n	X	X	C3nC1	X	C3nE1	C3nF1	X

Tabelle 1: Entscheidungstabelle der Kollisionsmöglichkeiten zwischen Roboter 1 und Transportband

Hierzu erfolgt ein geordneter Vergleich von jeweils zwei Objekten, bei dem von dem Objekt ausgegangen wird, welches die kleinsten x-Koordinatenwerte aufweist. Der Vergleich erfolgt durch eine Analyse der Lage der Eckpunkte, und es kann der nachfolgende Algorithmus für zwei gerichtete rechteckige Flächen angegeben werden.

$$Q_1 \notin Q_2 \quad \text{wenn } Q_{1b}x < Q_{2a}x \quad \text{oder} \quad \text{Gl. 20}$$

$$\text{wenn } Q_{1b}x > Q_{2a}x \quad \text{ist} \quad (Q_{1c}y < Q_{2a}y) \cup (Q_{1b}y > Q_{2d}y)$$

Im Falle einer Überschneidung werden die tatsächlichen Konturen analysiert. Bei zwei zu vergleichenden Zylindern müssen die Abstände der Mittelpunkte größer sein, als die Summe ihrer Radien. Für rechteckige Geometrien, die gedreht angeordnet sind, wird zur Bestimmung der Kollision von den Geraden, die durch die geordnet indizierten Eckpunkte gebildet werden, ausgegangen.

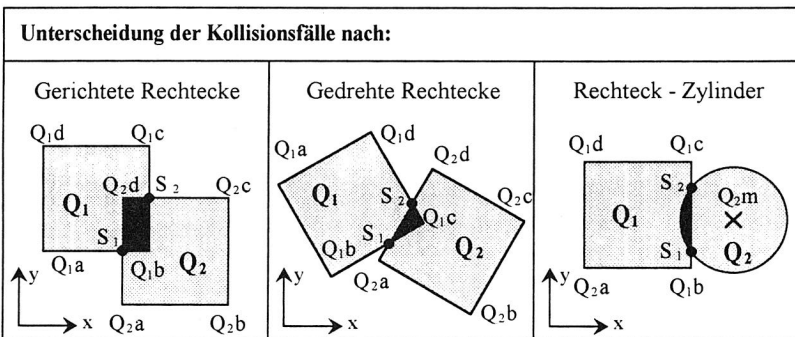


Bild 50: Bestimmung der Kollision zwischen unterschiedlichen Körpern

Die Lage der Schnittpunkte dieser Geraden bestimmt eine mögliche Kollisionsgefahr, die gegeben ist, wenn sich der Schnittpunkt auf der Strecke zwischen zwei Eckpunkten beider Körper befindet. Als Bedingung läßt sich für einen Schnittpunkt  $S_1$  auf der Geraden durch  $\overline{Q_{1b}Q_{1c}}$  und  $\overline{Q_{2a}Q_{2d}}$  nach Bild 50 angeben:

$S_1 \in (\overline{Q_1 b Q_1 c} \cap \overline{Q_2 a Q_2 d})$  wenn

$$\begin{aligned} y(Q_1 b) \leq y(S_1) \leq y(Q_1 c) \cap x(Q_1 b) \leq x(S_1) \leq x(Q_1 c) \cap \quad \text{Gl. 21} \\ y(Q_2 a) \leq y(S_1) \leq y(Q_2 d) \cap x(Q_2 a) \leq x(S_1) \leq x(Q_2 d) \end{aligned}$$

Bei einer Kollisionserkennung zwischen einem rechteckigen und einem kreisförmigen Objekt werden die Schnittpunkte zwischen dem Kreis und den Geraden durch die Eckpunkte des Rechtecks bestimmt. Die Kollision wird in gleicher Art, wie in Gl. 21 angegeben, bestimmt, wobei hierbei nur der Vergleich auf der Geraden des Rechtecks erfolgen muß.

Im Falle einer Kollisionsgefahr ist es notwendig, in den Bewegungsablauf der Roboter einzugreifen. Oftmals wird hierbei ein Notaus-Signal ausgelöst. Dabei besteht jedoch der Nachteil, daß bereits bei einer Verletzung des Sicherheitsbereiches, aber noch keiner tatsächlichen Kollision, die Bewegung abgebrochen wird. Aus diesem Grund wird hier das Konzept der Reduktion der Geschwindigkeit eingesetzt, wodurch ein Durchfahren des Schutzraumes mit verminderter Geschwindigkeit ermöglicht wird.

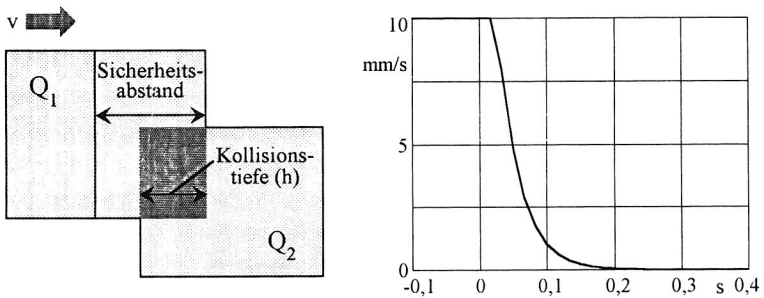


Bild 51: Kollisionsvermeidung durch Geschwindigkeitsreduktion

Zu diesem Zweck erfolgt der Eingriff in die Robotersteuerung durch einen Reduktionsfaktor  $r$ , der in der Steuerung als Override integriert wird.

$$r = \frac{l_{\text{sicher}}}{h} \quad \text{Gl. 22}$$

Dieser Reduktionsfaktor kann aus dem Verhältnis der in Bewegungsrichtung in den Sicherheitsbereich eingedrungenen Kollisionstiefe  $h$  zum Sicherheitsabstand  $l_{\text{sicher}}$  ermittelt werden. Somit ist eine gezielte Geschwindigkeitsverminderung bei Kollisionsgefahr möglich, ohne die Bewegung sofort zu beenden.

## **5 Konzeption eines Gerätesteuerungssystems für interagierende Roboter**

Die Realisierung komplexer Bewegungen und Funktionen fordert von den Steuerungen der Geräte umfangreiche Fähigkeiten. Durch Multiprozessorsysteme können sowohl Prozesse mit Echtzeitanforderungen als auch zeitunkritische Prozesse unterstützt werden, um somit eine effektive Abbildung der Operationen zur Bewegungssynthese und der Systemadministration auf dedizierten Funktionseinheiten der Steuerung zu gestatten. Die benutzerfreundliche Bedienung und Programmierung kooperierender Robotersysteme bedingt den Einsatz von universellen und normierten Programmiertechniken, die die spezifischen Anforderungen kooperierender Industrieroboter geeignet unterstützen. Für derart anspruchsvolle Steuerungsaufgaben ist die Anwendung von lokal agierenden Einfachsteuerungen mit schnellen Kommunikationsmöglichkeiten notwendig, um dezentral eine Verarbeitung von Sensor- und Steuerungsinformationen zu ermöglichen.

### **5.1 Bewertung von Steuerungssystemen für Fertigungsgeräte**

#### **5.1.1 Anforderungsanalyse**

Die Realisierung von Bewegungs- und Ablauffunktionen einer Fertigungszelle mit kooperierenden Robotern erfordert eine hohe Leistungsfähigkeit der Steuerungstechnik. Diese kann auf der Basis moderner Prozessortechnik mit effizienten Softwarearchitekturen gestaltet werden [101]. Unterschiedliche Einsatzbereiche und daraus resultierende Verarbeitungsleistungen machen einen modularen Hardwareaufbau der Gerätesteuerungen unerlässlich. Dezentrale Steuerungsstrukturen unterstützen eine höhere Transparenz, Wartbarkeit, Übersichtlichkeit und eine Erweiterbarkeit des Systems und bieten somit die Möglichkeit, den Aufbau entsprechend den vorherrschenden Erfordernissen realisieren zu können.

Die Gestaltung der Steuerungssoftware erfordert hierbei ebenfalls eine Modularität und Offenheit, um auf der Basis von abgeschlossenen Funktionsmodulen und deren Verknüpfung über Daten- und Informationskanäle Anwendungssysteme schaffen zu können. Auf der Grundlage leistungsfähiger Betriebssysteme unterstützen moderne Programmiertechniken eine derartige Modularität und Dezentralisierung.

Entscheidenden Einfluß auf die Entwicklung und die Leistungsfähigkeit des Gerätesteuerungssystems besitzen die Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten und Modulen. Steuerungen auf der Basis normierter Bussysteme entsprechen diesen Anforderungen nach einem modularen Hardwareaufbau.

Die Verbindung mehrerer lokal verteilter Systemeinheiten bedingt demgegenüber den Einsatz von leistungsfähigen Feldbussystemen. Diese Kommunikationsverbindungen zwischen den einzelnen Komponenten ermöglichen eine Dezentralisierung der Verarbeitungsleistung und einen Datenaustausch auf der Basis einheitlicher Schnittstellen.

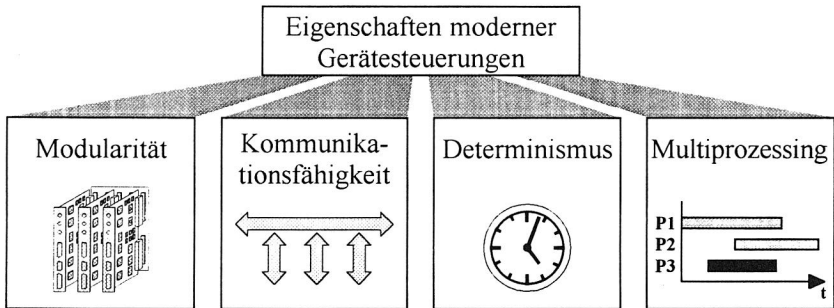


Bild 52: Charakteristik der Steuerung von Fertigungsgeräten

Die unterschiedlichen zu realisierenden Funktionalitäten innerhalb eines Steuerungssystems und deren dezentrale Gestaltung bedingen eine Aufteilung in parallel und sequentiell ablaufende Prozesse, die miteinander über Kommunikationskanäle in Verbindung stehen. Durch die eingesetzten Betriebssysteme ist deren zeitlich und funktional orientierte Ausführung zu realisieren, so daß eine den Anforderungen entsprechende Gesamtfunktionalität erreicht wird.

Für Steuerungssysteme auf Prozeebene muß ein deterministisches Verhalten als eine unbedingt notwendige Funktionalität angesehen werden. Neben der Gewährleistung definierter Reaktionszeiten ist eine Bearbeitung von zyklischen Funktionen, wie sie für Regelungs- und Interpolationsaufgaben typisch sind, gegeben. Hierbei sind hohe Anforderungen hinsichtlich der genauen zeitlichen Ausführung für die Funktionssicherheit kennzeichnend.

### 5.1.2 Hybride Steuerungsarchitektur

Um die funktionalen und zeitlichen Anforderungen, die von Regelungsaufgaben bis hin zur Bedienerführung reichen, in einem Gerätesteuerungssystem erfüllen zu können, ist eine Systemplattform notwendig, die die jeweiligen, geforderten Funktionen durch dedizierte Prozessrechnerkomponenten unterstützt. Hierzu wurde in [124] eine *hybride Multiprozessor-Rechnerarchitektur* vorgestellt, die durch den Einsatz eines Standardrechnersystems in Verbindung mit einem Echtzeitsystem eine auf die Steuerungshierarchie abgestimmte Verarbeitungsfunktionalitat bietet (Bild 53). Ein derartiges Steuerungssystem kann der mit zunehmender Nähe zum Fertigungsprozeß geforderten Echtzeitfähigkeit bei der Ausführung der Steuerungsoperationen gerecht werden.

Administrative Aufgaben, wie sie die Ausführung und Steuerung der Bewegungsprogramme, die Bewegungspräparation oder die Bereitstellung von Diensten der Bedienerführung und des Systemverwaltung darstellen, werden durch ein multiprozessingfähiges Betriebssystem unterstützt. Abgeschlossene funktionale Einheiten werden auf Prozesse abgebildet, die unabhängig voneinander agieren und über Mechanismen der Interprozesskommunikation miteinander verbunden sind.

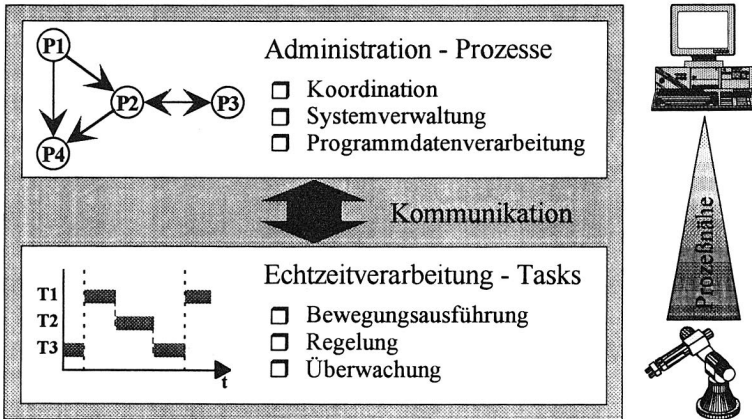


Bild 53: Hybrides Steuerungssystem für Automatisierungsgeräte

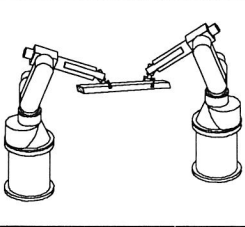
Die Ausführung, vornehmlich der Regelungs- und Bewegungssteuerungsaufgaben, wird durch ein Echtzeitbetriebssystem realisiert, welches harten zeitlichen Anforderungen genügt. Hierbei ist besonders die Einhaltung eines festen Taktes für stabile Regelungen und exakte Bewegungsverläufe von Bedeutung. Gleichzeitig ist es notwendig, eine verteilte Ausführung der Steuerungsfunktionen auf verschiedenen Prozessoreinheiten zu unterstützen. Ein prioritätsgesteuertes, hierarchisches System steuert die Ausführung der in Tasks abgebildeten Funktionen in Abhängigkeit des aktuellen Systemzustandes.

Die Verbindung zwischen den einzelnen Bestandteilen des hybriden Steuerungssystems erfolgt durch Kommunikationskanäle zur Übermittlung von Daten und Steuerinformationen. Diese basieren auf der Nutzung gemeinsamer Speicherbereiche, um somit unnötige Kopieroperationen zu vermeiden.

## 5.2 Definition von Ablauf- und Systemstrukturen für die kooperierende Bewegungssynthese

### 5.2.1 Abbildung des Bewegungsformen auf die Robotersteuerung

Die Bewegungsarten kooperierender Industrieroboter bedingen spezifische, steuerungstechnische Funktionalitäten zu deren Ausführung. Die Analyse ergibt an Hand der Bewegungsformen sowohl Anforderungen an die Bahnplanung als auch an die Programmierung und die Ausführung der Roboterprogramme. Grundlage bildet hierbei die Untergliederung ausgehend von unabhängigen bis zu kinematisch gekoppelten Bewegungen (Tabelle 2).

	Multiprogrammierung	Ressourcenverwaltung, Interprozesskommunikation	Koordination der Bewegungsparameter	Mehrfach koordinierte Bahninterpolation	Sensorunterstützung	Kollisionsdetektion
Unabhängige Bewegung	■	○	○	○	□	■
Räumliche und zeitliche Koordination	■	■	○	○	□	□
Gemeinsame Bewegung	○	○	■	○	□	□
Kinematische Kopplung	○	○	■	■	■	○

■ - notwendig   □ - empfehlenswert   ○ - nicht erforderlich

Tabelle 2: Steuerungsfunktionen für gegebene Bewegungsformen

Getrennte Bearbeitungsvorgänge der Roboter können durch eine gleichzeitige Ausführung unterschiedlicher Programme von der Robotersteuerung unterstützt werden. Bedingt durch die nicht im vorab zu bestimmenden zeitlichen Verhältnisse der Ausführung der Bewegungen ist eine On-line-Überwachung der Kollision an Hand der Positionen der Roboter unbedingt erforderlich. Ist es notwendig, während dieser unabhängigen Bewegung Phasen mit zeitlicher oder auch räumliche Koordination auszuführen, sind hierfür Mechanismen der Interprozesskommunikation zwischen den Roboterprogrammen nötig. Dies kann beispielsweise erforderlich sein, um den Zugriff auf gemeinsam genutzte Teilezuführungen oder die exklusive Anwesenheit in

sich überschneidenden Arbeitsräume zu ermöglichen. Probleme der Kollisionsvermeidung können somit gelöst werden.

Gemeinsame Bewegungen, die durch die Angabe der Start- und Endpunkte und einem gleichzeitigen Erreichen der Endpunkte gekennzeichnet sind, bedürfen des Abgleiches der Bahnparameter für die Bewegung. Da die relativen Beziehungen der Bahnen zwischen Anfangs- und Endpunkt während der Bewegungsausführung nicht explizit überwacht werden, sollte hierbei eine Kollisionserkennung genutzt werden.

Höchste Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Steuerungssystems werden gestellt, wenn kinematisch gekoppelte Bahnen von mehreren Robotern auszuführen sind. Hierbei ist es notwendig, koordiniert Bahnpunkte für die eingesetzten Industrieroboter zu interpolieren. Eine modulare Realisierung der Interpolation macht einen schnellen Datenaustausch der bestimmten Koordinaten notwendig. Bedingt durch die direkte Ermittlung der genauen Beziehung der Roboterpositionen, besitzt die Gefahr von Kollisionen eine untergeordnete Bedeutung. Jedoch ist bei der gemeinsamen Manipulation von Werkstücken zur Vermeidung des Auftretens von unzulässigen Kräften eine Sensorunterstützung erforderlich.

Für die übrigen Bewegungsarten ist der Einsatz der Sensordatenintegration an Hand der technologischen Erfordernissen abzuschätzen. Durch geeignete Steuerungsmethoden ist es hierbei möglich, bestimmte Bewegungsfreiheitsgrade sensorgestützt zu führen, wohingegen andere positionsgeführt sind (Kap. 4.2). Hierbei ist zu beachten, daß durch die Integration von Sensordaten es zu nicht im vorab zu ermittelnden Bahnabweichungen kommen kann und hierfür eine Kollisionüberprüfung aus Sicherheitsgründen einzusetzen ist.

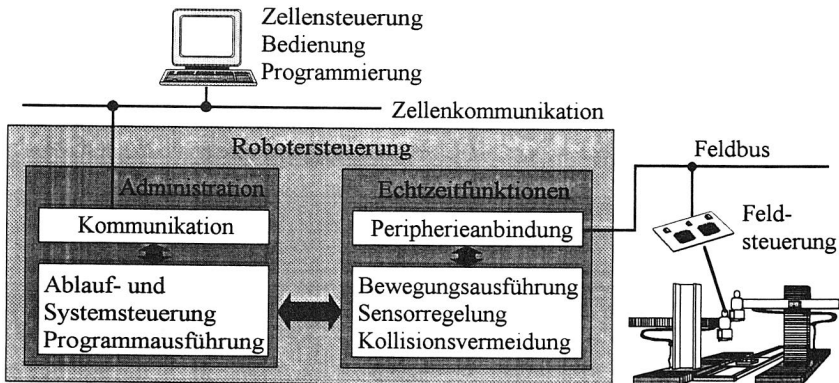


Bild 54: Funktionsgliederung der Robotersteuerung

Ausgehend von dieser Analyse kann für die Robotersteuerung auf der Basis des modularen und hybriden Gerätesteuerungssystems eine geeignete Strukturierung vorgenommen werden. Zen-

trale Leit- und Bedieneinheit bildet das in Kapitel 3.2 dargestellte Zellensteuersystem, welches mit der Robotersteuerung über eine standardisierte Kommunikationsschnittstelle verbunden ist. Zur Ausführung von Steuerungs- und Datenmanipulationsoperationen bedient sich die Zellensteuerung definierter Dienstanforderungen, um beispielsweise aktuelle Zustände zu ermitteln, die Programmausführung zu steuern oder operative Handlungen auszuführen. Die erforderlichen Dienste werden durch die Systemadministration erbracht.

Der administrative, nicht echtzeitfähige Teil der Robotersteuerung beinhaltet systemzustandsüberwachende Funktionen, die Ausführung von Bedieneroperationen und die Roboterprogramminterpretation.

Wesentlichen Bestandteil des Echtzeitsystems bildet die Bahnplanung für die Ausführung und die Überwachung der unterschiedlichen Bewegungsformen. Gleichzeitig sind in dieser Ebene sämtliche Regelungsfunktionen eingeordnet. Bedingt durch die Notwendigkeit, Sensordaten und Zustandsinformationen der zugehörigen peripheren Einrichtungen in Echtzeit zu erfassen, sind die hierzu notwendigen Funktionen gleichfalls Bestandteil der Echtzeitfunktionalität. Der Einsatz eines leistungsfähigen Feldbusses ermöglicht die Integration der Werte im Takt der Bewegungsausführung. Diese lokalen Steuerungseinheiten verringern zudem den Verarbeitungsaufwand der Robotersteuerung.

### **5.2.2 Ablauf- und Programmadministration**

Die obere Systemschicht der Robotersteuerung bildet die Ablauf- und Programmadministration, die sämtliche Aktivitäten auslöst, durchführt und überwacht. Wesentlicher Bestandteil ist die Verwaltung, die Ausführung und die Steuerung der Roboterprogramme. Gleichzeitig werden Zustandsinformationen über den Ablauf und den Status der Programme ermittelt.

Die Ausführung der Roboterprogramme erfolgt mittels eines Interpreters, der von der Programmverwaltung aktiviert und überwacht wird. Zur Realisierung einer unabhängigen Steuerung der einzelnen Roboter ist es möglich, mehrere Interpreterprozesse parallel auszuführen. Der Interpreter arbeitet ein Programm satzorientiert ab, indem er die jeweilige Programmzeile analysiert und die Bewegungs- oder Steuerungsoperationen ausführt. Die Koordination zwischen den Roboterprogrammen erfolgt durch Interprozeßkommunikation, die durch Funktionen des Multiprozessing-Betriebssystems unterstützt wird. Hierdurch kann die Verwaltung der Zugriffsberechtigung auf die Roboter, die Verwaltung der Ressourcen oder eine Synchronisation der Programme realisiert werden. Alle hierzu notwendigen System- und Anwenderdaten werden im Abschnitt der Maschinen- und Programmvariablen verwaltet.

Wird vom Interpreter ein Bewegungssatz ausgeführt, so übergibt er die aktuellen Bahnparameter an die Interpolationsvorbereitung, die die Parameter für die Interpolation des Bewegungsprofils ermittelt. Im Falle einer überschleunigten Bewegung bestimmt die Interpolationsvorbereitung neben der Überschleifbewegung gleichzeitig die Startparameter des nächsten Bewegungssatzes.



Zur Vermeidung einer eventuellen Kollisionssituation und einer damit verbundenen Störung kann der Interpolator vor Ausführung einer Bewegung deren Zulässigkeit durch eine prädiktive Kollisionsvermeidung überprüfen. Hierbei wird an Hand der geforderten Bahn ein Kollisionsstatus ermittelt, der den Bewegungsablauf beeinflusst.

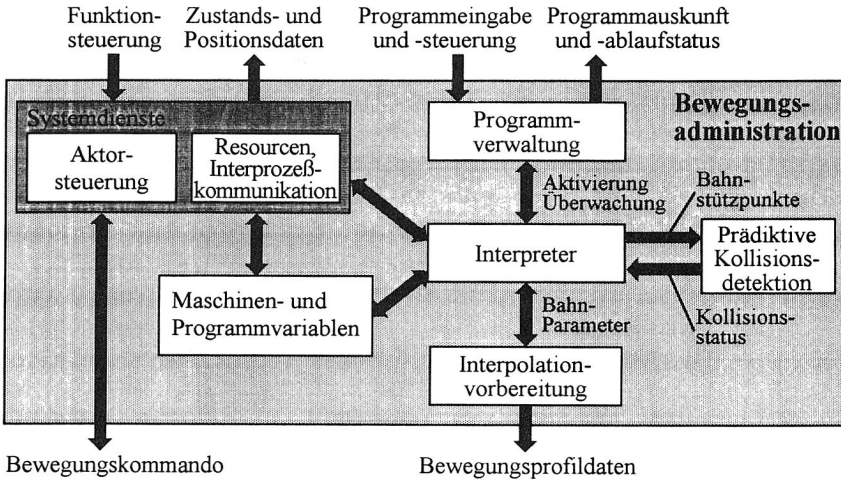


Bild 55: Administrative Funktionen zur Bewegungsführung

Neben der Programmausführung ist die Möglichkeit des operativen Bedieneringriffs für Programmier- und Einrichtarbeiten von wesentlicher Bedeutung. Bedieneranforderungen werden von den Systemdiensten entgegengenommen und ausgeführt. Für Referier- und Handverfahrenoperationen erfolgt eine direkte Steuerung der Aktorik. Hierbei ist Voraussetzung, daß sich die Robotersteuerung in einem zulässigen Systemzustand befindet. Gleichzeitig kann mit Hilfe der Systemdienste eine Manipulation der Maschinen- und Programmvariablen erfolgen.

### 5.2.3 Echtzeit-Bahnplanung

Alle Interpolations- und Regelungsoperationen werden durch den echtzeitfähigen Systemteil der hybriden Robotersteuerung ausgeführt. Dieser besteht aus mehreren Interpolationsfunktionen, der Sensorregelung und der Koordinatenrechnung zur Ausführung der konzipierten Bewegungsformen (Bild 56). Der Ablauf und das Zusammenwirken der Teilfunktionen wird durch eine bewegungsorientierte Prozeßkoordination gesteuert. Ihr werden von der Interpolationsvorbereitung die Bewegungsprofilaten, wie Bahnpunkte, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Bezugskoordinatensystem, übergeben, die sie an die untergeordneten Funktionen überträgt. An Hand des aktuellen Bewegungszustandes führt sie die Aktivierung und

Deaktivierung der Bahnplanungsfunktionen, die Ermittlung des Bewegungsstatus und die Generierung von Quittungsmeldungen aus.

Zur Erzeugung einer Bewegungsbahn sind bis zu drei Interpolatoren für einen kooperierenden Ablauf notwendig. Diese generieren entsprechend der geforderten Bewegungsart Bahnstützpunkte, die sie an die Koordinatenrechnung übergeben, die jedem Roboter zugeordnet ist. Hier erfolgt eine Transformation der Stutzpunktdaten in das Basiskoordinatensystem des jeweiligen Roboters. Im Falle einer Master-Slave-Bewegung ist es notwendig, aus Master- und Slave-Koordinaten die Darstellung der Roboterkoordinaten zu erzeugen. Außerdem kann die Bahn durch Korrekturwerte der Sensorregelung beeinflusst werden, wenn dies die technologischen Erfordernisse bedingen.

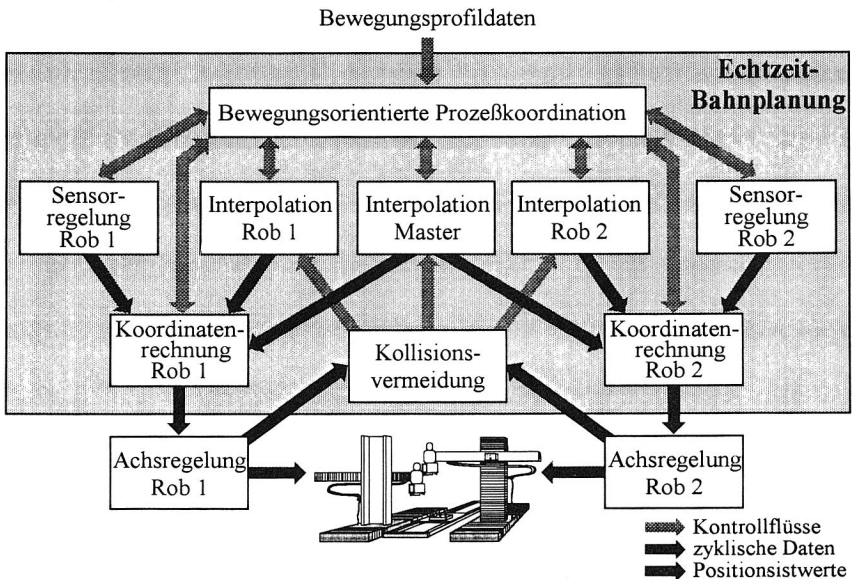
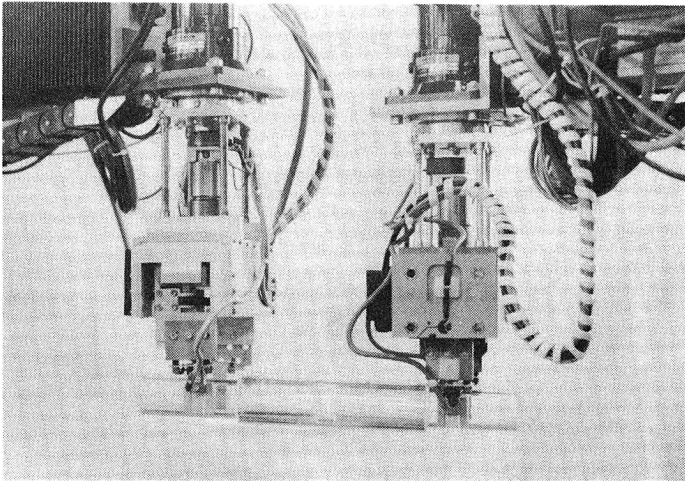


Bild 56: Darstellung der Bahnplanungsmodule für eine kooperierende Bewegung

Die Positionsregelungen der Roboterachsen erfolgt hardwarerealisiert [88]. Eine integrierte Schaltung beinhaltet sowohl eine Geschwindigkeitsprofilerzeugung als auch den Regelalgorithmus. Die Achspositionierung kann hiermit unabhängig von der Steuerung störsicher ausgeführt werden, wodurch eine Reduktion der Systembelastung der Robotersteuerung bei einer gleichzeitigen Erhöhung der Systemsicherheit erreicht wird.

Integraler Bestandteil des Echtzeitsystems ist die Operation der On-line-Kollisionsvermeidung, die ausgehend von den zur Verfügung gestellten aktuellen Istpositionen eine auftretende Kollisionsvermeidung durchführt.

sionsgefahr ermittelt. Auf Grund der notwendigen, hohen Verarbeitungsleistung wurde hierfür eine eigenständige Verarbeitungseinheit konzipiert, die mit den Funktionen der Bahnplanung über eine leistungsfähige Kommunikation verbunden ist. Der Eingriff in den Bewegungsablauf der Roboter erfolgt über eine Geschwindigkeitsreduktion, die der Gefahr der Kollision direkt proportional ist. Gleichzeitig wird die Meldung einer Kollisionsgefahr erzeugt, so daß eine Reaktion der Prozeßkoordination, der Bewegungsadministration und eine Information des Anlagenbedieners erfolgen kann.



*Bild 57: Durchführen einer kooperierenden Montageaufgabe*

## **5.3 Programmierkonzept für kooperierende Roboter**

### **5.3.1 Normierte Programmiersprachen für Industrieroboter**

Zur Steuerung von Industrierobotern in komplexen Industrieumgebungen besitzen die Programmiermethoden eine entscheidende Rolle zur Erfüllung der umfangreichen Aufgabenstellungen. Die Programmiermethoden beinhalten Funktionen des Teachens, der Definition von Bewegungsbahnen und der Steuerung des Prozeßflusses. Gleichzeitig ist es notwendig, mit Geräten der Fertigungsumgebung zu kommunizieren, Sensordaten aufzunehmen und diese in den Ablauf des Roboterprogramms zu integrieren. Die derzeitige Situation der Fertigung ist durch den überwiegenden Einsatz von On-line-Programmiermethoden gekennzeichnet, bei denen die Programme an der Anlage erstellt werden.

Die Vielzahl unterschiedlicher, herstellerspezifischer Programmiersprachen und -verfahren trugen vor dem Hintergrund des Wunsches nach Austauschbarkeit der Programme zwischen

Robotern verschiedener Hersteller zu der Entwicklung bei, eine einheitliche Programmiersprache für Industrieroboter zu schaffen [95]. Diese Normierungsbestrebungen haben bisher zu der einheitlichen Programmiersprache „Industrial Robot Language“ (IRL) [19] und auf internationaler Ebene zur „Programming Language for Robotics“ (PLR) [59] geführt. In die Konzeption der Programmierung kooperierender Roboter wurden gleichzeitig leistungsfähige, hersteller-spezifische Programmiersprachen mit einbezogen [1].

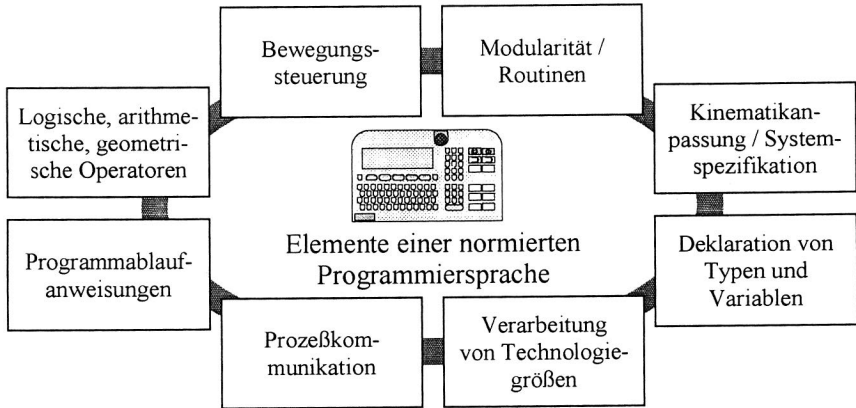


Bild 58: Funktionsumfang der Programmierung

Diese normierten Programmiersprachen sind nicht für die parallele Steuerung von mehreren Robotern bestimmt. Deren, in Bild 58 dargestellter Funktionsumfang stellt eine Verschmelzung von unterschiedlichen Anforderungsprofilen nach Einsatzaspekten, Programmiermöglichkeiten und Bedienerkomfort dar. Grundfunktion bilden die Programmier-elemente zur Ausführung unterschiedlicher Bewegungsarten, wie Punkt-zu-Punkt-, Geraden- oder Kreisbahnen. Gleichzeitig wird heutzutage von modernen Programmiermethoden eine Modularisierung und Strukturierung der Programme erwartet, wozu geeignete Anweisungen zur Steuerung des Programmablaufes zur Verfügung stehen. Unterschiedliche logische, arithmetische und geometrische Operatoren ermöglichen eine leistungsfähige Verarbeitung von geometrischen und technologischen Daten, wobei die Deklaration von Typen und Variablen eine komfortable Programmierung erlauben.

Für die Kommunikation mit Geräten in der Fertigungsumgebung stehen sowohl digitale Ein-/Ausgabesignale als auch Kommunikationsverbindungen zu Sensoren oder Anzeigeeinheiten zur Verfügung. Gleichzeitig ist die Verarbeitung technologischer Größen, wie die der Bahngeschwindigkeiten, möglich. Die Adaption des normierten Programmiermodells an die individuellen Anforderungen eines speziellen Robotertyps erfolgt innerhalb einer vom Herstel-

ler des Roboters erstellten Systemspezifikation zur Anpassung von Kinematik und Bewegungsvermögen der Achsen.

### 5.3.2 Anforderungen an Programmierung und Bedienung

Die Programmierung von Fertigungszellen stellt an die Eigenschaften einer On-line-Programmiermethodik weitreichende Anforderungen, die aus den Bewegungsformen abgeleitet werden können (Kap. 5.2.1). Besonderes Merkmal ist die Steuerung von mehreren Robotern mit oder ohne geometrische Kopplung, die somit Funktionen zur gleichzeitigen, koordinierten Bewegungsführung notwendig machen [130]. Diesen durch ihre Bahnparameter spezifizierten Bewegungen können durch zusätzliche Bewegungsbedingungen, wie Überschleifen oder Sensorunterstützung, erweitert werden.

Die Steuerung mehrerer Roboter kann prinzipiell durch ein oder mehrere Programme erfolgen, wobei dies von der Art der Zusammenarbeit abhängig ist. Eine eigenständige Kontrolle der Roboter durch mehrere Programme ist besonders dann sinnvoll, wenn überwiegend unabhängige Aufgaben ausgeführt werden sollen. Sind gleichzeitig kooperierende und unabhängige Abläufe durchzuführen, so kann dies durch eine Multitaskingunterstutzung erfolgen. An Zeitpunkten gemeinsam durchzuführender Aufgaben, beispielsweise nach dem Master-Slave-Prinzip, wird die Kontrolle an ein Programm übergeben [93]. Hierbei erfolgt die Aufnahme der Koordination durch spezielle Synchronisationsanweisungen.

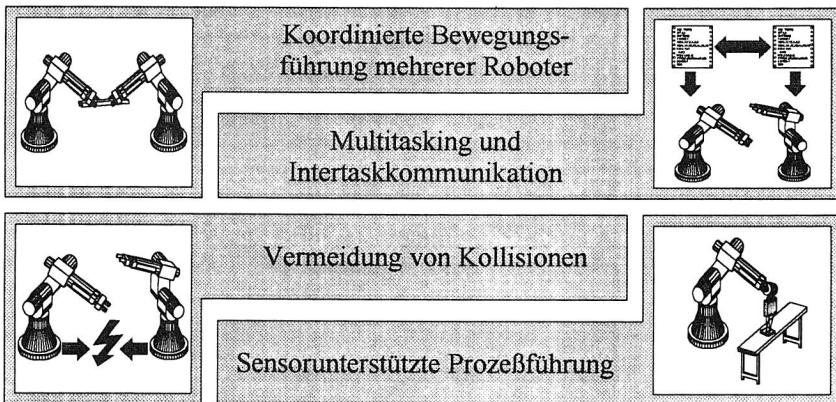


Bild 59: Kriterien einer Programmierung kooperierender Roboter

Die Anforderungen für dieses Multitasking/Multiprogramming sind analog zu anderen derartigen Softwaresystem der Prozeautomatisierung gelagert [22] und bedürfen entsprechend geeigneter Programmierunterstutzung. Diese parallele Ausführung von mehreren Tasks oder Programmen erfordert Mechanismen der Intertaskkommunikation, wie Synchronisation,

Datenaustausch und Signalbehandlung sowie einer Zeit- und Ereignisbehandlung. Gleichzeitig macht ein mehrfaches Nutzen der Roboter oder vorhandener Ressourcen durch unterschiedliche Programme oder Tasks eine entsprechende Zugriffs- und Ressourcenverwaltung notwendig.

Durch die besonderen Anforderungen an Fertigungszellen mit kooperierenden Robotern ist eine Steuerung der Funktionen der Kollisionsvermeidung innerhalb des Programmablaufes notwendig. Gleichfalls müssen die Integration von Sensordaten in den Ablauf der Bewegung parametrisiert und gesteuert werden. All diese Programmieroperationen sind durch geeignete Bedienoperationsmoglichkeiten zu unterstützen, die somit eine komfortable Programmierung ermöglichen.

### **5.3.3 Konzeption der Programmierung kooperierender Roboter basierend auf einer normierten Programmiersprache**

Die Entwicklung einer Programmiermethodik für kooperierende Roboter soll auf der Basis bisher geschaffener, standardisierter Programmiersprachen [19, 59] beruhen, um damit zukünftigen Entwicklungen gerecht zu werden. Das darin enthaltene Sprachkonzept wird beibehalten und ausschließlich um notwendige Erweiterungen ergänzt. Darüber hinaus soll auf Funktionalitäten, die besonders für eng gekoppelte Roboter Anwendung finden, eingegangen werden. Bei der Darstellung wurde von den für kooperierende Roboter notwendigen Funktionalitäten ausgegangen.

#### **Multitasking/Multiprozessing**

Für die Steuerung von kooperierenden Robotern ist eine Parallelität in der Programmausführung unabdingbar, wobei nach nebenläufigen Programmen und parallelen Tasks, die innerhalb eines Programmes gestartet werden, unterschieden werden kann. In [59] wird hierzu eine Methodik angegeben, die es erlaubt, ein derartiges Multitasking zu realisieren. Innerhalb eines Anweisungsblockes können mit Hilfe einer „FORK“-Anweisung Tasks parallel ausgeführt werden (Bild 60). Bei diesen Tasks kann es sich um einfache oder Instanzierungen von Tasks handeln.

Die Tasks werden unabhängig abgearbeitet, insofern keine Synchronisation erforderlich ist. Für einen Datenaustausch und die Synchronisation sind hierfür Interprozesskommunikationsmechanismen vorgesehen. Gleichzeitig ist es möglich, Fehler- und Ausnahmebehandlungen zu integrieren. Die Fortsetzung einer Programmbearbeitung erfordert eine Terminierung der Tasks. Hiermit ist es nicht möglich, ein nebenläufiges Programm, wie in [1], auszuführen.

Um ein derartiges Multiprogramming zu ermöglichen, ist es notwendig, ein gleichzeitiges Starten von mehreren Programmen zu realisieren. Hierfür muß die Gültigkeit und Sichtbarkeit der Funktionen und Variablen über den Bereich eines Programmes hinaus ausgedehnt werden. Somit sind die Mechanismen der Intertaskkommunikation auch hierfür einzusetzen.

### Intertaskkommunikation

Für die Synchronisation und den Datenaustausch zwischen unterschiedlichen Tasks werden in [59] „PORTS“ oder „Shared Variables“ eingesetzt. Hierbei sind diese Ports als Kanäle zu verstehen, über die sowohl Daten ausgetauscht werden können als auch eine Synchronisation zwischen zwei Tasks erfolgen kann (Bild 60). Bei dieser Methodik wird eine Task als Eigentümer des Ports angesehen und mehrere Tasks können diesen benutzen. Die Kommunikation erfolgt durch Anweisungen zur Anforderung, der Annahme und dem Quittieren von Informationen über einen Port.

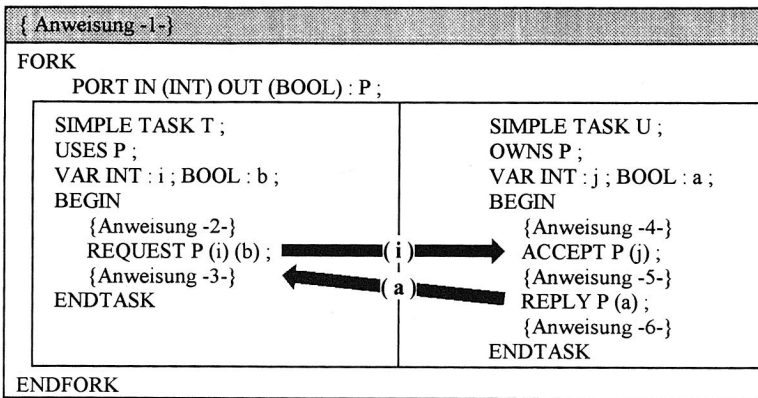


Bild 60: Ausführung von zwei parallelen Tasks mit Port-Kommunikation

Das gemeinsame Nutzen von Daten durch mehrere Tasks oder Programme wird durch systemweit bekannte, verteilte Variablen unterstützt. Zur Gewährleistung der Datenkonsistenz kann ein Zugriff auf Daten nur innerhalb von „LOOK“-Konstrukten erfolgen, so daß diese für andere Tasks gesperrt sind.

### Ressourcenverwaltung

Innerhalb einer Fertigungsumgebung mit mehreren Robotern existieren konkurrierende Beziehungen des Zugriffs auf vorhandene Geräte und Ressourcen. Das können Teilebereitstellungen, Arbeitsräume oder die Industrieroboter selbst sein. Für einen sicheren Betrieb der Anlage ist es notwendig, einen exklusiven Zugriff auf diese Ressourcen während der Programmausführung zu gewährleisten.

Die Zuordnung der Roboter zu den jeweiligen Programmen erfolgt durch eigens hierfür vorgesehene Zugriffsmechanismen. Innerhalb eines Programmes muß die Berechtigung der Bewegungsausführung für einen Roboter angefordert werden, um die Bewegungsbefehle ausführen zu können. Wird eine Roboter nicht mehr benötigt, ist er wieder freizugeben.

Für die Verwaltung von anwendungsspezifischen Ressourcen werden keine neuen Sprachelemente benötigt. Für jede Ressource wird hierfür eine verteilte Variable definiert, auf die mit Hilfe einer speziellen Funktion zugegriffen werden kann. Der exklusive Zugriff ist durch die „LOOK“-Funktionalität gewährleistet, wobei ein blockierender Zugriff erfolgt, wenn die Ressource belegt ist.

### **Gemeinsame und kooperierende Bewegungsführung**

Die wesentliche Erweiterung der bestehenden Programmiersprachen besteht in der Möglichkeit, mehrere Roboter gleichzeitig anzusteuern. Für die konzipierten Bewegungsformen sind entsprechende Sprachelemente und Programmiermethodiken zu entwerfen. Eine zeitliche Synchronisation der Bewegungsabläufe kann mit Funktionen der Intertaskkommunikation ausgeführt werden, sofern die Bewegungen in getrennten Tasks oder Programmen beschrieben sind. Durch Synchronisationspunkte ist ein Abgleich der Startzeitpunkte einzelner Bahnen möglich. Demgegenüber ist eine Abstimmung der Bahnparameter zur Erlangung koordinierter Bahnen in dieser Form nicht zweckmäßig ausführbar, da dies einen zusätzlich zu programmierenden Aufwand bedeuten würde.

Gemeinsame und kooperierende Bahnbewegungen werden durch eine einzige Bewegungsanweisung vorgegeben. Voraussetzung ist hierfür, daß die Zugriffsberechtigung auf die zu verfahrenen Roboter vorliegt. Die Zuordnung der Bahnzielpunkte zum jeweiligen Roboter erfolgt durch Angabe eines Bahnparameters, wodurch gleichzeitig eine Unterscheidung nach der jeweils aktuellen Bewegungsform getroffen werden kann. Für eine gemeinsame Bahnbewegung von zwei Robotern, die durch die Angabe der Endpunkte gekennzeichnet ist, kann dies in folgender Form geschehen:

```
MOVE LIN pos1 AKT_ROB:=rob1 , LIN pos2 AKT_ROB:=rob2 ;
```

Hierbei sind alle Bewegungsarten, wie Punkt-zu-Punkt-, Linear- und Zirkularbahnen, möglich. Gleichzeitig ist durch Angabe der entsprechenden Bahnparameter ein berschleifen zu einer nächsten Bewegung realisierbar.

Kooperierende Bewegungen von zwei Robotern werden durch maximal drei Bewegungen beschrieben. Hierfür ist es notwendig, die Bahnen für Master und Slave gleichzeitig vorzugeben. Darüber hinaus muß vor der Ausführung der ersten Bewegung die Lage des Masterkoordinatensystems bekannt sein. Hiervon ausgehend wird die relative Lage der Slaveroboter bestimmt, so daß die Programmierung wie folgt geschehen kann:

```
MOVE LIN pos1 AKT_ROB:=master , LIN pos2 AKT_ROB:=slave1 ,  
LIN pos3 AKT_ROB:=slave2 ;
```

Bedingt durch die kartesische Kopplung der Industrieroboter sind nur lineare oder zirkulare Bahnen zulässig. Die Angabe weiterer Bahnparameter macht eine berschiffene oder zeitlich harmonisierte Bahnbewegung möglich. Erfolgt bei der Vorgabe der Bewegung anstelle einer expliziten Position eine Pfadangabe, so können ganze Bewegungszuge mit einer Bewegungs-



anweisung ausgeführt werden (Kap. 4.2). Für die Programmierung mehrerer Roboter sind gegenüber herkömmlichen Anwendungen die Systemvariablen für die Spezifikation der Bahnparameter, wie beispielsweise Geschwindigkeit, Beschleunigung und überschleifen, zu erweitern. Die Bewegungsform des Single-Master-Betriebes unterscheidet sich von der Programmierung kooperierender Bewegungen durch die Angabe eines Master und nur eines Slave.

### **Kollisionsvermeidung**

Die Kollisionsvermeidung ist eine Funktionalität kooperierender Roboter, die vornehmlich der Systemsicherheit dient. In Abhängigkeit von Technologie und Bewegungsführung oder bei Gewährleistung einer Kollisionsfreiheit kann es gegeben sein, eine Aktivierung oder Deaktivierung der Kollisionsüberwachung vorzunehmen. Das erfolgt mittels Systemvariablen, die gleichzeitig eine Ermittlung des Status der Kollisionsgefahr ermöglichen.

### **Sensordatenintegration**

Die Unterstützung der Bewegungsführung durch Sensorinformationen erfordert die Möglichkeit einer Parametrierung der Funktionen der Sensorfuhrung. Hierzu können mit Hilfe von Systemvariablen die Parameter der Sensorregler, die Sollwerte, das Sensor- und das Bezugskoordinatensystem sowie die Selektionsmatrix vorgegeben werden. Der Bezug zu den auszuführenden Bewegungen erfolgt durch die Angabe entsprechender Bahnparameter.

### **Operationen für eine Bedienung kooperierender Industrieroboter**

Neben der erweiterten Gestaltung der Programmiersprache ist es notwendig, den Bediener durch geeignete operative Funktionen für die Programmierung zu unterstützen. Besonders gemeinsame Bewegungsoperationen mit einem festen Bezug der Roboter zueinander sind auszuführen. Dies erfolgt in der Art, daß bei einer Bewegung die Roboter die kinematische Beziehung zueinander beibehalten und diese mit einer Bedienoperation gleichzeitig bewegt werden. Die Ausführung einzelner, überlagerter Bewegungen geschieht anschließend für jeden Roboter separat. Die eingenommenen Positionen können als geteachte Stützpunkte in das Programm des Industrieroboter übernommen werden.

## 5.4 Echtzeitfähige Einfachsteuerungen für intelligente Feldgeräte

### 5.4.1 Bewertung von Steuerungen im Feldbereich

Die zunehmende Dezentralisierung der Steuerungstechnik auf unmittelbarer Prozezebene erfordert von den eingesetzten Gerätekomponten die Integration von Echtzeit- und Kommunikationsfunktionalitäten zur Schaffung von komplexen Anwendungssystemen. Aufgaben, wie die Erfassung und Vorverarbeitung von Sensorinformationen, die Ausführung von Stelloperationen, die Regelung einfacher Vorgänge oder eine Datenausgabe, können hierfür als typisch angesehen werden. Diese, als intelligente Feldgeräte bezeichneten kommunikationsfähigen Steuerungskomponenten, bieten gegenüber herkömmlichen Lösungen den Vorteil, einer erhöhten Modularität und Erweiterbarkeit. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit der Konfigurierbarkeit und Selbstüberwachung der Komponenten.

Charakteristisch sind auf Sensor-Aktor-Ebene die Anforderungen nach Einhaltung definierter Zeitbedingungen bei einem hohen Maß an Sicherheit der auszuführenden Aufgaben. Eingesetzt werden hierfür oftmals Steuerungskomponenten auf der Basis von 8-Bit-Prozessoren, da überwiegend Operationen mit geringen Anforderungen an die Verarbeitungsleistung bei gleichzeitiger Forderung nach niedrigen Kosten ausgeführt werden.

Für Echtzeitanwendungen ist charakteristisch, die Aufgaben in unabhängige Module zu untergliedern und die Verwaltung nach zeitlichen Gesichtspunkten durch das Betriebssystem ausführen zu lassen. Bedingt durch den Systemaufwand, werden derartige Echtzeitsysteme vorrangig für Steuerungen mit 16- oder 32-Bit-Prozessoren eingesetzt. Erfolgt eine Reduktion der Betriebssystemfunktionen auf Kernbestandteile, so ist der Einsatz auch für einfache Prozessoren sinnvoll möglich [135].

Als wesentliche Kernfunktionen können hierbei die Verwaltung und Steuerung der implementierten Tasks, eine mögliche Priorisierung von einzelnen Aufgaben und ein effektiver Datenaustausch angesehen werden. Gleichzeitig ist die Integration der Feldbuskommunikation in den Systemkern ein wichtiger Gesichtspunkt.

### 5.4.2 Steuerungskonzept

Ausgehend von den genannten Anforderungen wurde ein Echtzeitsystem für Einfachsteuerungen konzipiert. Dieses unterstützt besonders die Ausführung von Tasks nach zeitlichen Gesichtspunkten, wie sie für Regelungen typisch sind. Grundlage der Taskverwaltung bildet ein prioritätengesteuertes Multitasking, welches aus drei Prioritätsebenen mit maximal 8 Tasks besteht. Hierbei erfolgt die Bearbeitung der Tasks in einem konfigurierbaren Zeitraster, beginnend mit der ersten Task der höchsten Prioritätsebene. Innerhalb einer Ebene wird nach dem

Round-Robin-Prinzip verfahren. Können in einer Zeitscheibe nicht alle Tasks bearbeitet werden, so wird die aktuell laufende Task unterbrochen und mit der höchst prioren Task ein neuer Zyklus begonnen. Innerhalb einer Prioritätsebene wird mit der unterbrochenen Task fortgefahren. Hiermit kann ein Preemptive-Verhalten zwischen und ein None-Preemptive-Verhalten innerhalb der Prioritätsebenen erzielt werden.

Prinzipiell wird davon ausgegangen, daß die Tasks der höchsten Prioritätsebene immer innerhalb der Zeitscheibe ausgeführt werden. Bei Verletzung dieser Bedingung bricht das System mit einem Fehler ab, wodurch die Ausführung von wichtigen Funktionen in einem Zyklus garantiert werden kann. Zusätzlich kann zur Gewährleistung der Systemsicherheit ein Watch-Dog genutzt werden, der bei Systemausfall ein automatisches Rücksetzen der Steuerung bewirkt.

Merkmale des Echtzeitsystems:

- Prioritatstesteuertes Multitasking
- Pre-emptive und none-pre-emptive Scheduling
- Watch-Dog-Überwachung
- Konfigurierbare Zeitbasis
- Sytemintegrierte Kommunikation

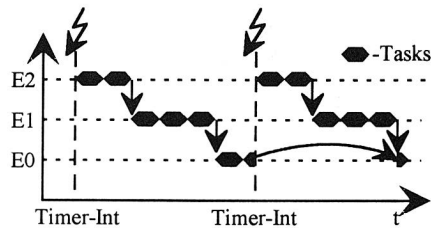


Bild 61: *Eigenschaften und Schedulingmechanismen des Systems für echtzeitfähige Einfachsteuerungen*

Die Kommunikation der Steuerung mit anderen Prozeßkomponenten wurde als integraler Teil der Systemfunktionalität unabhängig von den Anwenderprogrammen konzipiert. Hierdurch ist es möglich, Daten zwischen dem Steuerungssystem und anderen Fertigungssteuerungen auszutauschen, mittels definierter Kommandos den Ablauf zu steuern oder den Systemzustand zu ermitteln, ohne daß hierfür Anwenderfunktionen notwendig sind. Das dargestellte Echtzeitbetriebssystem für Einfachsteuerungen wurde auf einem Prozessor der 8051'er-Familie unter Ausnutzung deren spezifischer Eigenschaften realisiert und für die Steuerung der flexiblen Greifer eingesetzt. Für die Erstellung der Anwendersoftware ist nach vorgegebenen Designregeln zu verfahren, um eine ordnungsgemäße Funktion zu gewährleisten.

### 5.4.3 Verfahren interner Nachrichtenübertragung

Die Konzeption der Kommunikation als systeminterne Funktionalität macht hierfür Methoden zur Interprozeßkommunikation notwendig, die die Datenkonsistenz des Nachrichtenaustausches zwischen Kommunikationsdiensten und den Tasks zu gewährleisten. Hierzu wurde ein Austausch von Nachrichtenpuffern entworfen, der auf einem Message-Passing beruht. Die

Verwaltung erfolgt über systeminterne Tabellen, wobei die Einträge zugeordneten Nachrichten, vergleichbar mit Variablen, entsprechen.

Ein datensendender Prozeß fordert einen Puffer an und legt ihn, nachdem er die Informationen eingetragen hat, in der Systemtabelle ab. Der Empfänger kann anschließend auf die Daten zugreifen, wobei auch mehrere Empfänger der Information existieren können. Wird der Nachrichtenpuffer nicht mehr benötigt, so kann er freigegeben werden und steht somit wieder zur Verfügung, sofern er nicht gleichzeitig von anderen Tasks benutzt wird.

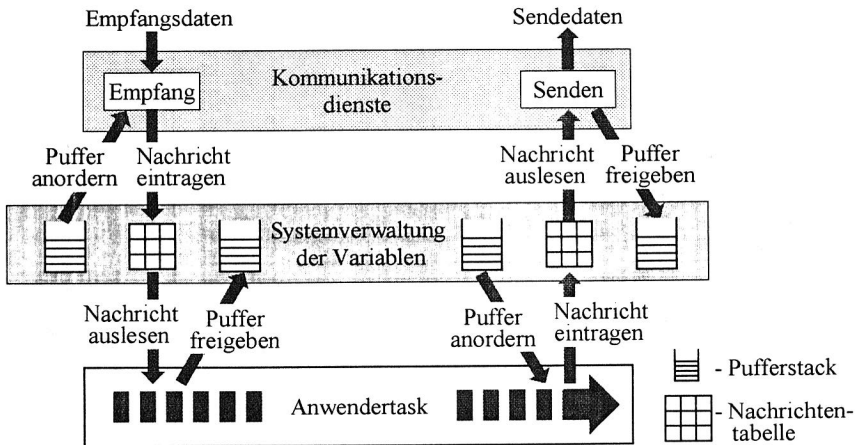


Bild 62: Datenübertragung mittels Variablen austausch

Dieser asynchrone Datenaustausch ist sowohl zum Empfangen als auch zum Senden von Daten an die Kommunikationsdienste einsetzbar. Für eine Intertaskkommunikation sollten diese Dienste aus Effizienzgründen nur dann genutzt werden, wenn eine Konsistenz der Daten anders nicht gegeben ist.

## **6    Sensorgestützte Bahn- und Kraftführung von Robotern**

Zur Unterstützung und Sicherung von Prozeß und Bewegung besitzt die Integration von Sensordaten eine maßgebende Bedeutung. Verschiedene Fertigungstechnologien mit Robotern erfordern die Einhaltung von definierten geometrischen Beziehungen zwischen Werkzeug und Werkstück oder die Gewährleistung vorgegebener Montagekräfte zur Sicherung von Fertigungsqualität und Prozeß. Unter den unterschiedlichen Formen der Sensordatenintegration kommt der Sensorregelung eine außerordentliche Bedeutung zu, da eine unmittelbare Wirkung auf die zu steuernden Prozeßgrößen realisiert werden kann. Die anstehenden regelungstechnischen Aufgaben der Modellierung, des Reglerentwurfes und der Validierung zur Lösung dieses Problems werden dargestellt. Mit dem Ziel möglichst optimaler Fertigungsergebnisse sollten die Sensorinformationen unmittelbar an der Wirkstelle erfaßt werden, was am Beispiel der Sensorintegration an einem flexibel positionierbaren Zweibackengreifer betrachtet wird.

### **6.1    Motivation und Formen des Sensoreinsatzes für Roboteranlagen**

#### **6.1.1    Bedeutung in der Fertigungsautomatisierung**

Die zunehmende Leistungsfähigkeit derzeitiger Automatisierungslösungen erfordert von Industrierobotern weitergehende Fähigkeiten, die sich vor allem in einer Anpassung an herrschende Fertigungsbedingungen äußern. Neben der Optimierung der Steuerungsstrategien besitzt die Integration von Sensorinformationen eine immer entscheidendere Rolle für die zukünftige Einsetzbarkeit von Robotern [34]. Ausgehend von den unterschiedlichen Robotertechnologien und deren charakteristischer Problemstellungen können für essentielle Bereiche der Fertigung technologische und ökonomische Nutzenpotentiale aufgezeigt werden [143].

Die prinzipiell höheren Investitionskosten und die technologischen Voraussetzungen für die Sensorintegration werden durch Einsparungen an notwendiger Peripherie, an verkürzten Prozeßvorbereitungs- und -ausführungszeiten und einem erhöhten Maß an Prozeßsicherheit relativiert. Die Sicherung von Qualität kann durch die direkte Beeinflussung der prozeßbestimmenden Parameter mittels Sensordaten erzielt werden. Zudem können aufwendige Anpassungsarbeiten bei Variantenwechsel durch den Sensoreinsatz reduziert werden.

Für die typischen Einsatzgebiete von Industrierobotern lassen sich charakteristische Problemfelder spezifizieren (Bild 63). Ein grundsätzliches Problem ist die verhältnismäßig geringe Positioniergenauigkeit von Industrierobotern gegenüber numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen, die sich darin begründet, daß Fehler in der kinematischen Kette starke Auswirkung auf

die Position haben. Ursachen hierfür liegen hauptsächlich in der Elastizität und dem nichtlinearen Verhalten der Antriebs- und Übertragungselemente [9]. Zusätzlich wirken sich Fertigungstoleranzen, thermische Längenänderungen während des Betriebes, Verschleiß und Formänderungen durch Überlastungen auf die Posegenauigkeit und auf die Bahngenauigkeit aus [97].

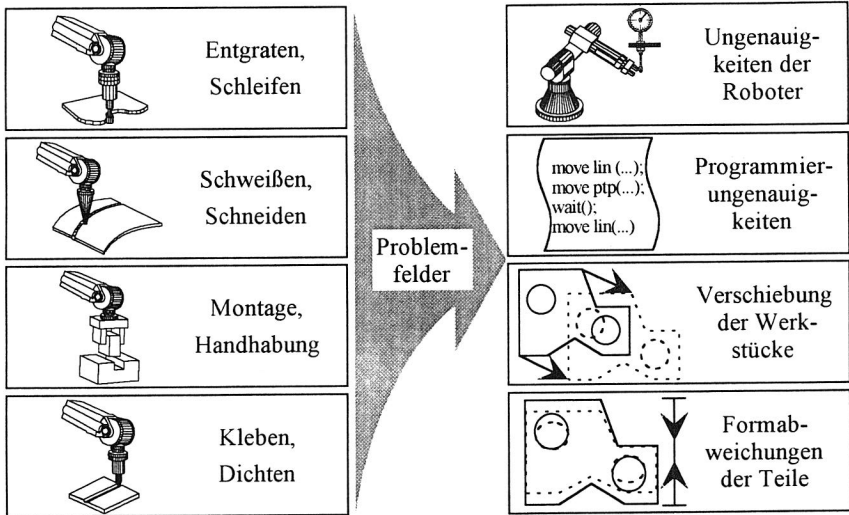


Bild 63: Einsatzcharakteristik von robotergestützten Fertigungsanlagen

Wesentliche Positionsabweichungen treten bei den zu bearbeitenden oder montierenden Werkstücken durch Toleranzen der Werkstückzuführungen und der Aufspannungen auf [24]. Zusätzlich können Änderungen der relativen Position zwischen peripheren Einrichtungen und den Robotern auftreten. Des weiteren weisen die zu bearbeitenden Werkstücke Form- und Lageabweichungen auf, die aus bestehenden Fertigungstoleranzen oder aus Formänderungen durch Erwärmung resultieren können [102]. Bei Fertigungstechnologien, wie dem Entgraten, besteht die Problemstellung eines hohen Toleranzbereiches in der zu bearbeitenden Geometrie [113]. Maßnahmen zur Genauigkeitsverbesserung beruhen derzeit auf der Berücksichtigung ermittelter Positionsfehler bei der Bahnvorgabe und auf einem verbesserten konstruktiven Aufbau [97].

Moderne Programmiermethoden nutzen gegenüber der industriell vorherrschenden Teach-In-Programmierung die Möglichkeit, Programme für Roboteranlagen off line zu erstellen. Wesentliches Problem ist die Anpassung der CAD-Modelle und der generierten Programme an die Verhältnisse der realen Anlage. Lösungsansätze bestehen hierbei in einer exakten Vermessung der Fertigungsanlage und deren Abbildung im Modell [121].

## 6.1.2 Gestaltungsmöglichkeiten der Sensorintegration

### Formen des Sensoreinsatzes

Durch den Einsatz von Sensoren ist es möglich, die aufgeführten Problemstellungen effektiv zu lösen, um die auftretenden Toleranzen zwischen programmierten und geforderten Bahnen auszugleichen [96, 143]. Die Sensorintegration kann sowohl on line zum Bewegungsablauf oder off line vor Ausführung einer Bewegung erfolgen (Bild 64). Kennzeichnend ist bei diesen unterschiedlichen Formen die erzielbare Leistungsfähigkeit und der notwendige steuerungstechnische Aufwand.

Die Bestimmung einzelner Punkte, wie die Lage der zu greifenden oder zu montierenden Werkstücke, wird in vielfältigen Anwendungen mit Hilfe von CCD-Kamerasystemen erfasst und als Position in der Robotersteuerung berücksichtigt [84]. Für Technologien, wie Schweißen oder Kleben, verfährt ein Roboter einen geeigneten Sensor über die Oberfläche des Werkstücks und vermisst die Konturen punktwise in einem zeitlichen Raster [112]. Diese Punkte dienen anschließend unmittelbar als Bahnstützpunkte des Roboters oder zur Programmierunterstützung.

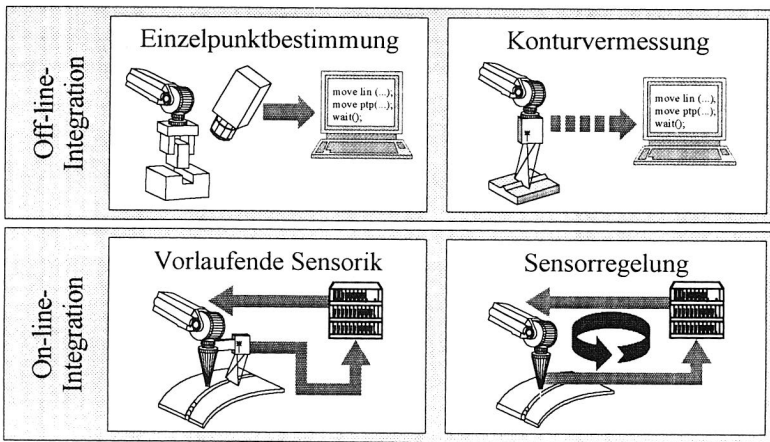


Bild 64: Formen der Sensordatenintegration

Für eine On-line-Integration von Sensordaten zur Beeinflussung der Bewegung des Roboters ist ein zyklischer Eingriff in die Robotersteuerung notwendig. Diese Form bietet zwei unterschiedliche Arten der Sensorintegration, die sich in ihren Systemverhalten unterscheiden. Für einen steuernden Eingriff kann ein Sensor örtlich und somit zeitlich vorlaufend zum Werkzeug montiert sein und den zukünftigen Bahnverlauf bestimmen [47]. Die so ermittelten kartesischen Bahnpunkte werden unmittelbar zur Bahnplanung genutzt, wodurch eine Kompensation inter-

ner Verzugszeiten zu erzielen ist. Hierbei handelt es sich um einen steuernden Eingriff, womit unmittelbar am Tool-Center-Point (TCP) auftretende Verhältnisse nicht mehr berücksichtigt werden können [47]. Starke Konturänderungen führen hierbei zu einem Verlassen der zu messenden Größen aus dem Meßbereich der Sensoren, wodurch die ermittelten Informationen ungültig werden [143].

Die Platzierung des Sensor unmittelbar am TCP sowie die Ermittlung und Übertragung zyklischer Korrekturwerte an die Robotersteuerung ermöglichen es, der bereits vorhandenen Lage- regelung eine zusätzliche Sensorregelung kaskadiert zu überlagern. Bei dieser Lösung treten jedoch systembedingte Verzugszeiten auf, die im Bereich von 2-3 Interpolationszyklen für industrielle Robotersteuerungen liegen und das Systemverhalten wesentlich bestimmen [96, 31]. Diese dynamikbegrenzenden Totzeiten sind die Ursache für eine nur geringe Praxisrele- vanz derartiger Sensorregelungen. Jedoch konnte in [143] gezeigt werden, daß mit Hilfe schneller Eingriffstellen in das System der Robotersteuerung eine für Fertigungsbedingungen ausreichende Dynamik von Sensorregelungen erreicht werden kann. Gleichzeitig wird die Möglichkeit der Beeinflussung von Kräften und Momenten, wie sie beim Entgraten oder der Montage von Bedeutung ist, durch eine Sensorregelung geschaffen.

### Eingriffstellen für Sensordaten

Grundsätzlich lassen sich verschiedene Eingriffstellen für Sensordaten innerhalb der Steue- rungsstruktur einer Robotersteuerung charakterisieren (Bild 65) [142]. Bei den bereits erwäh- ten Verfahren der Off-line-Integration werden die ermittelten Sensorinformationen entweder durch ein externes Rechnersystem für die Programmerstellung oder innerhalb des Roboterpro- grammes zur Programmverzweigung oder Vorgabe von Bahnpunkten genutzt. Entsprechend der zeitlichen Einordnung wird dieser Eingriff als azyklisch bezeichnet.

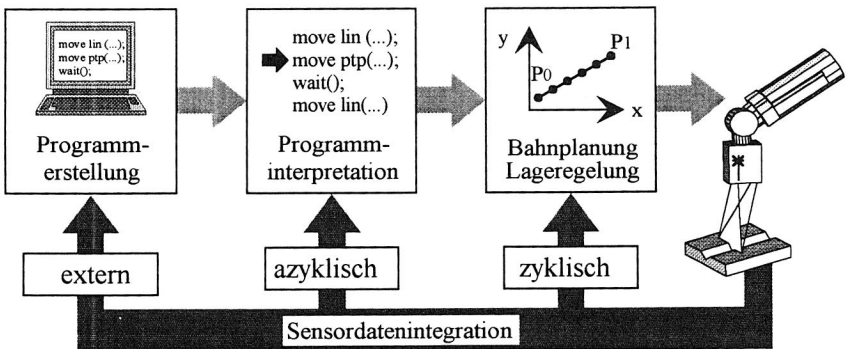


Bild 65: Eingriffsmöglichkeiten von Sensordaten



Für die On-line-Sensordatenintegration können entsprechend des Aufbaus der Robotersteuerung zwei zyklische Schnittstellen genutzt werden, die sich in ihrem zeitlichen Verhalten wesentlich unterscheiden [32]. Ausgehend von einer vorgegebenen Bewegungsbahn bestimmt ein Interpolator zyklisch Bahnstützpunkte in einem Takt von 5 - 40 ms, zu denen kartesische Korrekturwerte integriert werden können. Dieser Eingriff ist charakterisiert durch eine relativ hohe Zykluszeit und eine weitere Totzeit, die aus der für Gelenkarmrobotern notwendigen Koordinatentransformation resultiert. Wesentlich kürzere Zykluszeiten von ca. 1 - 10 ms bieten Schnittstellen, die unmittelbar die Sollwerte des Lagereglers beeinflussen. Dieser Eingriff stellt hohe Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Sensorrechner und ist bei Gelenkarmrobotern im achsspezifischen Koordinaten vorzunehmen. Entsprechend der gewählten Eingriffstelle kann somit für verschiedene technologische Anforderungen eine unterschiedliche Dynamik von einem einfachen Höhenausgleich für Greifaufgaben bis zur schnellen Nahtverfolgung beim Laserstrahlschweißen erreicht werden [33].

## 6.2 Entwicklung von Strategien sensor geregelter Bewegungen

### 6.2.1 Vorgehen des Reglerentwurfes

Auf Grund der dargestellten Leistungsfähigkeit und der praktischen Relevanz von Sensorregelungen für die industrielle Praxis soll deren Verhalten für das System der kooperierenden Roboter sowohl für Abstands- als auch für Kraftregelung untersucht werden. Die Integration und die Verarbeitung der Sensordaten erfolgt in kartesischen Koordinaten in einem Takt von 5 ms. Die Übertragbarkeit von Untersuchungen zu kartesischen Sensorregelungen auf Gelenkarmroboter wurde in [143] unter den dort angeführten Randbedingungen erläutert.

Zielsetzung der Sensorregelung ist ein gutes Führungsverhalten zur Regelung der Position des Roboterwerkzeugs oder der auftretenden Kraft gegenüber der jeweilig vorgegebenen Führungsgröße. Hierbei wird ein Erreichen des stationären Endwertes ohne bleibende Regelabweichung bei einer sprungförmigen Führungsgröße und eine Robustheit gegenüber Schwankungen von Streckenparametern und Modellfehlern erwartet.

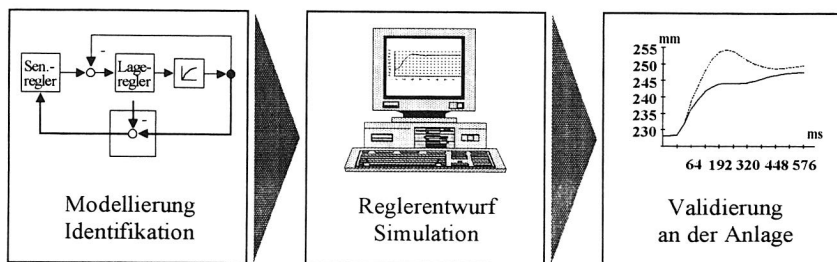


Bild 66: Vorgehensweise beim Entwurf der Sensorregelungen

Als Sensorregler sollen besonders parameteroptimierte Reglertypen zum Einsatz kommen, die sich durch die Vorgabe der Reglerstruktur und die Anpassung der Parameter an die Strecke auszeichnen [51]. Regler, deren Reglerstruktur und Reglerparameter sich aus der Struktur und den Parametern der Streckenübertragungsfunktion ergeben, wurden nicht näher in Betracht gezogen, da das nichtlineare Verhalten der Regelstrecke den Reglerentwurf problematisch gestalten würde.

Für den Entwurf wurde die in Bild 66 dargestellte Vorgehensweise gewählt. Ziel der Regelung ist es, das dynamische Übertragungsverhalten annähernd gleich dem der unregulierten Regelstrecke zu erhalten. Eine weitere Dynamikverbesserung wird nicht angestrebt, da davon ausgegangen werden kann, daß der Roboter ein optimales Verhalten für die Bahnführung besitzt. Des weiteren würde eine Dynamikerhöhung einen höheren Verschleiß der Getriebe und Übertragungselemente bedeuten und so die Lebensdauer des Roboters deutlich verringern. Somit soll mit einer Sensorregelung gegenüber steuernden Sensordatenintegrationen vornehmlich der Einfluß auftretender Störungen ausgeglichen werden.

## 6.2.2 Optimierungsverfahren zur Parameterbestimmung

Zur Identifikation der Regelstrecke sowie für die Ermittlung der Reglerparameter ist es möglich, neben analytischen Verfahren, auch Methoden der Parameterschätzung und Optimierung anzuwenden. Die Vorgehensweise ist dadurch gekennzeichnet, daß Informationen über die Struktur des Systems oder über Streckenparameter bereits aus Konfigurationswerten oder vorab ermittelten Größen bekannt sind. Davon ausgehend, kann zur Parameterschätzung die nichtrekursive Methode der kleinsten Quadrate für dynamische Prozesse eingesetzt werden [52]. Voraussetzung ist hierfür die Stabilität und Zeitinvarianz des Systems.

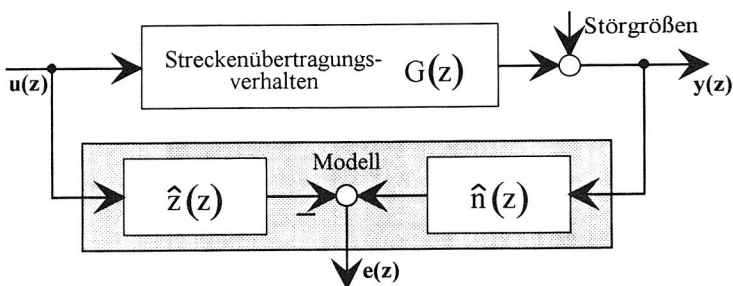


Bild 67: Parameterschätzung nach der Methode der kleinsten Quadrate

Wie in Bild 67 dargestellt, erfolgt bei diesem Verfahren eine Minimierung des Fehlers  $e(z)$  bei einer vorgegebenen diskreten Modellübertragungsfunktion  $\hat{G}(z)$ . Der Fehler beschreibt die Differenz zwischen realem System und Modell (Gl. 23). Er resultiert aus falsch vorgegebenen Modellparametern und den Störeinflüssen.

$$e(z) = \hat{n}(z)y(z) - \hat{z}(z)u(z) \quad \text{Gl. 23}$$

Ziel der Optimierung ist es nun, die Parametervektoren  $\hat{\theta}$ ,  $\hat{n}$  der Modellstrecke so zu wählen, daß  $e(z)$  minimal wird. Durch den Übergang in den Zeitbereich kann dies durch den quadratischen Gesamtfehler ausgedrückt werden.

$$V = \sum_{k=1}^n e^2(k) \quad \text{Gl. 24}$$

Die Optimierung der Modellparameter erfolgt iterativ mit dem Verfahren der Lagrange-Multiplikator-Methode [92]. Dabei ist es das Ziel, den Lagrangeoperator, der sich aus dem Gesamtfehler  $V$ , der Nebenbedingung  $g$  und dem Lagrangemultiplikator  $\lambda$  bestimmt, zu minimieren. Dies erfolgte mit Hilfe des Mathematik- und Simulationswerkzeuges Matlab [76].

$$L(\hat{\theta}, \hat{n}, \lambda) = V(\hat{\theta}, \hat{n}) + \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot g_i(\hat{\theta}, \hat{n}) \quad \text{Gl. 25}$$

### 6.2.3 Modellbildung der Regelstrecke

Der Aufbau einer kartesischen Sensorregelung kann aus der Struktur der Robotersteuerung abgeleitet werden. Ausgehend von dieser können anschließend die Modellparameter bestimmt werden.

#### Strukturanalyse

Die Integration kartesischer Sensordaten erfolgt im Interpolationstakt als Korrektur der Bahnstützpunkte. Ziel einer Regelung ist die Einhaltung einer geometrischen Größe, beispielsweise eines Abstandes über einer Werkstückoberfläche, so daß die Position des Werkzeugs als Regelgröße angesehen werden kann. Die Führungsgröße wird durch die Werkstückkontur gebildet, zu der der Abstand durch einen am TCP befestigten Sensor ermittelt wird. Dieser ist dadurch Meß- und Vergleichsglied in einem. Verläuft die Bahn des Roboters nicht auf der Oberfläche, sondern zu ihr versetzt, ist außerdem ein Sollabstand mit einzubeziehen. Wird der Sensor nicht als Differenzglied angesehen, so ist es möglich, die Bildung der Regeldifferenz auch an diesem Punkt vorzunehmen, ohne eine strukturelle Änderung zu bewirken.

Aus der Regelabweichung bestimmt der Sensorregler die notwendigen Korrekturwerte, um eine schnelle und genaue Nachführung der Roboterposition zu erreichen. Diese Stellgröße wird zur Bestimmung der kartesischen Bahnstützpunkte hinzugezogen. Durch den Einsatz der in Kapitel 4.2 vorgestellten Methode der sensorgestützten Bewegungsführung kann der Einfluß der Bahninterpolation ausgeschlossen werden.

Die Regelstrecke wird durch die Steuerung und den Roboter gebildet. Bedingt durch die kinematischen Gegebenheiten, ist hierbei eine Koordinatentransformation nicht notwendig, die ihrerseits eine weitere Totzeit darstellen und die Dynamik deutlich reduzieren würde. Auf Grund der Hardwarerealisierung der Lageregelung ist dieser eine Bewegungsprofilerzeugung

vorgelagert. Für die Sensorregelung finden hierbei stets die maximalen Beschleunigungen und Geschwindigkeiten Anwendung. Die eigentliche Achspositionierung erfolgt typischerweise in einer Kaskadenstruktur mit digitalem Lageregler sowie analogem Geschwindigkeits- und Stromregler. Die Mechanik der Strecke besteht aus den Übertragungselementen und den Roboterarmen.

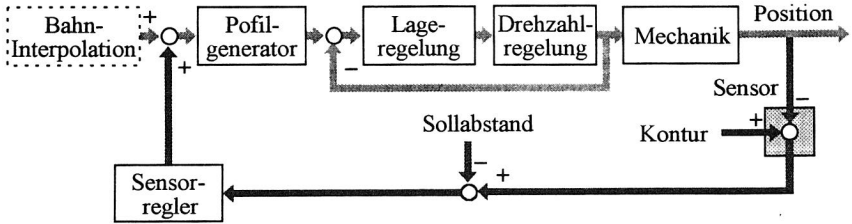


Bild 68: Struktur einer Sensorregelung bei Integration im Interpolationstakt

Ausgehend von dieser Struktur erfolgt die Modellierung des dynamischen Verhaltens des Roboters (Bild 69). Hierzu werden den einzelnen Strukturelementen entsprechende Übertragungsglieder zugeordnet. Zur Modellvereinfachung sollen die Achsen des Roboters als entkoppelt betrachtet werden, und die Einwirkung der Gravitation wird auf Grund von Getriebeübersetzungen vernachlässigt. Federsteifigkeit und Trägheitsmoment werden als konstant angenommen.

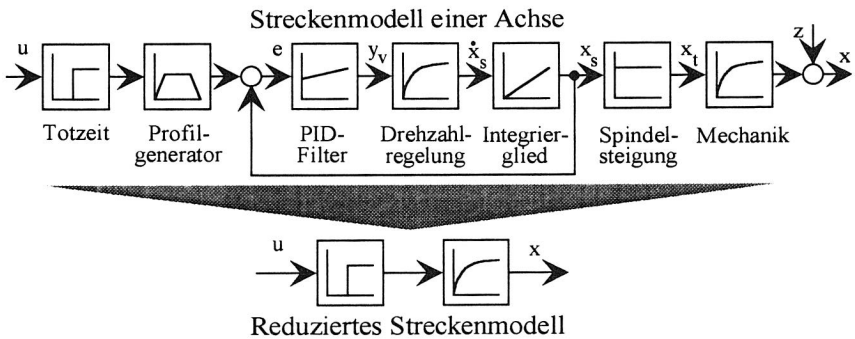


Bild 69: Darstellung des Übertragungsverhaltens der Roboterregelstrecke

Im Modell beinhaltet das Totzeitglied die Verzugszeiten sowohl der Sensordatenerfassung als auch der Korrekturwertübertragung. Der Lageregler wird durch einen PID-Filter (Gl. 26) gebildet, dessen Kennwerte aus den Maschinendaten des Roboters abgelesen werden können [88].

$$y_v(k) = K_p \cdot e(k) + K_i \cdot \sum_{N=0}^n e(k) + K_d \cdot [e(k) - e(k-1)] \quad \text{Gl. 26}$$

Die analog realisierte Drehzahlregelung wird als ein schwingungsfähiges System 2. Ordnung mit einem Vorhalt (Gl. 27) klassifiziert.

$$G_V(s) = K \cdot \omega_0^2 \cdot \frac{(1 + s \cdot T_D)}{s^2 + 2 \cdot D \cdot \omega_0 + \omega_0^2} \quad \text{Gl. 27}$$

Das Übertragungsverhalten der mechanischen Elemente der Achse wird durch ein schwingungsfähiges System zweiter Ordnung beschrieben, wobei die Spindelsteigung ein reines P-Glied dargestellt. Das Verhalten der Drehzahlregelung und der Mechanik wurden mit Hilfe der Sprungantwort experimentell ermittelt.

$$G_M(s) = \frac{x(s)}{x_i(s)} = \frac{p_{M2} \cdot s^2 + p_{M1} \cdot s + p_{M0}}{q_{M2} \cdot s^2 + q_{M1} \cdot s + q_{M0}} \quad \text{Gl. 28}$$

Für die Aufgaben des Entwurfes der Sensorregler und der Simulation des Verhaltens des Regelkreises erfolgt eine Reduktion des Modell auf ein totzeitbehaftetes System, dessen Parameter nachfolgend bestimmt werden sollen.

**Parameteridentifikation**

Für die Analyse des Übertragungsverhaltens der Regelstrecke wurde ebenfalls eine Identifikation mit Hilfe der Sprungantwort durchgeführt, welche gleichzeitig zur Überprüfung des detaillierten Streckenmodells diente. Hierzu erfolgte am Eingriffspunkt der Sensordaten softwaremäßig die Vorgabe einer Sprungfunktion, deren Antwort mittels eines Triangulationssensors aufgenommen und protokolliert wurde.

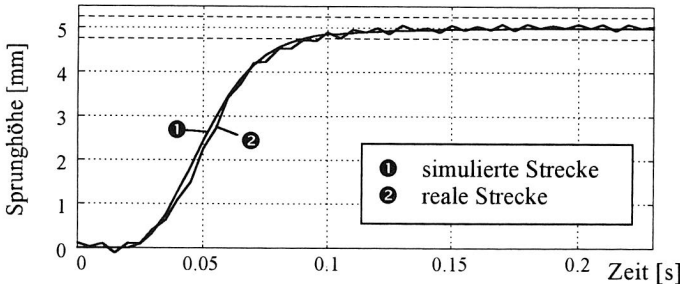


Bild 70: Sprungantwort der gemessenen und der simulierten Strecke

Das Streckenverhalten ist durch eine signifikante Totzeit von ca. 15 ms und einer Anschlagzeit von ca. 91 ms bei einer Einschwingtoleranz von 5 % gekennzeichnet. Die Position läuft überschwingfrei in ihren Endwert ohne bleibende Regelabweichung ein. Verbleibende Schwan-

kungen sind auf Meßsignalstörungen zurückzuführen. Ausgehend von dieser Sprungantwort wurde das System mit Hilfe des in Kapitel 6.2.2 vorgestellten Optimierungsverfahrens identifiziert. Hierbei konnte die Strecke durch ein vorgegebenes System dritter Ordnung mit einer dreifachen Totzeit modelliert werden (Gl. 29), wofür sich optimale Parameter der Übereinstimmung zwischen realer und simulierter Strecke ergaben.

$$G_S(z) = \frac{p_{s1} \cdot z + p_{s0}}{z^3 + q_{s2} \cdot z^2 + q_{s1} \cdot z + q_{s0}} \cdot z^{-3} \quad \text{Gl. 29}$$

Das Verhalten der Strecke ist durch eine dreifache Totzeit sowie einen reellen Pol und ein konjugiert komplexes Polpaar in der rechten Halbebene innerhalb des Einheitskreises gekennzeichnet, so daß ein asymptotisch stabiles Verhalten der Strecke gegeben ist. Wie in Bild 70 ersichtlich ist, konnte das Übertragungsverhalten des Systems durch das Modell sehr gut nachgebildet werden. Die Untersuchungen wurden an Hand geringer Sprunghöhen durchgeführt, wobei zu beachten ist, daß für größere Stellgrößen sich auf Grund des nichtlinearen Verhaltens der Profilgeneration Änderungen im Verhalten des reduzierten Modells ergeben. Da durch Sensorkorrekturen prinzipiell nur geringe Abweichungen in der Bahn ausgeglichen werden sollen, ist die Analyse des Verhaltens an Hand dieser geringen Sprunghöhen gerechtfertigt.

#### 6.2.4 Regelung geometrischer Größen

Für die Abstandsregelung mit einem Eingriff auf kartesischer Ebene sollen verschiedene parameteroptimierte Regler untersucht und in ihrem Verhalten bewertet werden. Bedingt durch das Fehlen eines integrierenden Verhaltens der Regelstrecke, ist es notwendig, Regler mit integrahlem Übertragungsverhalten wie PI- oder PID-Regler einzusetzen, um eine bleibende Regelabweichung zu verhindern.

##### PI-Regler

Durch Transformation der kontinuierlichen Übertragungsfunktion eines PI-Reglers und der Notwendigkeit eines Pols bei  $z=1$  ergibt sich ein diskreter Regelalgorithmus erster Ordnung [51]:

$$G_{PI}(z) = \frac{p_{PI1} \cdot z + p_{PI0}}{z - 1} \quad \text{Gl. 30}$$

Die Ermittlung der Reglerparameter  $p_{PI1}$  und  $p_{PI0}$  erfolgt analog zu der bereits für die Identifikation der Strecke genutzt Optimierungsstrategie. Das Optimierungsziel ist hierbei das Verhalten der unregelten Strecke, so daß sich keine Verringerung der Dynamik durch die Regelung ergibt. Als Nebenbedingung der Optimierung wird gleichzeitig ein maximal zulässiges Überschwingen vorgegeben.

Die Ergebnisse der Sprungantwort an der Anlage und der Simulation haben eine Annäherung des Regelkreisverhaltens an die Zielkriterien bei einer hohen Übereinstimmung zwischen simulierten und realen Verhalten gezeigt (Bild 71). Für den entworfenen PI-Regler ergab sich eine

Anregelzeit von ca. 82 ms bei einem geringen Überschwingen innerhalb eines Toleranzbereiches von 5 %. Die systembedingte Totzeit blieb unverändert.

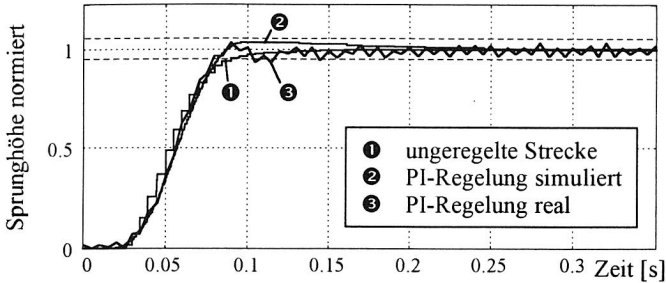


Bild 71: Sprungantwort der PI-Sensorregelung

Für den Nachweis des Erreichens des Endwertes ohne bleibende Regelabweichung bei konstanter sprunghöhenförmiger Führungsgröße und der vollständigen Ausregelung einer auf die Position des Roboters wirkenden Störung wird der Endwertsatz der Z-Transformation angewendet [51]. Bei einem vorgegebenen Führungssprung ergibt sich somit, daß die Regelgröße nach unendlich langer Zeit den Wert der Führungsgröße annimmt:

$$\begin{aligned}
 \lim_{k \rightarrow \infty} X(k) &= \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) \cdot W(z) \frac{G_{PI}(z)G_S(z)}{1 + G_{PI}(z)G_S(z)} \\
 &= \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) \cdot \left( \frac{z}{z-1} \right) \frac{\left( \frac{p_{PI1} \cdot z + p_{PI0}}{z-1} \right) \left( \frac{p_{S1} \cdot z + p_{S0}}{z^3 + q_{S2} \cdot z^2 + q_{S1} \cdot z + q_{S0}} \cdot z^{-3} \right)}{1 + \left( \frac{p_{PI1} \cdot z + p_{PI0}}{z-1} \right) \left( \frac{p_{S1} \cdot z + p_{S0}}{z^3 + q_{S2} \cdot z^2 + q_{S1} \cdot z + q_{S0}} \cdot z^{-3} \right)} \quad \text{Gl. 31} \\
 &= \lim_{z \rightarrow 1} z \cdot \frac{(p_{PI1} \cdot z + p_{PI0})(p_{S1} \cdot z + p_{S0})}{(z-1)(z^3 + q_{S2} \cdot z^2 + q_{S1} \cdot z + q_{S0})z^3 + (p_{PI1} \cdot z + p_{PI0})(p_{S1} \cdot z + p_{S0})}
 \end{aligned}$$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} X(k) = 1$$

In gleicher Art kann die Auswirkung einer konstanten, sprunghöhenförmigen Störfunktion  $Z(z)$  auf die Regelgröße mit einer Grenzwertbetrachtung durchgeführt werden. Hierbei wird ein vollständiges Abklingen des Störeinflusses erwartet:

$$\begin{aligned}
 \lim_{k \rightarrow \infty} X(k) &= \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) \cdot Z(z) \frac{1}{1 + G_{PI}(z)G_S(z)} \\
 &= \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) \cdot \left( \frac{z}{z-1} \right) \frac{1}{1 + \left( \frac{p_{PI1} \cdot z + p_{PI0}}{z-1} \right) \left( \frac{p_{S1} \cdot z + p_{S0}}{z^3 + q_{S2} \cdot z^2 + q_{S1} \cdot z + q_{S0}} \cdot z^{-3} \right)} \quad \text{Gl. 32}
 \end{aligned}$$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} X(k) = 0$$

$$= \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) \cdot \frac{z \cdot (z^3 + q_{s2} \cdot z^2 + q_{s1} \cdot z + q_{s0})}{(z^3 + q_{s2} \cdot z^2 + q_{s1} \cdot z + q_{s0})(z-1) + (p_{p11} \cdot z + p_{p10})(p_{s1} \cdot z + p_{s0}) \cdot z^{-3}}$$

Für die Charakterisierung des Verhaltens der Sensorregelung soll neben der Sprungantwort auch das Frequenzverhalten dargestellt werden. Hieraus ist ersichtlich, bei welcher Führungsfunktion, die beispielsweise durch eine gekrümmte Oberfläche mit einer bestimmten zu verfahrenen Bahngeschwindigkeit gegeben ist, sich ein entsprechendes Regelungsverhalten einstellt. So kann der resultierende Schleppfehler ermittelt werden, der sich bei einer stetig steigenden Führungsfunktion als Differenz zwischen dieser und der Regelgröße ergibt. Zur Ermittlung des Frequenzverhaltens wird der Regelung ein sinusförmiges Führungssignal für unterschiedliche Frequenzen eingeprägt und die Regelgröße protokolliert. Der sich ergebende Amplituden- und Phasengang wird in einem Bodediagramm grafisch dargestellt (Bild 72). Zum Vergleich wurde das Frequenzverhalten des Reglers in Verbindung mit dem reduzierten Streckenmodell simuliert und gleichfalls mit angegeben.

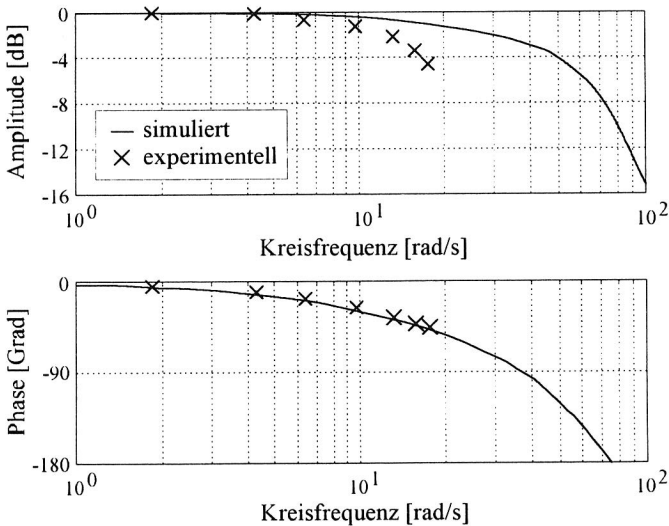


Bild 72: Bodediagramm des geschlossenen Sensorregelkreises

Kennzeichnend ist hierbei, daß sich ein deutlich stärkerer Abfall der Amplitude gegenüber der Phase ergibt. Gleichzeitig besteht eine deutliche Diskrepanz zwischen simuliertem und gemessenen Amplitudengang. Das kann auf dem nichtlinearen Einfluß der Profilgenerierung zurückgeführt werden. Somit ist bei ca. 2 Hz bereits ein Amplitudenabfall von 3,3 dB bei einer Pha-



senverschiebung von  $34^\circ$  zu verzeichnen. Bis zu einer Eckkreisfrequenz von 2 Hz können somit noch befriedigende Ergebnisse beim Einsatz der Sensorregelung in der Fertigung erwartet werden.

Neben sinusförmigen Konturen treten in der Praxis oftmals kontinuierlich verändernde Größen in Form von Anstiegen unter bestimmten Winkeln auf. Diese führen strukturell bedingt zu Schleppfehlern, die sich ihrerseits in einem Versatz zur vorgegebenen Bahn äußern. Zur Untersuchung dieser Verhältnisse wurde der Schleppfehler für verschiedene Bahngeschwindigkeiten und Anstiege durch die Vorgabe eines ansteigenden Führungssignals experimentell ermittelt. Hierbei konnte eine direkte Abhängigkeit des Schleppfehlers von der Bahngeschwindigkeit und dem Anstieg festgestellt werden. So ergab sich für eine Bahngeschwindigkeit von 1,2 m/min, wie sie im Bereich der Lasermaterialbearbeitung typisch ist, bei einer Rampensteigung von  $10^\circ$  eine Bahnabweichung von lediglich 0,2 mm. Somit kann festgestellt werden, daß für prozeßrelevante Verhältnisse eine hinreichende Genauigkeit beim Einsatz von Sensorregelungen in der Fertigung gegeben ist.

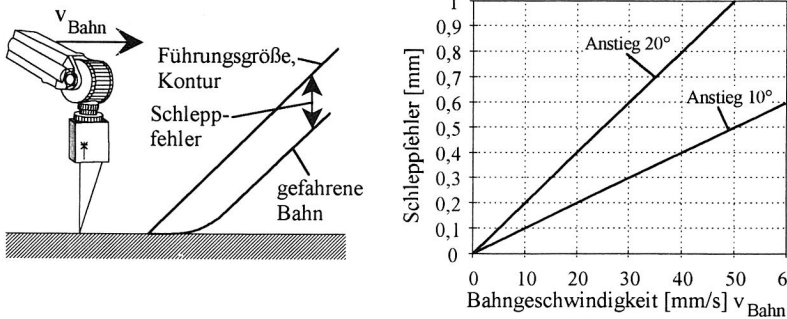


Bild 73: Darstellung des Schleppfehlers bei kontinuierlich ansteigender Führungsgröße

Untersuchungen zum Einsatz der Sensorregelung haben gezeigt, daß eine absolute Bahngenauigkeit von bis zu 0,1 mm erreicht werden kann. Diese Werte zeigen eine wesentliche Verbesserung der bei Industrierobotern vorherrschenden Bahngenauigkeit [97] und verdeutlichen somit die Einsatzfähigkeit einer Sensorregelung für die Erhöhung der Robotergenauigkeit.

### PID-Regler

Als weiterer parameteroptimaler Regler soll ein diskreter PID-Regler für die Sensoradaption an Werkstückkonturen eingesetzt werden. Durch die Hinzunahme eines differentiellen Anteils wird eine Erhöhung der Dynamik des Gesamtsystem erwartet. Die Übertragungsfunktion leitet sich aus einem kontinuierlichen PID-Regelalgorithmus als ein diskretes System zweiter Ordnung ab.

$$G_{\text{PID}}(z) = \frac{p_{\text{PID}2} \cdot z^2 + p_{\text{PID}1} \cdot z + p_{\text{PID}0}}{z^2 - q_{\text{PID}1} \cdot z - q_{\text{PID}0}} \quad \text{Gl. 33}$$

Der Entwurf erfolgt in gleicher Weise wie der des PI-Sensorreglers. Simulative und praktische Untersuchungen zum Verhalten des PID-Reglers ergaben keine wesentliche Verbesserung der dynamischen Eigenschaften für die Sensorregelung. Die Ursache dieses Verhaltens ist in der begrenzenden Wirkung des Profilgenerators begründet, der den Einfluß des D-Anteils fast vollständig unterdrückt. Aus diesem Grund soll an dieser Stelle auf eine weitere Darstellung des Verhaltens des PID-Sensorreglers verzichtet werden.

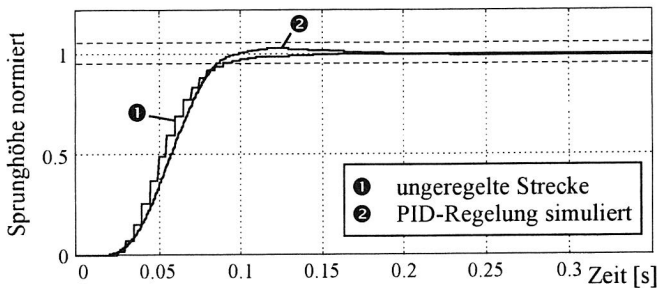


Bild 74: Sprungantwort des PID-Sensorreglers

### 6.2.5 Kraftregelung

Für fertigungstechnische Problemstellungen, bei denen die Vorgabe oder Einhaltung bestimmter Kräfte von wesentlicher Bedeutung ist, soll auf der Basis der zur Verfügung stehenden Eingriffstelle auf Interpolationstaktebene eine Kraftregelung entworfen und untersucht werden. Hierbei ergibt sich, bedingt durch den direkten Kontakt des Greifers mit der Umgebung, eine Erweiterung des für die Abstandsregelung eingesetzten Streckenmodells (Bild 75). Die Elastizität des Roboterarmes und des Greifers sowie die Nachgiebigkeit des Transportbandes und des Werkstücks ergeben zusammen mit der Werkstückmasse ein schwingungsfähiges System zweiter Ordnung. Die Positionsänderungen der Roboterachse bewirken entsprechend der Elastizität eine Kraft auf das Werkstück, die ihrerseits die Position des Objektes ändert.

Das dynamische Verhalten der Regelstrecke wurde ebenfalls mit Hilfe der Sprungantwort identifiziert. Gleichzeitig erfolgte die Ermittlung des Elastizitätsmoduls  $e$ . Hierbei mußte festgestellt werden, daß eine starke Abhängigkeit des dynamischen Verhaltens von der jeweiligen Stellung des Werkstücks auf dem Band und der verwendeten Objektmaterialien zu verzeichnen war. So besteht beispielsweise ein gravierender Unterschied, ob es sich um ein Blech oder einen massiven Metallkörper handelt. Kennzeichnend für das System ist eine relativ geringe

Elastizität, die aus dem auf Positionsgenauigkeit ausgelegten Roboter und dem Verzicht auf zusätzliche Nachgiebigkeit im Kraftsensor oder im Greifer resultiert.

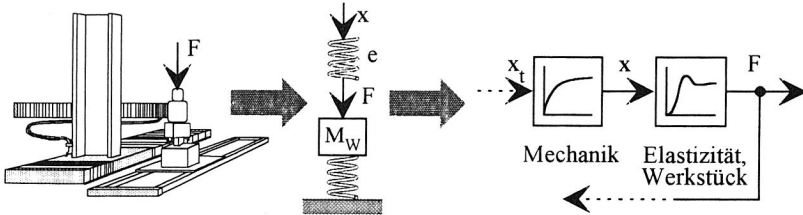


Bild 75: Erweiterung des Streckenmodells für die Kraftregelung

Das Modell der Kraftregelstrecke zeichnet sich durch ein weiteres schwingungsfähiges Übertragungsglied gegenüber der Abstandsregelung aus. Mit einem System sechster Ordnung und einer dreifachen Totzeit konnte eine gute Übereinstimmung mit dem Verhalten der Strecke erzielt werden (Gl. 34). Hierbei zeigte sich eine wesentlich geringere Anschlagzeit von ca. 32 ms gegenüber der für die Abstandsregelung identifizierten Strecke. Das ist dadurch bedingt, daß bereits geringe Wegänderungen große Kräfte hervorrufen. Das schwach gedämpfte System Transportband, Werkstück und Roboterarm führt zu einem Überschwingen von bis 30 % (Bild 76). In die Identifikation wurden nur das Verhalten bis 100 ms einbezogen, da die weitere nicht abklingende Dauerschwingung aus den Ausgleichsbewegungen der Lageregelung resultiert und im Bereich der Auflösung der Wegmeßsysteme liegt.

$$G_{sk}(z) = \frac{p_{SK4} \cdot z^4 + p_{SK3} \cdot z^3 + p_{SK2} \cdot z^2 + p_{SK1} \cdot z + p_{S0}}{z^6 + q_{SK5} \cdot z^5 + q_{SK4} \cdot z^4 + q_{SK3} \cdot z^3 + q_{SK2} \cdot z^2 + q_{SK1} \cdot z + q_{SK0}} \cdot z^{-3} \quad \text{Gl. 34}$$

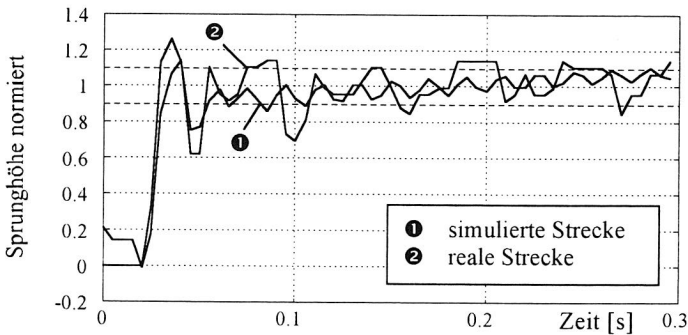


Bild 76: Kraftsprungantwort der Strecke

Für den Regler wurde ein PI-Verhalten (Gl. 30) ausgewählt, um eine Robustheit gegenüber den Störeinflüssen und Parameterunsicherheiten zu gewährleisten. Die entworfene Kraftregelung ist durch eine Anregelzeit von ca. 107 ms und ein asymptotisches Einlaufen in den stationären Endwert charakterisiert (Bild 77). Bedingt durch das begrenzte dynamische Verhalten des Stelleingriffs und somit der Regelung, können die höherfrequenten Störungen nicht ausgeglichen werden.

Hieran können die Grenzen des Einsatzes von Kraftregelungen aufgezeigt werden, die einem Eingriff im Interpolationstakt in das Steuerungssystem des Roboters nutzen. Ein begrenzender Einflußfaktor ist die minimale Auflösung der Meßsysteme und damit die minimal erzielbare Quantisierung der Kraft. Hierbei besteht zudem eine Abhängigkeit von der Elastizität  $e$  (Gl. 35), wobei durch zusätzliche Nachgiebigkeit eine Verbesserung zu erzielen ist.

$$\Delta F_{\min} = e \cdot \Delta x_{\min}$$

Gl. 35

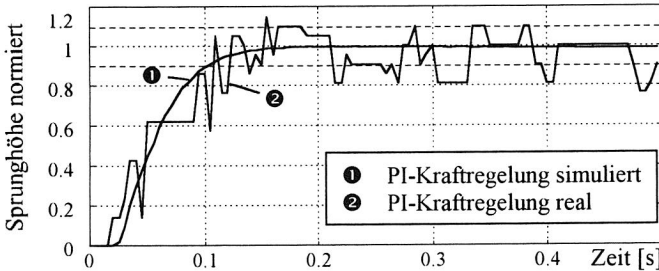


Bild 77: Simulierte und reale Sprungantwort des kraftgeregelten Roboters

Zudem führen die Ausregelvorgänge des Lagereglers zu permanenten Positionsänderungen im Bereich der Meßsystemauflösung und damit zu Kraftschwingungen. Durch die Dynamik der Kraftregelung können derartige Einflüsse nicht ausgeglichen werden. Für eine Kraftregelung hoher Güte ist es aus diesen genannten Gründen erstrebenswert, einen Eingriff der Stellsignale auf Stromreglerebene der einzelnen Achsen vorzunehmen. Diese Möglichkeit ist jedoch in absehbarer Zukunft für industriell eingesetzte Robotern nicht zu erwarten.

### 6.3 Sensorintegrierter Robotergrifer

Zur Realisierung sensor geregelter Vorgänge ist eine geeignete Integration der Sensorik in das Werkzeug des Roboters zu realisieren. Hierbei sollte durch die Sensoren keine Einschränkung in der Funktion und die Erfassung ohne zusätzliche Störgrößen erfolgen. Darüber hinaus ist eine Vorverarbeitung der Daten für die zuverlässige Auswertung anzustreben.

Hiervon ausgehend, wurde ein flexibel positionierbarer Zweifingergreifer entwickelt, in den eine Integration der notwendigen Kraft- und Abstandssensorik erfolgte. Zur Abstandsmessung

dient ein Lasertriangulationssensor. Mit einem 12-Bit-Analog-Digital-Wandlers werden die Signale erfaßt und an eine Robotersteuerung über die Kommunikationsschnittstelle übertragen, wo sie der Sensorregelung als Istwerte zur Verfügung stehen.

Zur Bestimmung von bei Montage- und Handhabungsaufgaben auftretenden Kräften und Momenten ist neben der Messung im Handgelenk mit Kraft-Momenten-Sensoren vor allem die Integration der Sensorik in die Greiferfinger von Interesse. Hierdurch wird eine wesentlich höhere Sensibilität erreicht, da die Einflüsse von Gewichts- und Beschleunigungskräften des Greifers nicht zu berücksichtigen sind. Zu diesem Zweck wurden die Greiferfinger als jeweils zwei im rechten Winkel angeordnete Biegebalken gestaltet, deren Verformung bei Krafteinwirkung mittels einer Dehnmeßstreifen-Vollbrücke (DMS) ermittelt wird (Bild 78).

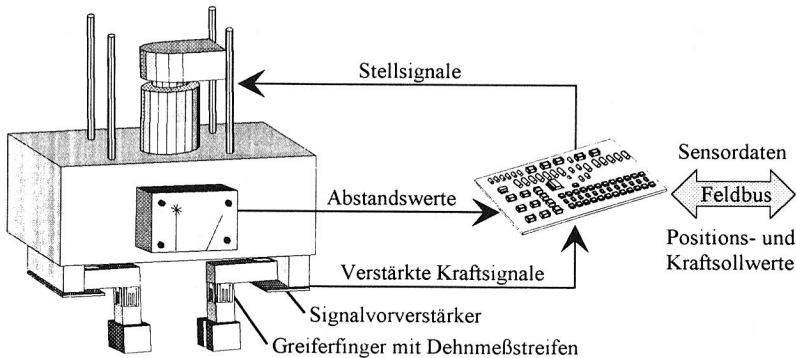


Bild 78: Aufbau des sensorischen Zweifingergreifers

Die Ansteuerung des Greifers und die Erfassung der Meßwerte erfolgt über einen eigenen Mikroprozessor, der über interne Analog-Digital-Wandler die Signale der Dehnmeßstreifen und mit einem Zähler die Impulse der Positionssensoren erfassen kann. Diese Daten werden über die Schnittstelle einer Robotersteuerung zur Verfügung gestellt und können auch für die auf dem Mikroprozessor realisierte Positions- und Greifkraftregelung genutzt werden. Diese wird auf der Basis des in Kapitel 5.4 realisierten Echtzeitbetriebsystems digital mit einer Abtastrate von 2 ms ausgeführt. Die Positionierung der Backen erfolgt durch eine kaskadierte Lage- und Geschwindigkeitsregelung entsprechend der von einer Steuerung vorgegebenen Sollwerte. Bei Auftreten einer Kraft oder einer ausschließlich kraftgeregelten Greifersteuerung wird die integrierte Kraftregelung anstelle der Positionsregelung aktiviert.

Die gewählte Anordnung der sechs Kraftsensoren an den Greiferfingern ermöglicht die Erfassung der räumlichen Kräfte und Momente. Da diese sich nicht unmittelbar aus den Spannungswerten der DMS-Brücken (D1-D6) ergeben, ist hierzu eine Transformation in ein objektbezogenes Koordinatensystem notwendig (Bild 79). Dieses befindet sich zwischen den beiden Greiferfingern und kann bezüglich der Koordinaten  $y$  und  $z$  verschoben sein.

Hierzu wird ein fingerspezifisches Koordinatensystem eingeführt, welches zur Darstellung der auf die Finger einwirkenden Kräfte dient und mit Hilfe einer Koppelmatrix aus den Spannungen der einzelnen DMS-Brücken bestimmt werden kann (Gl. 36).

$$\begin{bmatrix} U_{D1} \\ U_{D2} \\ U_{D3} \end{bmatrix} = \underline{K}_l \cdot \underline{F} = \begin{bmatrix} \mu_{11l} & 0 & \mu_{13l} \\ \mu_{21l} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{32l} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{xl} \\ F_{yl} \\ F_{zl} \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} U_{D4} \\ U_{D5} \\ U_{D6} \end{bmatrix} = \underline{K}_r \cdot \underline{F} = \begin{bmatrix} \mu_{11r} & 0 & \mu_{13r} \\ \mu_{21r} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{32r} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{xr} \\ F_{yr} \\ F_{zr} \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 36}$$

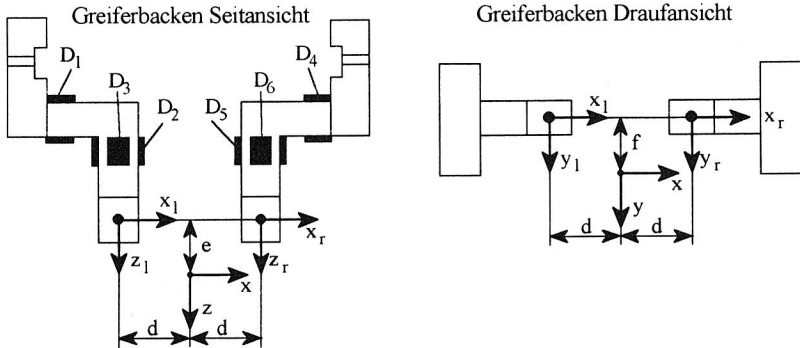


Bild 79: Kinematische Beziehungen am Greifer

Ausgehend von diesen Fingerkräften können mit Hilfe der Transformationsmatrix  $\underline{T}$  die auf ein gegriffenes Objekt einwirkenden Kräfte und Momente bestimmt werden (Gl. 37).

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \underline{T} \cdot \begin{bmatrix} F_l \\ F_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & e & -f & 0 & e & -f \\ -e & 0 & d & -e & 0 & -d \\ f & -d & 0 & f & d & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{xl} \\ F_{yl} \\ F_{zl} \\ F_{xr} \\ F_{yr} \\ F_{zr} \end{bmatrix}; \quad \underline{K} = \begin{bmatrix} \underline{K}_l & 0 \\ 0 & \underline{K}_r \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 37}$$

Ersetzt man die Fingerkräfte durch die gemessenen Spannungen, so ergibt sich unmittelbar nachfolgende Beziehung:

$$\begin{bmatrix} \underline{F} \\ \underline{M} \end{bmatrix} = \underline{T} \cdot \underline{K}^{-1} \cdot \underline{U}_D \quad \text{Gl. 38}$$

Die so ermittelten Kräfte und Momente können für die Realisierung einer kraft-/momentengeführten Bewegung dienen. Hierzu stehen sie bereits in einem spezifischen Koordinatensystem zur Verfügung, wodurch es keiner weiteren Transformationsoperationen bedarf.

## **7 Integrierte Sensorsysteme zur Prozeß- und Bewegungsführung**

Für flexibel automatisierte Fertigungsanlagen werden leistungsfähige und wirtschaftliche Sensorsysteme benötigt, die in der Lage sind, Anwesenheit und Formen von Werkstücken in der Fertigung zu bestimmen oder die Steuerung von Geräten zu übernehmen. Auf der Grundlage einer Entfernungsbestimmung mit Laserstrahl wird ein Sensorsystem entwickelt, welches diese Anforderungen erfüllt. Die Leistungsmerkmale und die Integrationsaspekte eines solchen Sensors werden hierfür dargestellt. Für Fertigungstechnologien, bei denen eine In-Prozeß-Messung von geometrischen Größen erforderlich ist, werden Profil- und Matrixinformationen liefernde Sensoren konzipiert. Diese Sensoren beruhen auf einfachen physikalischen Prinzipien und ihre Leistungsfähigkeit gliedert sich zwischen einfachen Sensoren und komplexen Sensorsystemen ein. Um die geforderten anwendungsspezifischen Informationen aus diesen Sensoren gewinnen zu können, ist eine intelligente Datenauswertung notwendig, die die Datenströme möglichst universell konfigurierbar verarbeiten und sie dem Anwender anschließend in geeigneter Art und Weise zur Verfügung stellen kann.

### **7.1 Zielsetzung komplexer Sensorsysteme**

#### **7.1.1 Klassifikation von Sensoren in der Produktion**

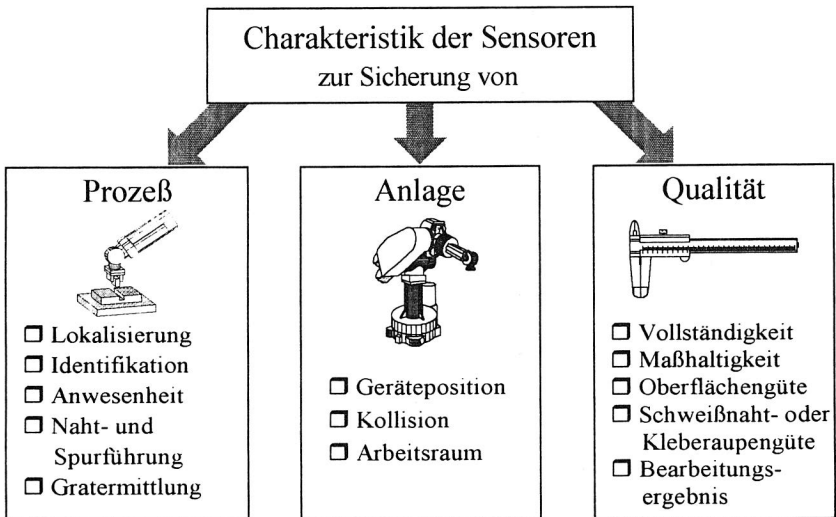
Für fortschrittliche, flexibel automatisierte Fertigungssysteme sind leistungsfähige Sensorsysteme von elementarer Bedeutung. Die Sensortechnik besitzt hier eine Hebefunktion, da Fortschritte auf diesem Gebiet eine deutliche Weiterentwicklung innerhalb der Automatisierungstechnik bedeuten. Beim Übergang von der manuellen zur automatisierten Fertigung ist es notwendig, die im Prozeß anfallenden Parameter mit Hilfe von Sensoren zu erfassen und den Steuerungen zur Verfügung zu stellen. Nur durch zuverlässig gewonnene Meßwerte kann eine geeignete Reaktion auf den Prozeß erreicht werden. Jedoch ist festzustellen, daß die Erwartungen der Anwender an eine leistungsfähige Sensorik bisher nur begrenzt erfüllt werden konnten [28].

Derzeit stehen für Gerätesteuern der Fertigung leistungsfähige Rechnerarchitekturen zur Verfügung. Ohne geeignete Sensorik stellen diese allerdings ein Gehirn ohne Sinnesorgane dar [13]. Ziel muß es daher sein, intelligente Sensorsysteme zu schaffen, die mehr als nur binäre Informationen gewinnen können. Von einem intelligenten Sensorsystem wird erwartet, daß hier Signalerfassung, -verarbeitung und -bereitstellung auf einem hohen Niveau in einer Einheit integriert sind. Für die leistungsfähige Verarbeitung der Daten werden überwiegend Mikroprozessoren eingesetzt, wobei gefordert wird, daß nicht für jeden Sensortyp ein eigenständiges Softwaresystem geschaffen werden muß.

An Sensoren, die den Anforderungen der Fertigung genügen, werden nachfolgend genannte Erwartungen gestellt:

- direkte Aufnahme der im Prozeß zu erfassenden Größen,
- Robustheit und Zuverlässigkeit gegenüber Störungen,
- integrierte Signalvorverarbeitung,
- Konfigurationsfähigkeit durch den Anwender,
- Bereitstellung geeigneter Schnittstellen (möglichst Feldbusanschluß),
- Kostengünstig.

In der automatisierten Fertigung kann der Einsatz von Sensoren nach den Gesichtspunkten der Sicherung von Prozeß, Anlage und Qualität qualifiziert werden. Im Fertigungsprozeß treten Probleme des Erkennens der Beschaffenheit von Werkstücken, deren Identifikation und Lokalisierung auf. Mit Hilfe leistungsfähiger Sensoren kann eine On-line-Prozeßführung erfolgen, wie beispielsweise die Nahterkennung beim Schweißen oder die Gratdetektion beim Entgraten. Hierbei werden hohe Anforderungen an das schnelle Bereitstellen der Sensoreninformationen gestellt, da diese Daten direkten Einfluß auf den Bewegungsablauf nehmen. Die Auswertung dieser großen Informationsmengen erfordert eine hohe Leistungsfähigkeit des Sensordatenverarbeitungssystems.



*Bild 80: Einsatzfelder von Sensoren in der Fertigung*

Eine Sicherung der Anlage durch den Einsatz von Sensorik ermöglicht es, unvorhergesehene Situationen, wie Überlastungen oder Kollisionsgefahren, zu erkennen und diesen entsprechend zu begegnen. Darüber hinaus sind Sensoren direkt zur Steuerung und Positionsbestimmung der



Geräte einer Fertigungszelle einzusetzen. Hierfür ist eine hohe Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Meßdaten Voraussetzung.

Eine immer höhere Bedeutung für automatisierte Produktionsanlagen gewinnt die Sicherung und Überwachung der Qualitätsparameter innerhalb des Prozesses. Dies ist durch die Einhaltung der qualitätsbestimmenden Parameter bei der Fertigung und durch eine in den Fertigungsablauf integrierte Qualitätskontrolle zu erreichen. Parameter, wie vollständige Montage und korrekte Positionierung der Bauteile, Maßhaltigkeit von geometrischen Größen aber auch die exakte Ausführung einer Schweißnaht oder einer Klebe- oder Dichtraupe sind hierbei von Bedeutung. Die durchzuführenden Messungen erfordern Systeme, die Informationen über mehrere Dimensionen, wie beispielsweise Profile oder Oberflächen, liefern. Bei diesen Aufgaben wird die Genauigkeit der Messung als wesentlich beachtet, wohingegen die zeitlichen Anforderungen eher in den Hintergrund treten.

### 7.1.2 Prinzipien von zwei- und dreidimensional abstandsmessenden Sensoren

In der industriellen Praxis ist zu verzeichnen, daß mit zunehmender Komplexität der Erfassung geometrischer Größen eine zusehends geringere Anzahl geeigneter Sensorsysteme zur Verfügung steht. So sind zur Ermittlung von Oberflächenstrukturen oftmals auf taktilem Prinzip beruhende Meßmaschinen erforderlich. Die Mehrzahl der Sensoranwendungen zur Ermittlung eines Größenparameters oder zur reinen Anwesenheitskontrolle beruht überwiegend auf der Bestimmung des Abstandes zu einem Objekt. Einsatz finden hierbei neben optischen auch induktive, kapazitive und ultraschallbasierte Sensorprinzipien [27].

Besteht die Notwendigkeit zweidimensionale Kenngrößen in der Fertigung zu ermitteln, so werden hier besonders auf optischem Prinzip beruhende Sensorsysteme eingesetzt. Bestimmend für dieses Verfahren ist eine höhere absolute Meßgenauigkeit, ein größerer Meßbereich, die größere mögliche Entfernung zum Objekt und eine reduzierte Störfähigkeit. Durch den Einsatz moderner, auf CCD-Technik beruhender Kamerasysteme ist eine Erfassung von Konturen und Formen möglich. Somit basieren vielfältige Sensoranwendungen auf derartigen Bildverarbeitungssystemen (BV-System), wie zum Beispiel die Bestimmung von Werkstückkonturen, die Anwesenheitsüberwachung, die Lagebestimmung beim robotergestützten Greifen oder die Maßhaltigkeit von Teilen [134].

Durch den Einsatz einer zusätzlichen linienförmigen Beleuchtung können Schnittkonturen gewonnen werden. Diese zweidimensionale Sensorsysteme werden beim Schweißen, beim Entgraten oder der Messung von Nuten und Spalten eingesetzt. Für ein ähnliches Anwendungsspektrum bestehen Sensorlösungen, die mit Hilfe geeigneter Ablenkspiegel nach dem Lasertriangulationsprinzip Profile abtasten können. Hierbei wird der Laserstrahl abgelenkt und der reflektierte Strahl gelangt über einen in gleicher Richtung positionierten Spiegel auf das Empfangselement zurück. Diese Sensoren erzielen hohe Genauigkeiten bei einer geringen Störfähigkeit gegenüber wechselnden Reflexeigenschaften [27].

Für die Bestimmung von Konturen im Nahbereich von metallischen Objekten wurde ein auf dem Wirbelstromeffekt beruhender Sensor entwickelt [11]. Hierbei handelt es sich um ein integriertes Bauelement, das vor allem für die Prüfung von Oberflächenstrukturen geeignet ist. Der Sensor ist jedoch derzeit noch nicht verfügbar.

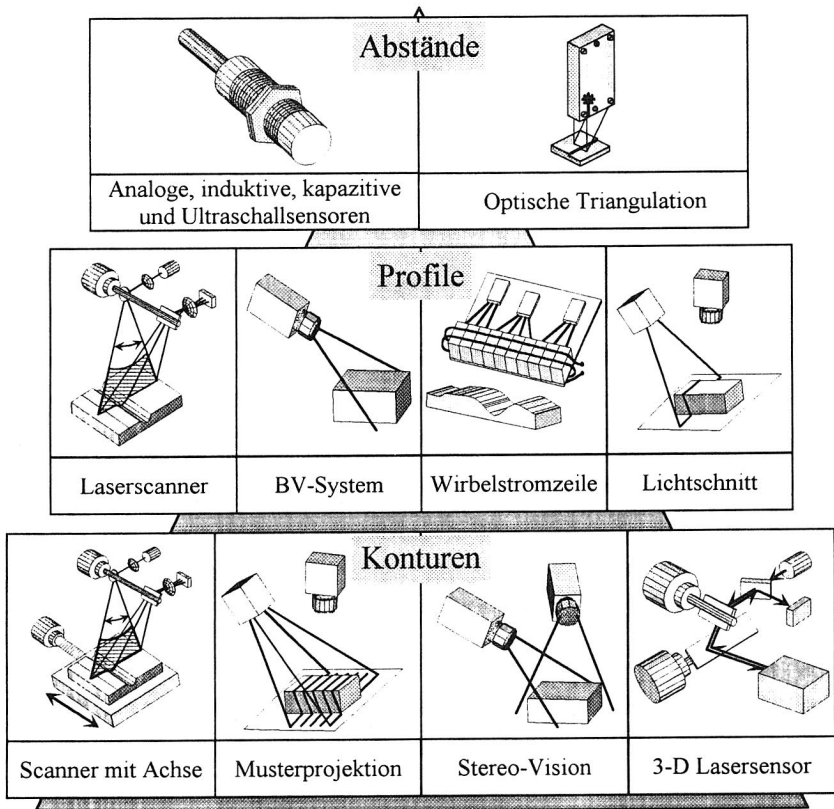


Bild 81: Sensorprinzipien für mehrdimensionale Objekterkennung

Eine besonders anspruchsvolle Aufgabenstellung ergibt sich bei der Ermittlung geometrischer Größen von Oberflächen oder räumlich angeordneten Meßpunkten mittels optischer Sensorsysteme. Durch die Erweiterung des bereits erwähnten Laserscanners um eine zusätzliche Linearachse können Oberflächen von geringen räumlichen Abmessungen genau bestimmt werden. Wird für ein Sensorsystem nach dem Lichtschnittverfahren eine strukturierte Beleuchtung eingesetzt, ist es möglich, räumliche Konturen zu ermitteln. Einsatz findet dieses Prinzip beispielsweise zur Nahtführung beim Laserstrahlschweißen [47]. Dem menschlichen Sehvermögen nachempfunden sind BV-Systeme, bei denen zwei Kameras örtlich versetzt angeordnet sind.

Durch die unterschiedlichen Ansichten lassen sich Größen und Formen ermitteln, wobei genaue Meßwerte allerdings nur bedingt zu erreichen sind [73].

Sollen im Raum einzelne Meßpunkte bestimmt werden, so kann ein Laserstrahl in zwei Richtungen abgelenkt und der Reflexionsstrahl ausgewertet werden [62]. Hierbei ist sowohl die Bestimmung einzelner Punkte als auch die Identifikation von Oberflächengeometrien mit einer bestimmten Granularität möglich. Eine solche Messung kann in der Fertigungstechnik genutzt werden, um Werkstückoberflächen auf ihre Qualität hin zu überprüfen, Teile auf Anwesenheit und Art zu testen und die Steuerung von Montageeinrichtungen oder die Führung fahrerloser Transportsysteme zu ermöglichen. Die Nutzung eines derartigen Sensorsystems wurde in [127] zur Kollisionsvermeidung vorgeschlagen. Der Einsatz des Lasersensors ist darüber hinaus in vielfältigen technischen Bereichen, wie der Servicerobotik, der Gebäudetechnik oder der Warenkontrolle möglich.

## 7.2 Flexibler Lasersensor zur Objektbestimmung

### 7.2.1 Konzeption und Aufbau des Sensors

Wie bereits festgestellt wurde, ist die räumliche Bestimmung von geometrischen Größen, wie Abstände und Oberflächen, ein Problem, dessen Lösung vielfältige Anwendung in der Fertigungstechnik finden kann. Aus diesem Grund soll hier die Entwicklung eines Sensors dargestellt werden, der Abstände punktweise in einem bestimmten Raum vermessen kann. Zielsetzung der Arbeit war es, ein Sensorsystem zu schaffen, welches durch eine dreidimensionale Messung von Entfernungen Informationen von Einzelobjekten sowie darüber hinaus Konturinformationen über Oberflächen ermitteln kann und gleichzeitig eine Integration in eine Fertigungsumgebung gewährleistet [115].

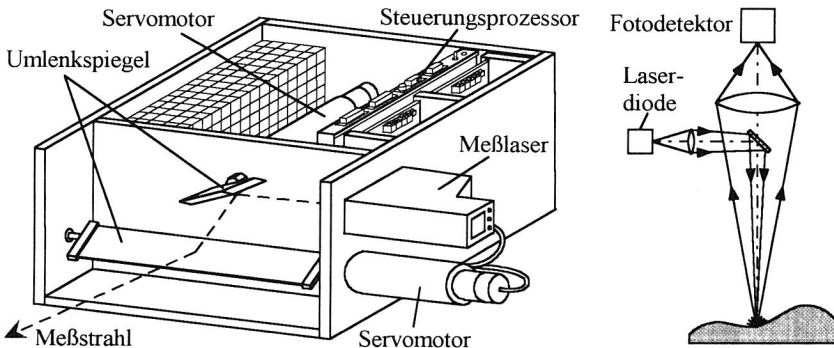


Bild 82: Aufbau des Lasersensors und Funktionsprinzip des Meßlasers

Bei einer vergleichbaren Entwicklung mit der Zielsetzung des Einsatzes in der Fertigung [62] erfolgte ausschließlich eine Intensitätsauswertung des gemessenen Signals und keine direkte Entfernungsbestimmung, was jedoch für vielfältige Anwendungen von wesentlicher Bedeutung ist. Weitere Arbeiten [15, 46] hatten vornehmlich das Ziel, dreidimensionale Oberflächen von Objekten ähnlich einer Digitalisierung aufzunehmen. Die Vermessung von Einzelpunkten und der Einsatz in der Fertigung standen dabei nicht im Vordergrund.

Als sensorisches Meßprinzip für den Lasersensor wurde die Messung der Entfernung als Funktion der Lichtlaufzeit, beruhend auf einem Phasenvergleichsverfahren, gewählt [27]. Zur Messung wird ein speziell intensitätsmodulierter und gebündelter Laserstrahl ausgesandt und auf der Oberfläche des Objektes reflektiert. Zwischen diesem reflektierten Strahl und einem Referenzstrahl erfolgt zur Auswertung ein Phasenvergleich. Die sich ergebende Phasenverschiebung  $\varphi$  ist zusammen mit der Modulationsfrequenz  $f$  und der Lichtgeschwindigkeit  $c$  ein Maß für die Entfernung  $l_0$  zwischen Sensor und zu vermessenden Objekt.

$$l_0 = \frac{\varphi \cdot c}{4\pi f} \quad \text{Gl. 39}$$

Die Modulationsfrequenz  $f$  ist abhängig vom gewünschten Meßbereich, da die Phasendifferenz nur modulo  $2\pi$  meßbar ist und somit der erreichbare Meßabstand der halben Modulationswellenlänge entspricht. Dieses Meßverfahren zeichnet sich durch eine hohe Unabhängigkeit gegenüber verschiedenen Reflexionseigenschaften der Oberflächen aus. Als Lasermeßkopf kam ein kompakter, kommerziell verfügbarer Laserabstandssensor zum Einsatz, der die Funktionen der Laserlichtquelle, des Phasenvergleiches und der Auswertung in sich vereint [123]. Die Meßwerte können über eine serielle Schnittstelle abgegriffen werden.

Um eine räumlichen Messung zu ermöglichen, wurden drehbare Spiegel rechtwinklig zur Strahlachse angeordnet (Bild 82). Sie lenken den Meßstrahl um jeweils  $50^\circ$  von der Mittenstellung ab. Bei größeren Winkelstellung entsteht ein spitzer Winkel zwischen Strahl und Spiegel, der zu einer zu geringen reflektierten Lichtmenge führen würde. Die Positionierung der Spiegel erfolgt durch Gleichstromservomotoren, wobei aus Gründen der Dynamik und der Spielfreiheit ein Direktantrieb ohne zusätzliche Getriebe eingesetzt wurde.

Diese und weitere Komponenten des Lasersensors, wie Servoverstärker, Steuerung und Stromversorgung, wurden in einem kompakten Gehäuse untergebracht, um somit eine Stabilität des Sensors zu erreichen und Schwingungen durch die Antriebe der Spiegel zu vermeiden. Ein derart abgeschlossener Sensor ist geeignet, in unterschiedliche Anwendungsumgebungen integriert zu werden.

Das Sensorsystem benötigt für die Durchführung der Koordinations- und Meßaufgaben einen eigenen Steuerungsprozessor (Bild 83). Dieser übernimmt die Koordination zwischen Spiegelpositionierung und Meßeinrichtung und die Übermittlung der Meßwerte an einen Hostrechner. Die Verbindung zwischen Lasersensor und Hostrechner erfolgt über einen Feldbusan-

schluß, wodurch eine gleichzeitige Verbindung zu mehreren Rechnern ermöglicht wird. Ein definiertes Protokoll gewährleistet einen komfortablen Austausch von Befehlen und Daten.

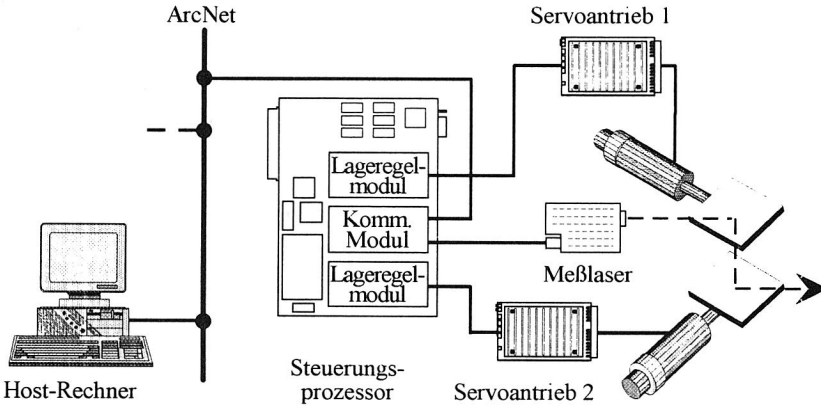


Bild 83: Steuerungsstruktur des Lasersensors

Die eigentliche Messung wird durch Befehle des Host an den Sensor ausgelöst. Der Steuerungsprozessor des Sensors analysiert diesen und führt die Positionierung der Spiegel durch. Die Ansteuerung der Servoantriebe erfolgt mit Hilfe hardwaredrealisierter Lageregelmodule, wie sie für die Steuerung der kooperierenden Roboter Einsatz fanden (Kap. 5.2.3). Die Winkelauflösung beträgt dabei  $0,03^\circ$ , was einer Genauigkeit von ca. 1 mm in 2 m Entfernung entspricht. Für kleine Winkeländerungen von bis  $3^\circ$  können Positionierzeiten von ca. 25 ms erreicht werden. Anschließend wird der Entfernungswert des Lasermeßkopfes übernommen und an den anfordernden Rechner übergeben. Sollen Flächen punktwise aufgenommen werden, so wird der Vorgang mehrmals wiederholt, und die Daten werden als Paket übertragen.

## 7.2.2 Meß- und Auswerteverfahren

Neben den rein technischen Parametern sind die dem Anwender zur Verfügung stehenden Meßfunktionen von wesentlicher Bedeutung für den leistungsfähigen Einsatz des Sensors. Grundsätzlich ist der Sensor in der Lage, einzelne Punkte zu vermessen oder eine Oberfläche abzutasten. Jede Messung wird durch einen Befehl initiiert, den der Lasersensor mit den gemessenen Daten quittiert. Dieser beinhaltet den Meßmodus und die Punkte oder den Bereich, in dem die Messung erfolgen soll.

Gegenüber der Einzelpunktmessung, bei der die Richtung des Meßstrahls im Raum fest vorgegeben ist, kann beim Scanbetrieb ein Bereich angegeben werden. Dieser wird durch den Start- und Endpunkt und der gewünschten Schrittweite definiert. Zur Erhöhung der Genauigkeit der Messung ist es noch möglich, eine Mittelwertbildung des Meßwertes über mehrere Messungen

durchzuführen, wozu an einem Punkt mehrmals die Entfernung bestimmt wird. Dies bedingt zwar eine höhere Meßzeit, aber gleichzeitig eine höhere Meßsicherheit.

Die Vorgabe der Punkte oder Bereiche im Raum kann auf zwei unterschiedlichen Arten erfolgen (Bild 84). Grundsätzlich können die vom Sensor einzustellenden Winkel vorgegeben werden. Andererseits besteht die Möglichkeit, durch die Vorgabe von kartesischen Koordinaten Messungen durchzuführen. Hierbei wird eine ebene Bezugsfläche parallel zur Sensorvorderseite angenommen, die einen bestimmten Grundabstand zum Sensor hat. Dies kann beispielsweise eine Montagestation sein, über der der Sensor angebracht ist. Auf dieser Fläche wird der gewünschte Meßpunkt in  $x/y$ -Koordinaten angegeben. Diese Punktvorgabe ist sehr viel anschaulicher und einfacher zu realisieren als die der Vorgabe von Winkelstellungen.

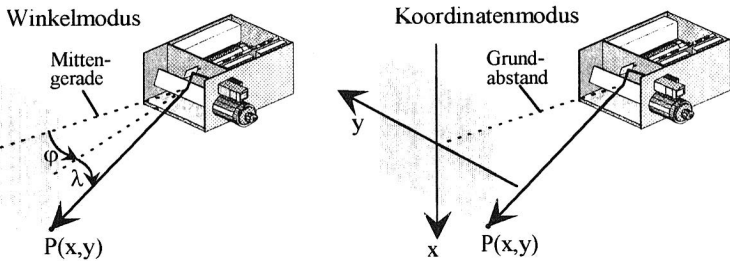


Bild 84: Meßprinzipien des Sensors

Kennzeichnende Leistungsmerkmale für den Lasersensor sind eine Meßauflösung von einem Millimeter und eine Meßrate des Lasermeßkopfes von 25 ms. Durch den Einsatz verbesserter Meßköpfe ist prinzipbedingt eine Meßrate von ca.  $10 \mu\text{s}$  zu erreichen [27]. Vom Sensor wird ein Meßvolumen in Form einer Pyramide mit einem Öffnungswinkel von  $100^\circ$  und einer Höhe von 2 m aufgespannt. Innerhalb dieser sind Abstandsmessungen von beliebigen Objekten mit einem ausreichenden Reflexionsvermögen möglich. Der Meßfleckdurchmesser beträgt in 2 m Entfernung 3 mm. Auf Grund der Meßzeit des Lasermeßkopfes von 25 ms ist eine theoretische Meßrate des Systems von bis zu 20 Messungen/s möglich. Diese resultiert daraus, daß ein Zyklus für die Positionierung der Spiegel und einer für die eigentliche Messung benötigt wird. Voraussetzung für den Einsatz des Sensors ist eine freie Zugänglichkeit der zu messenden Teile.

Zur Bedienung des Sensors und zur Durchführung von Messungen wurde ein entsprechendes Steuerungsprogramm unter MS-Windows erstellt. Dieses bietet die Möglichkeit, die verschiedenen Meßmodi des Sensors auszuwählen und die Ergebnisse darzustellen (Bild 85). Durch die Gestaltung spezifischer Menüs können die jeweiligen Vorgabewerte für die unterschiedlichen Meßmöglichkeiten des Sensors angegeben werden. Es erfolgt hierbei eine Überprüfung der Korrektheit und Plausibilität der vom Bediener eingegebenen Werte. Gleichzeitig dient dieses

Programm der Einführung in die Funktionen und die Bedienung des Sensors. Hierzu stehen entsprechende Hilfetexte, Darstellungen des Aufbaus und beispielhafte Eingabemöglichkeiten für die unterschiedlichen Meßmodi zur Verfügung.

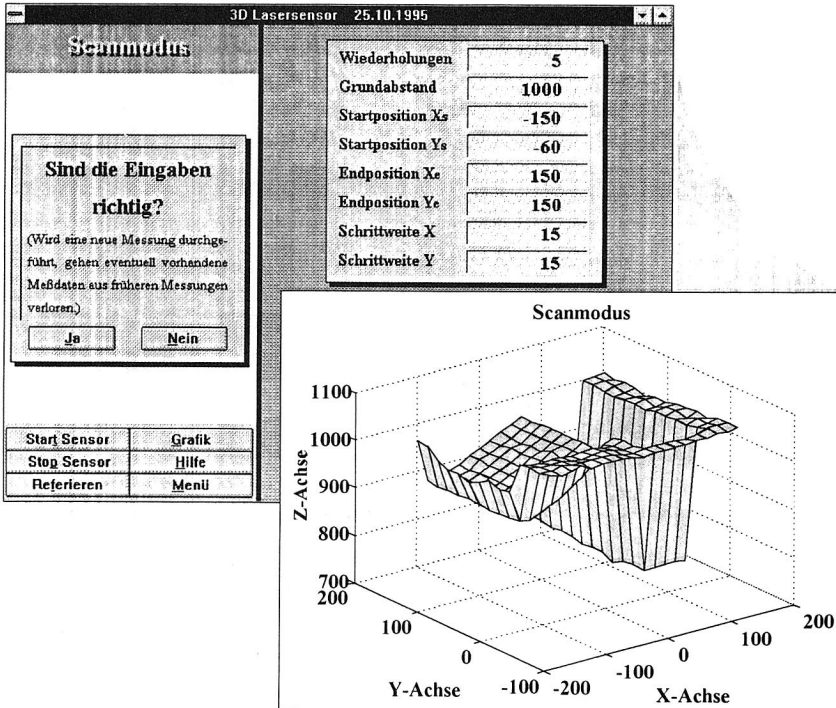


Bild 85: Bestimmung einer Objektoberfläche

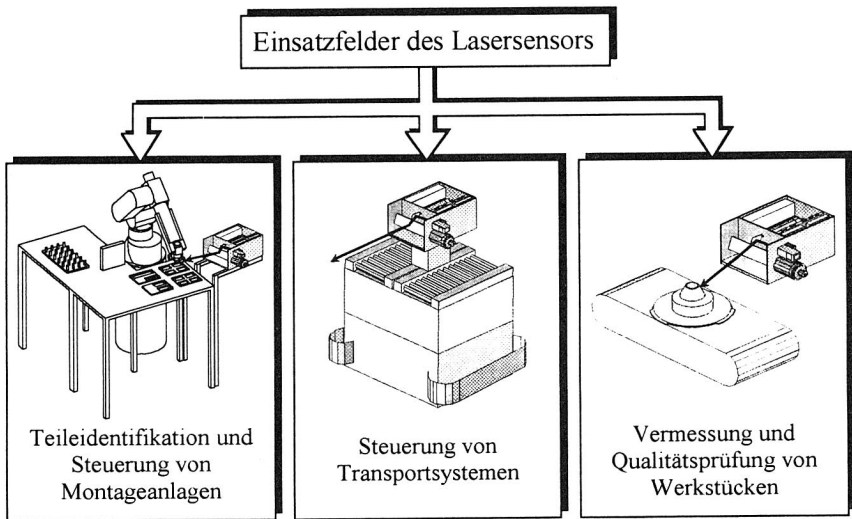
### 7.2.3 Einsatzaspekte des flexiblen Lasersensor

Ausgehend von den Leistungsmerkmalen des Sensors lassen sich vielfältige Anwendungsmöglichkeiten in der Fertigung sowie in verschiedenen weiteren Bereichen ableiten. An dieser Stelle sollen drei Anwendungsfelder aufgezeigt werden, für die der Einsatz des Lasersensors besondere Relevanz besitzt (Bild 86). Hierbei ergeben sich neben der Verbesserung bisheriger Lösungen neue Felder des Sensoreinsatzes.

Innerhalb flexibler Montagezellen bestehen vielfältige Aufgaben, wie die Bereitstellung der Teile, in den Zuführungen zu erkennen, die Lage der Montagegeräte festzustellen und die erfolgreiche Montage zu überprüfen. Wird der Sensor geeignet in der Montagezelle angeordnet, so ist es möglich, viele einzelne binäre Sensoren mit entsprechend aufwendigen Vorrich-

tungen und Halterungen zu ersetzen. Durch Entfernungsbestimmungen an definierten Punkten können sowohl Werkstücke auf ihr Vorhandensein als auch die Stellung der Montagegeräte festgestellt werden. Die Inbetriebnahme einer solchen Anlage kann zudem wesentlich effizienter durchgeführt werden, da ein großer Teil des Montage- und Installationsaufwandes entfällt. Besonders nachträgliche Änderungen und Erweiterungen der Zelle können effizient durch Umprogrammieren des Sensors vorgenommen werden. Gleichzeitig ist ein komfortabler Anschluß an die Steuerung einer Zelle durch eine offene Kommunikationsschnittstelle gegeben.

Neue Führungsstrategien von fahrerlosen Transportsystemen sind gekennzeichnet durch eine freie Navigation innerhalb der Fertigung ohne vorher installierte Spurführungen. Hierbei ist es erforderlich, die Umgebung des Fahrzeugs zu ermitteln und mit der internen Topographie zu vergleichen, um daraus den gewünschten Kurs zu bestimmen. Ein auf dem Fahrzeug montierter Lasersensor kann die Umgebung räumlich erfassen und diese Werte an die Steuerung zur weiteren Verarbeitung übergeben [62]. Neben der Wegsuche kann der Sensor gleichzeitig zur Ermittlung der exakten Andockposition und zur Kollisionsüberwachung eingesetzt werden.

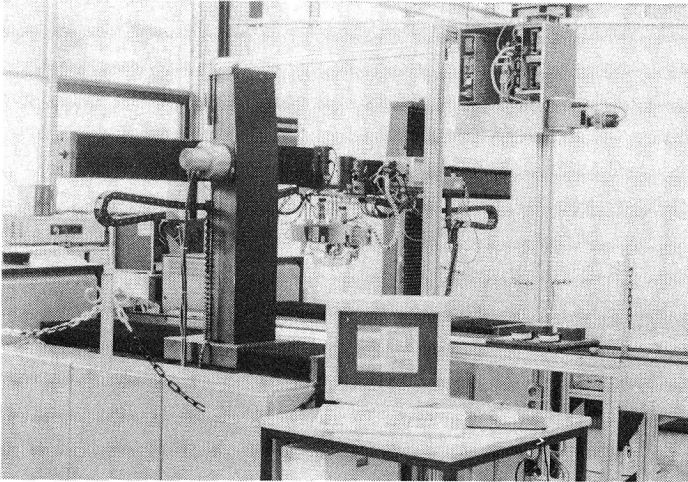


*Bild 86: Anwendungsmöglichkeiten des Sensors in der Fertigungsautomatisierung*

Besonders die Eigenschaft des Sensors zum Scannen von Flächen kommt zum Tragen, wenn Werkstücke in ihrer Geometrie erkannt oder deren Form auf Einhaltung der Qualitätsparameter untersucht werden muß. Die so aufgenommenen dreidimensionalen Bilder lassen sich beispielsweise bei der Blechbearbeitung zur Qualitätskontrolle einsetzen. Ebenfalls ist ein Einsatz des Sensors in Verbindung mit einem Bildverarbeitungssystem möglich, indem Entfernungswerte von interessierenden Punkten aufgenommen werden und die Daten des BV-Systems



ergänzen. Eine einfache Untersuchung von Teilen ist somit möglich, ohne einen hohen Aufwand in ein 3-D-Bildverarbeitungssystem zu investieren.



*Bild 87: Einsatz des Lasersensors in der Versuchumgebung*

### **7.3 Mehrdimensionale Abstands- und Kraftdetektion mit klassischen Sensorprinzipien**

Für verschiedenste Fertigungstechnologien mit Industrierobotern, wie z.B. der Laserstrahlbearbeitung, dem Bahnschweißen und dem Aufbringen von Klebe- oder Dichtstoffen sind Sensoren zur On-line-Prozeßführung und -überwachung erforderlich. Zur Erfassung geometrischer Oberflächeninformationen des Werkstücks werden Profilsensoren benötigt, die kostengünstig und robust gegen vielfältige äußere Störeinflüsse sind. Die bisher eingesetzten Systeme, überwiegend auf der Basis der Bildverarbeitung, sind oftmals durch einen erheblichen Investitionsaufwand gekennzeichnet. Davon ausgehend wurden Sensoren konzipiert, die durch eine zeilenförmige Anordnung von mehreren einfachen analogen Sensoren nach dem optischen, induktiven und kapazitiven Meßprinzip Informationen über Werkstückprofile gewinnen [116]. Die Profile werden hierbei durch mehrere einzelne Abstandswerte bestimmt. Je nach beabsichtigter Anwendung kann der entsprechende Sensortyp genutzt werden. Die Sensoren sollten kompakt gebaut sein, um das Werkzeug nicht wesentlich zu vergrößern und um die Zugänglichkeit am Werkstück an engen Geometrien zu ermöglichen.

Des weiteren besteht beispielsweise beim Greifen die Aufgabe, die auftretenden Kräfte zu ermitteln und die Position des Werkstücks im Greifer zu bestimmen. Hierzu soll der Aufbau

eines entsprechenden Kraftsensensors auf der Basis einer matrixförmigen Anordnung von Piezo-detektoren dargestellt werden.

### 7.3.1 Optischer Triangulationssensor

Abstandssensoren, die auf dem Prinzip der optischen Triangulation beruhen, weisen eine hohe Genauigkeit und eine geringe Stömpfindlichkeit gegenüber unterschiedlichen Reflexionseigenschaften der Materialien auf. Ihr Anwendungsfeld erstreckt sich über Bereiche mit Entfernungen von wenigen Zentimetern bis zu ca. 20 Zentimetern. Eine für den Aufbau der Zeilensensoren geeignete Bauform besteht aus drei Lichtleitern, von denen einer zum Aussenden des Lichtes und zwei für den Empfang des reflektierten Lichtes genutzt werden [77]. Das Meßprinzip beruht auf einer unterschiedlich starken Beleuchtung beider Lichtleiter in Abhängigkeit der Entfernung zu einem Objekt (Bild 88). Verfügbar sind derartige Sensoren bisher allerdings nur als Abstandstaster. Für den Aufbau einer zeilenförmigen Anordnung ist besonders die Möglichkeit der Gestaltung kleiner Meßköpfe durch den Einsatz von Lichtleitern von Interesse.

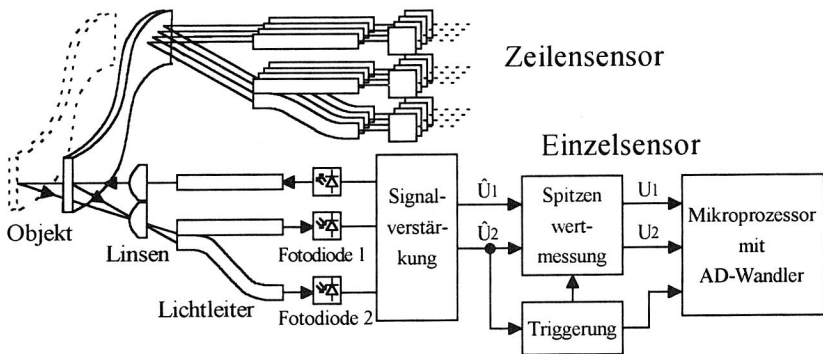


Bild 88: Optischer Triangulationssensor

Als Lichtquelle für den Sensor dient eine gepulste Leuchtdiode. Der Empfang des reflektierten Lichtes erfolgt mittels zweier Fotodioden. Als Nutzinformation wird der Scheitelwert des gepulsten Signals durch einen Spitzenwertgleichrichter ermittelt. Diese Werte erfaßt ein Mikroprozessor, der anschließend die Auswertung der Signale und der Ermittlung des Entfernungswertes vornimmt. Diese Meßwerte stehen für die weitere Nutzung an einer seriellen Schnittstelle zu Verfügung.

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß für unterschiedliche Materialien eine starke Abhängigkeit der Kennlinienverläufe von den Reflexionseigenschaften besteht (Bild 89). Signifikant ist die unterschiedliche Höhe der Kennlinien, wobei der Verlauf weitestgehend ähnlich ist. Die

Betrachtungen haben ergeben, daß bereits durch ein Logarithmieren des Quotienten der beiden Fotodiоденspannungen eine im Bereich von 4 - 20mm monoton steigende Kennlinie erreicht werden kann, die weitestgehend unabhängig von den verwendeten Reflexionsmaterialien ist. Im Nahbereich ist durch eine totale Abschattung der ersten Fotodiode keine sinnvolle Auswertung des Meßsignals möglich. Für größere Meßentfernungen wäre eine zusätzliche Hardwarebeschaltung für die Signalaufbereitung notwendig.

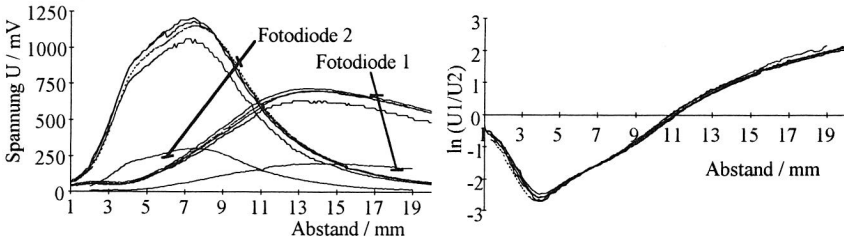


Bild 89: Kennlinienverläufe der Spannungen der Fotodiоден bei unterschiedlichen Materialien

Auf Grund der noch bestehenden Streuung der Kennlinien wurden eine Strategie entwickelt, die eine weitere Genauigkeitssteigerung der Messung ermöglicht. Hierzu erfolgte eine Aufnahme von Kennlinienverläufen für typische Materialien, die anschließend durch Potenzreihen fünften Grades angenähert wurden. Für die Unterscheidung der Kennlinien wird von der Spannung der ersten Fotodiode ausgegangen, so daß die für das jeweilige zu bestimmende Material zutreffende Kennlinie ausgewählt werden kann. Diese wird anschließend genutzt, um aus  $\ln(U_1/ U_2)$  den Entfernungswert zu ermitteln. Eine beispielhaft Meßaufgabe für fünf gleichartige Triangulationssensoren ist in Bild 90 dargestellt, wobei hierbei das in Kapitel 7.4 dargestellte Auswertesystem zu Meßwertanalyse genutzt wurde.

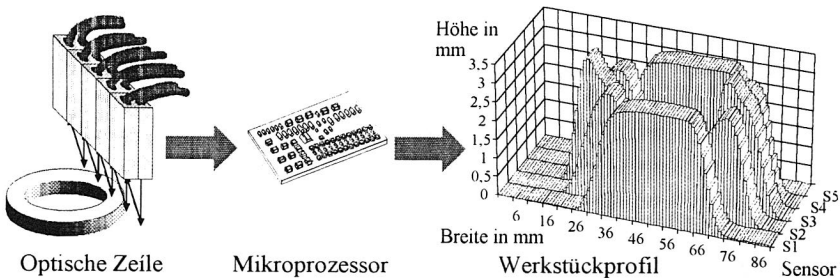


Bild 90: Vermessen eines Ringes mit einer optischen Sensorzeile

### 7.3.2 Induktive Sensorzeile

Für Einsätze unter erschwerten Einsatzbedingungen eignet sich besonders das induktive Sensorprinzip, da hier Verschmutzungen oder ungünstige Reflexeigenschaften geringen Einfluß auf das Meßergebnis haben [27]. Unvermeidlich ist jedoch eine Abhängigkeit von der Permeabilität des zu messenden Objektes und dessen elektrischer Leitfähigkeit. Grundelement des induktiven Zeilensensors bilden nebeneinander angeordnete Ferritkernspulen, wie sie für Näherungsschalter Anwendung finden (Bild 91). Die Größe der Spulen ist abhängig von der gewünschten Meßentfernung, wobei zu beachten ist, daß mit zunehmendem Durchmesser die Auflösung des Sensors abnimmt. Für den entwickelten Sensor konnte eine maximale Meßentfernung erreicht werden, die dem halben Spulendurchmesser entspricht und mit kommerziell verfügbaren induktiven Sensoren vergleichbar ist.

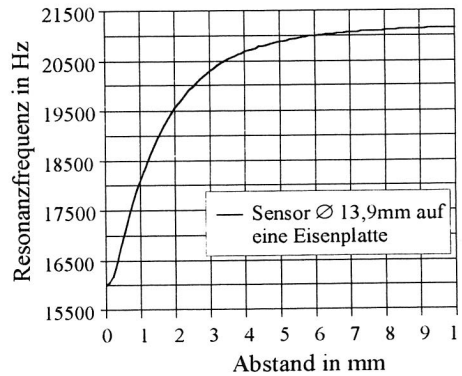
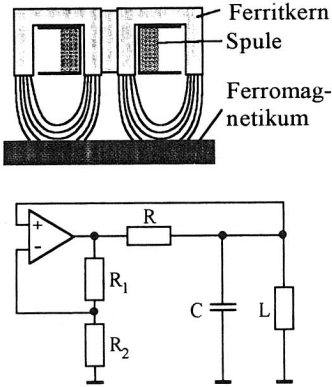


Bild 91: Aufbau des induktiven Sensors mit Oszillatorschaltung und ermittelter Abstands/Resonanzfrequenz-Kennlinie

Die Auswertung der Induktivitätsänderungen der Spulen erfolgt durch eine LC-Oszillatorschaltung, die jeder Spule zugeordnet ist. Bei diesem Resonanzfrequenzverfahren bildet die Sensor-spule einen Teil des Oszillators, dessen Resonanzfrequenz ein Maß für die Entfernung des leitenden oder ferromagnetischen Körpers ist. Die Frequenzänderungen des Sensors liegen abhängig von der verwendeten Spulengröße im Bereich bis ca. 10-20 kHz. Genauigkeitsuntersuchungen haben für diese Schaltungsanordnung einen Meßfehler von kleiner 0,5% ergeben.

Die frequenzmodulierten Meßsignale werden durch eine spezielle Zählschaltung ausgewertet. Diese bestimmt in vorzugebenden Zeitfenstern die Anzahl der Impulse und stellt diese Werte zur weiteren Auswertung, beispielsweise einem PC, parallel zur Verfügung. Die Meßrate des Sensors ist somit abhängig von der Zeitfenstereinstellung der Zählerschaltung, wobei eine

geringere Meßrate gleichzeitig eine größere Meßsicherheit bedeutet. Letztlich ist an Hand der vorgesehenen Anwendung diese Einstellung vorzunehmen.

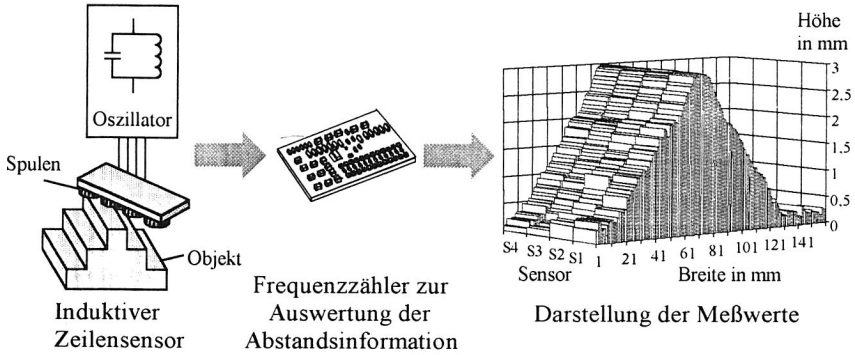


Bild 92: Detektion eines Stufenprofils mit Hilfe des induktiven Sensors

Untersuchungen zum Verhalten des Sensor für die Erkennung von Konturen zeigten erwartungsgemäß einen direkten Zusammenhang zwischen Spulengröße und Auflösungsvermögen. Trotz des integralen Verhaltens des induktiven Sensors konnten Strukturen detektiert werden, die deutlich kleiner als die Sensorkopfgröße sind (Bild 92). Nuten bis zu einer Breite von 1mm ließen sich mit Hilfe des Sensors erkennen. Hierbei zeigte sich gleichzeitig, daß nur mittels einer leistungsfähigen Sensordatenauswertung ein sinnvoller Einsatz derartiger Sensoren möglich ist. Es konnte somit festgestellt werden, daß der induktive Zeilensensor sich robust gegenüber verschiedenen Umgebungseinflüssen bei einer hinreichenden Genauigkeit der Messungen erweist.

### 7.3.3 Kapazitiver Zeilensensor

Zur Abstandsbestimmung im Bereich bis zu wenigen Zentimetern eignen sich für nichtleitende und leitende Materialien kapazitive Sensoren. Beim Detektieren von metallischen Objekten ist eine weitgehende Materialunabhängigkeit gegeben. Geeignet sind derartige Sensoren somit beispielsweise zur Erfassung von Nahtgeometrien beim Schweißen und beim Auftragen von Kleberaupen auf metallische Oberflächen. Die Konzeption eines kapazitiven Zeilensensors beinhaltet die Aufgaben der Gestaltung der Elektrodenanordnung, der Auswerteschaltung für die Kapazitätsänderung und die Bereitstellung der Meßwerte für die weitere Verarbeitung (Bild 93).

Die Gestaltung der Meßelektroden nimmt wesentlichen Einfluß auf die Funktion des kapazitiven Sensors. Der Meßkondensator besteht aus einer Elektrode und einer theoretisch unendlich großen Gegenelektrode, die durch das massebezogene metallische Objekt gebildet wird. Um

möglichst gute Meßergebnisse trotz der nur geringen Kapazitäten der Meßanordnung von weniger als einem Pikofarad zu erzielen, wurden spezielle Maßnahmen zur Verbesserung des Feldlinienverlaufes ergriffen. Mit Hilfe zusätzlicher Elektroden konnte eine Verringerung der Streuverluste erreicht werden [43, 64].

Für die Untersuchungen der Gestaltung der optimalen Elektrodenform wurden verschiedene Anordnungen aus zweiseitig beschichtetem Leiterplattenmaterial in Ätztechnik angefertigt. Neben der Meßelektrode ist auf der Vor- und Rückseite eine zusätzliche Schutzelektrode angebracht. Diese wurde während der Untersuchungen mit Masse, Betriebsspannung oder dem Meßpotential verbunden. Die besten Ergebnisse konnten bei einer Verbindung der vorderen Schutzelektrode mit Masse und der Rückseite mit Meßpotential erzielt werden.

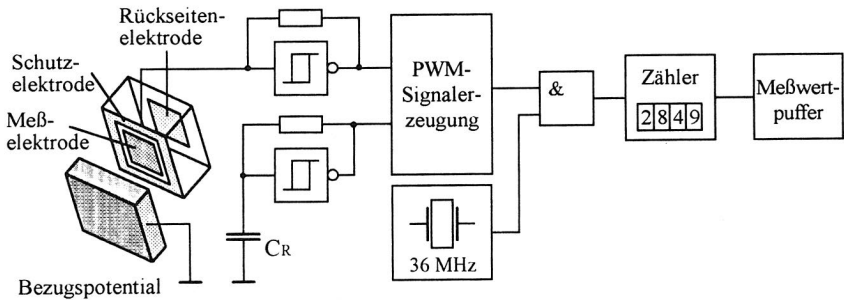


Bild 93: Funktionaler Aufbau des kapazitiven Sensors

Die Auswertung der Kapazitätsänderung erfolgte nach dem Impulsladeverfahren [40]. Hierzu bildet die Meßkapazität in Verbindung mit einem rückgekoppelten Schmitt-Trigger einen Relaxionsoszillator. Parallel zu diesem wird ein gleichartiger Oszillator mit einer Referenzkapazität  $C_R$  angeordnet. Aus diesen beiden Frequenzen wird ein pulswidenmoduliertes (PWM) Signal erzeugt, dessen Tastverhältnis ein Maß für das Kapazitätsverhältnis zwischen Meß- und Referenzkapazität ist. Die integrierte Schaltung des Relaxionsoszillators und die Pulsweitenmodulation wurden unmittelbar auf der Rückseite der Platine der Elektroden angeordnet, um unnötige parasitäre Kapazitäten zu vermeiden. Das generierte Meßsignal kann somit auch über größere Entfernungen sicher übertragen werden. Die Auswertung des PWM-Signals erfolgt durch eine Zählschaltung, die das Meßsignal mit einer höheren Frequenz überlagert und die Impulsdauer bestimmt.

Auf Basis der entwickelten kapazitiven Sensoren wurde ein Zeilensensor mit vier kapazitiven Elementen aufgebaut. Mit diesem konnten Untersuchungen von Konturen von sowohl metallischen Objekten als auch von Nichtmetallen durchgeführt werden, wobei eine Detektion auch wesentlich kleinerer Strukturen als die der Sensorflächen möglich war (Bild 94). Hierbei ist ebenfalls ein integrales Verhalten, wie beim induktiven Sensor (Kap. 7.3.2), zu verzeichnen.

Gleichzeitig konnte nur eine unwesentliche gegenseitige Beeinflussung der Sensoren festgestellt werden. Um genaue Meßwerte zu erhalten, ist es jedoch sinnvoll, den Sensor vor den Messungen gegenüber dem Meßobjekt zu referenzieren. Die Auswirkungen von Temperaturschwankungen und Feuchtigkeitsänderungen können somit eingeschränkt werden. Es wurde gezeigt, daß unter den genannten Randbedingungen der kapazitive Zeilensensor für Aufgaben der Profilerkennung in der Fertigung einsetzbar ist.

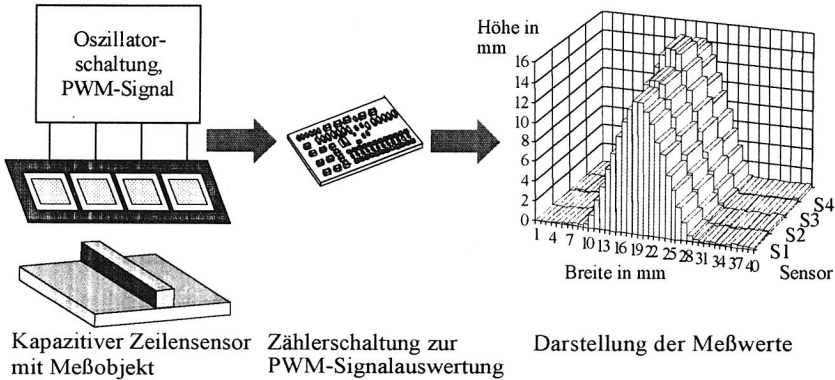


Bild 94: Messung eines Quaders mit dem kapazitiven Zeilensensor

### 7.3.4 Piezoelektrischer Kraftsensor

Vielfältige fertigungstechnische Aufgabenstellungen, wie beispielsweise das Greifen mit Robotern, erfordern eine definierte Bestimmung auftretender Kräfte. Hierbei ist nicht nur die Ermittlung der unmittelbaren Kraftgröße von Interesse, sondern auch deren Einwirkungspunkt. Neben verschiedenen anderen industriell genutzten sensorischen Prinzipien ist der piezoelektrische Effekt ein Verfahren, mit dessen Hilfe kleine, dynamische und genaue Kraftsensoren aufgebaut werden können. Durch eine matrixförmige Anordnung mehrerer Piezoelemente kann somit eine örtliche Auflösung der Krafteinwirkung erreicht werden.

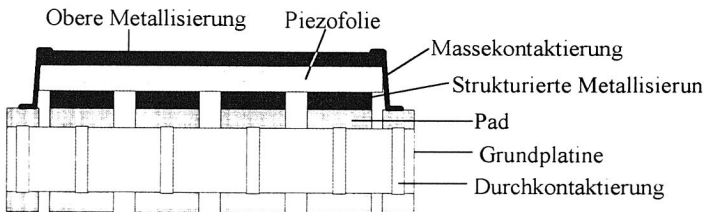


Bild 95: Aufbau des piezoelektrischen Kraftsensors

Der piezoelektrische Effekt beruht auf einer inneren Ladungsverschiebung von verschiedenen Materialien unter Kräfteinwirkung [114]. Diese bewirken Ladungsunterschiede an den Oberflächen, die der Kraft proportional sind und abgegriffen werden können. Für den Aufbau des Sensors wurde eine Kunststoffolie ausgewählt, die piezoelektrische Eigenschaften besitzt und beidseitig metallisiert ist. Auf einer Seite dieser Folie wurde eine Struktur in Ätztechnik derart hergestellt, daß eine Matrixanordnung von 4x4 quadratischen Piezosensorpads entstand. Die Metallisierung der Gegenseite blieb unverändert. Eine gleichartige Struktur wurde auf einer zweiseitig beschichteten Platine aufgebracht, die somit als Trägermaterial und zur Kontaktierung dient. Die strukturierte Seite der Folie ist mit Leitkleber derart auf der Leiterplatte befestigt, daß die jeweiligen Pads der Folie und die der Leiterkarte miteinander verbunden sind (Bild 95). Die unstrukturierte Seite der Piezofolie ist mit Massepotential verbunden und dient gleichzeitig als Abschirmung gegen Störeinflüsse.

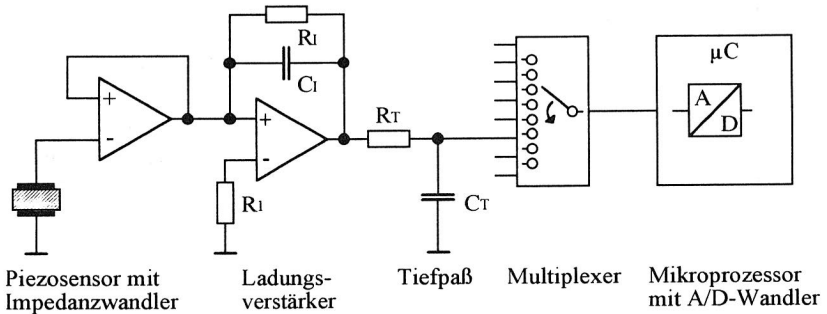


Bild 96: Prinzipieller Aufbau der Sensoranschaltung

Bedingt durch den hohen Innenwiderstand der Folie und der nur geringen Ladungsmengen, die bei Kräfteinwirkung auftreten, ist eine hochohmige Auswerteschaltung notwendig. Unmittelbar an den Pads wurde ein Impedanzwandler mit FET-Eingangsstufe angeordnet, an den sich die Auswerteschaltung anschließt (Bild 96). Dies ermöglicht eine Übertragung der Signale über eine größere Entfernung ohne die Probleme zusätzlicher Störeinflüsse.

Bedingt durch das Abfließen der Ladungen sind nur Kraftänderungen nachweisbar. Aus diesem Grund ist eine Integration des Meßsignals notwendig, welche durch einen Ladungsverstärker realisiert wird [114]. Der Widerstand  $R_i$  dient hierbei der Verhinderung von Sättigungseffekten. Die Erfassung der Meßwerte erfolgt durch Abtastung, so daß aus Gründen der Einhaltung des Abtasttheorems ein Tiefpaß am Ausgang des Ladungsverstärkters notwendig ist.

Die Auswertung der Sensorsignale wird von einem Mikroprozessor durchgeführt, der über einen integrierten Analog-Digital-Wandler verfügt. Um 16 oder mehr Kraftsignale aufnehmen zu können, war eine Multiplexerschaltung notwendig. Die Kraftsensoren werden sequentiell



durch einen Prozessor abgetastet, der die erfaßten Meßwerte zur weiteren Verarbeitung seriell zur Verfügung stellt.

Das Verhalten des Sensors wurde für einzelne Elemente und für partiell einwirkende Kräfte untersucht. Hierbei zeigte sich, daß das Kraft-Spannungs-Verhalten der Elemente einer zu beachtenden Streuung unterliegt und somit eine Referenzierung der einzelnen Sensorelemente notwendig ist. Eine örtliche Auflösung der einwirkenden Kraft konnte mit der Genauigkeit der Padgröße erzielt werden (Bild 97). Eine höhere Auflösung läßt sich durch eine feiner Struktur der Sensorelemente erreichen.

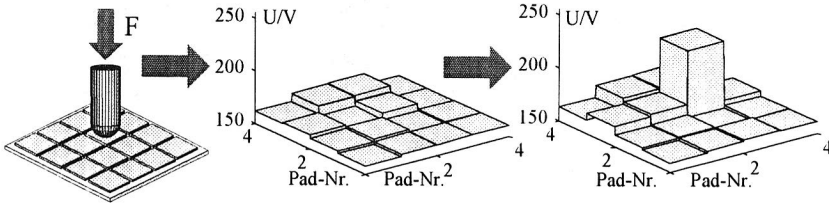


Bild 97: Messung einer punktuell einwirkenden Kraft

## 7.4 Konfigurierbares Signalverarbeitungssystem für mehrdimensionale Sensorik

### 7.4.1 Konzeption einer strukturierten Sensordatenverarbeitung

Beim Einsatz von Sensoren in der automatisierten Fertigung besitzt die Verarbeitung der erfaßten Sensordaten eine entscheidende Bedeutung, um den interessierenden Informationsgehalt aus den Meßdaten bei einer hohen Meßsicherheit zu gewinnen. Hierbei steht nicht ausschließlich die Bereitstellung von einzelnen Sensorwerten im Vordergrund, sondern gleichfalls die Verknüpfung von mehreren, auch unterschiedlichen Sensoren zu einer auf Anwenderniveau bereitzustellenden Information [13]. Ein sinnvoller Einsatz derartiger intelligenter Signalverarbeitungssysteme ist jedoch nur gegeben, wenn nicht für jede Sensoranwendung eine eigene Verarbeitung geschaffen werden muß, sondern ein Grundsystem besteht, welches auf die Bedürfnisse der konkreten Anwendung hin angepaßt werden kann. Insbesondere die Auswahl der Systemplattform ist hierbei von entscheidender Bedeutung, wenn die gewonnene Universalität des Verarbeitungssystems nicht durch die Notwendigkeit von speziellen Hardwarekomponenten eingeschränkt werden soll.

Grundlage des zu gestaltenden Sensordatenverarbeitungssystems bildet ein Standard-PC, für den sowohl umfangreiche Komponenten der Datenein- und -ausgabe als auch leistungsfähige Softwarewerkzeuge verfügbar sind. Bedingt durch die zunehmende Leistungsfähigkeit von PC-

Prozessorsystemen ist die Möglichkeit gegeben, eingebettete Systeme bestehend aus Sensor und Signalverarbeitung aufzubauen.

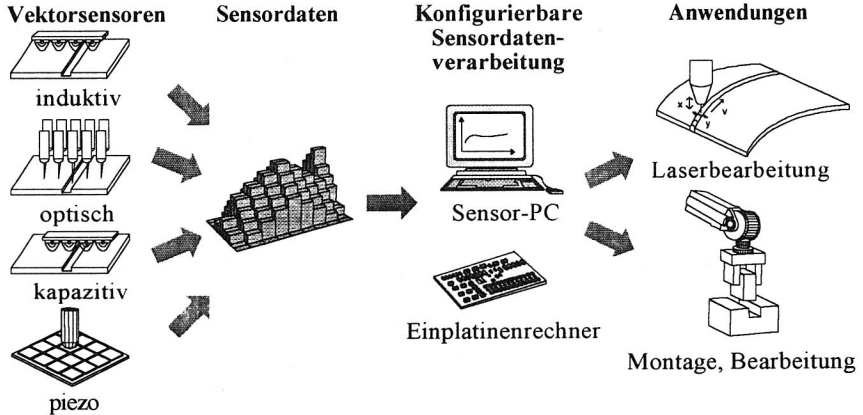


Bild 98: Gestaltung einer intelligenten Sensordatenverarbeitung

Die Verarbeitung von Sensorinformationen läßt sich in einen grundsätzlichen Ablauf einordnen [116], der bei allen Anwendungen maßgebend ist (Bild 98). In einem ersten Schritt müssen die Daten der Sensoren erfaßt und in eine digital zu verarbeitende Form umgewandelt werden. Hierbei ist der Anschluß von verschiedenen für Fertigungsaufgaben eingesetzter Sensoren mit binären und analogen, aber auch zunehmende mit seriellen und parallelen Schnittstellen zu ermöglichen. Die über entsprechende Interfacebaugruppen erfaßten Signale der Sensoren werden linearisiert und in standardisierte Einheiten transformiert.

Daran schließt sich die eigentliche intelligente Verarbeitung der Sensordaten an. Sie erfordert neben einer zeitlichen und örtlichen Filterung auch Funktionen der Kantenextraktion, der Interpolation und der Rangfolge- und Verknüpfungsoperationen. Die so gewonnenen Informationen können anschließend in gewünschter Form ausgegeben werden. Bedingt durch die Nutzung eines PC als Basissystem ist an dieser Stelle gleichzeitig eine Archivierung und Visualisierung der Meßdaten gegeben. Als Prozeßausgabe sind sowohl analoge und parallele Schnittstellen als auch Feldbusanschlüsse oder die direkte Anwendung der Daten in einem Steuerungsprogramm möglich. Entsprechend dieses Ablaufes wurde ein strukturiertes Sensordatenverarbeitungssystem konzipiert und realisiert, dessen effiziente und leistungsfähige Datenauswertung an Hand der in den bisherigen Kapiteln beschriebenen Sensoren getestet worden ist.

### 7.4.2 Modularchitektur

Ausgehend von den Anforderungen und den Bestandteilen eines Sensordatenverarbeitungssystems wurde eine modulare Softwarearchitektur erstellt, die die strukturierte Verarbeitung von Informationen mehrerer Sensoren durchführt. Dabei handelt es sich um Operationen von Vektor- und Matrixdaten mit örtlicher und zeitlicher Beziehung. Die Struktur des Systems gliedert sich entsprechend in die drei Bereiche der Datenerfassung und Transformation, der Datenoperationen und der Ausgabe der Informationen (Bild 99).

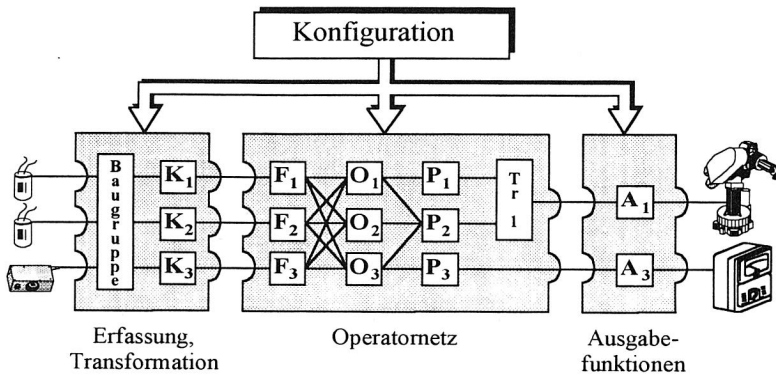


Bild 99: Konfigurierbares System zur Verarbeitung von matrixförmigen Sensordaten

Die grundlegende Ebene des Systems bildet die Erfassung der Daten von den Hardwarebaugruppen. Innerhalb dieses Bereiches können die Sensorwerte gleichzeitig mit verschiedenen Verfahren transformiert und in standardisierte Einheiten normiert werden. Zu diesem Zweck stehen die nachfolgend angeführten Transformationsoperationen zur Verfügung:

- Definition einer Kennlinie mittels Stützstellen,
- Funktion über explizite Gleichungsangabe,
- Negation der Werte.

Somit ist eine Umwandlung von Eingangsinformationen in eine beliebige Form von Primärdaten möglich. Die Angabe einer Kennlinie gewährleistet, direkt experimentell ermittelte Daten von Sensoren in das Sensorsystem zu integrieren. Aber auch klassische Linearisierungen, wie Logarithmen- oder Potenzfunktionen, können in einfacher Weise realisiert werden.

Die so aufbereiteten Primärdaten stehen anschließend dem eigentlichen Hauptteil des Systems zur Verfügung. Dieses führt eine Verarbeitung und Verknüpfung mit verschiedensten linearen und nichtlinearen Operatoren durch. Bedingt durch die ähnlich geartete Aufgabenstellung wurden hierfür vor allem geeignete Operationen aus dem Bereich der Bildverarbeitung eingesetzt

(Tabelle 3) [141]. Die Operatoren können sowohl auf Daten eines Abtastzeitpunktes, d.h. örtlich, als auch auf Daten mehrere Abtastzeitpunkte, d.h. zeitlich, angewendet werden.

Gattung	Operatoren
Glättungs- und Schärfe-filter	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mittelwert (ungewichtet, gewichtet)</li> <li>- Gauß</li> <li>- Kontrast</li> </ul>
Schwellwertfilter	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Binärisierung</li> <li>- Schwellwertoperation</li> </ul>
Kantenfilter	<ul style="list-style-type: none"> <li>- gerichteter Kantenoperator</li> <li>- Sobel</li> <li>- gerichteter Gradientenoperator</li> <li>- Laplace</li> </ul>
Rangordnungsfilter	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Median</li> <li>- Rangordnung mit konstantem Rang</li> <li>- Minimum/Maximum</li> <li>- Midrange</li> </ul>
Verknüpfungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Summe, Differenz</li> <li>- Produkt, Quotient</li> <li>- gewichtete Betragsbildung</li> </ul>
Sonstige	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interpolation</li> <li>- Histogramm</li> <li>- Allgemeiner Nachbarschaftsfilter</li> </ul>

*Tabelle 3: Operationen des Sensordatenverarbeitungssystems*

Grundlegend stehen Funktionen zur Verfügung, mit deren Hilfe die Sensorwerte geglättet werden können, um somit Störungen zu unterdrücken. Aber auch eine Kontrasterhöhung der Daten zur besseren Identifikation ist möglich. Zur Bewertung der Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den einzelnen Sensorwerten können innerhalb definierbarer Fenster Rangordnungsoperatoren eingesetzt werden. Schwellwertfilter gewährleisten eine Klassifikation des Sensorinformationen, die im einfachsten Falle eine Entscheidung zwischen zwei Zuständen ist. Zur Ermittlung von Konturen von Objekten können Kantenoperatoren genutzt werden, die Sprünge oder Gradienten extrahieren und somit Nuten oder Außenkonturen detektieren.

Durch die Operationen der Verknüpfung von einzelnen oder mehreren Datenströmen ist eine Universalität der Verarbeitung von Sensordaten zu erzielen. Bei diesen mathematischen Funktionen kann eine zusätzliche Gewichtung durch Faktoren erfolgen. Hierdurch ist auch die Problemstellung der Fusionierung von Sensordaten zu realisieren. Als spezielle Funktion wurde

eine Interpolation zwischen einzelnen örtlichen Sensordaten realisiert, um durch einen Subpixelalgorithmus eine feinere, örtliche Auflösung der Sensordaten zu erzielen. Die Interpolationsfunktion erhält die integrale Wichtung der Sensorwerte bei, um somit eine Verfälschung des Informationsgehaltes zu vermeiden.

Ein dritter Bereich des Sensordatenverarbeitungssystems übernimmt die Aufgabe, die verarbeiteten Daten in geeigneter Form an nachfolgende Geräte zu übergeben. Dabei sind analoge oder digitale Ausgänge, Protokolldateien, Visualisierungsfunktionen oder auch Feldbusse möglich.

### 7.4.3 Konfiguration des Systems

Die Anpassung an die jeweils vom konkreten Einsatz abhängigen Verarbeitungsoperationen, die Festlegung der zur Verfügung stehenden Sensorschnittstellen und die Art der Datenausgabe können vom Anwender des Systems vorgenommen werden. In einer Konfigurationsdatei werden die zur Verarbeitung der Sensorinformationen notwendigen Operationen festgelegt.

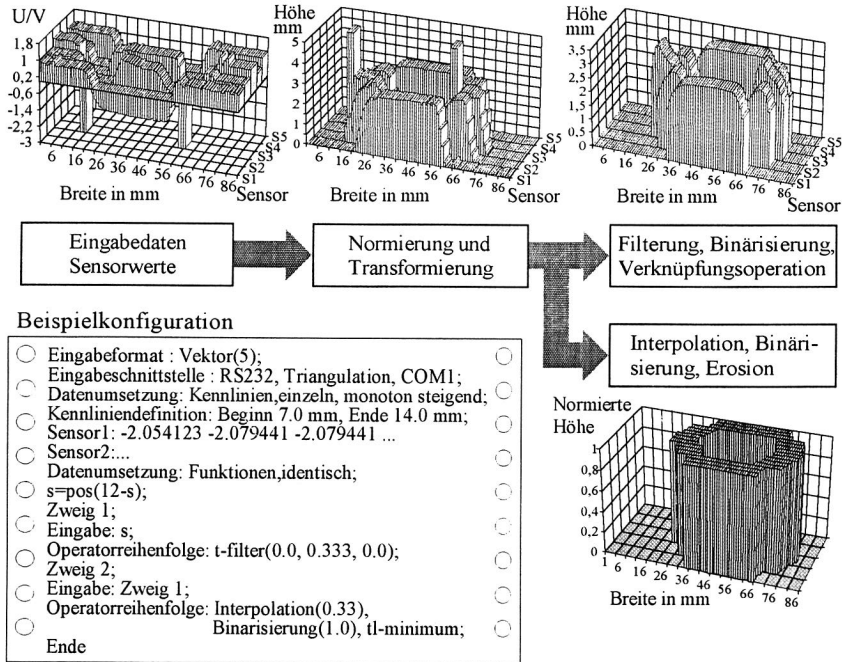


Bild 100: Auswertung einer mit dem optischen Sensor aufgenommenen Struktur

Die Beschreibung der Konfiguration des Sensordatenverarbeitungssystems erfolgt durch eine problemangepaßte Beschreibungssprache, für die eine in Backus-Naur-Form dargestellte kon-

textfreie Grammatik entwickelt wurde. Diese Sprache definiert die Syntax und die den Schlüsselausdrücken zugeordneten Operationen. Das Einlesen der Beschreibungsdateien wird mit Einleseroutinen durchgeführt, die mit Hilfe der vom Betriebssystem UNIX bekannten Werkzeugen Lex&Yacc generiert wurden [70]. Diese Routinen analysieren beim Start der Sensordatenverarbeitung das Konfigurationsfile, um so die Struktur und Funktion des Softwaresystems festzulegen.

Die Einsetzbarkeit des Verarbeitungssystem für das beabsichtigte Anforderungsspektrum wurde an Hand der Auswertung der Sensorwerte der realisierten Vektor- und Matrixsensoren vorgenommen. Beispielhaft ist hierfür in Bild 100 die Auswertung der Daten der optischen Triangulationszeile in Verbindung mit einem Ausschnitt aus dem zugehörigen Konfigurationsfile dargestellt. Es ist zu erkennen, daß trotz schlechter Ausgangswerte eine hohe Reproduzierbarkeit der Objektkontur erreicht werden kann.

## **8 Flexibilitätssteigerung durch Manipulatoren mit höherem Freiheitsgrad**

Der zunehmende Einsatz von Robotern in der Klein- und Mittelserienfertigung bedingt ständig steigende Anforderungen an die Greifsysteme. Durch eine geeignete Greiferkonstruktion auf der Basis mehrerer Fingerglieder kann eine Manipulationsfähigkeit erreicht werden, die der menschlichen Hand angenähert ist. Ausgehend von den Anforderungen an derartige Greifer soll die Mechanik, der Antrieb und die Steuerung eines auf einer Dreifingerkinematik basierenden Greifsystems aufgezeigt werden. Mit dem Ziel, den flexiblen Greifer möglichst anwendernah programmieren und steuern zu können, wurde ein hierarchisches Steuerungskonzept auf der Basis abstrakter Objektbeschreibungen entwickelt. Durch eine Integration von Sensoren in den Greifer kann unmittelbar auf herrschende Prozeßverhältnisse reagiert werden. Für die Anwendungen in der Montagetechnik wird die Möglichkeit einer Kraftregelung für den entworfenen Greifer betrachtet.

### **8.1 Einsatzpotential von Greifern mit hohem Freiheitsgrad**

Industrieroboter bieten derzeit das höchste Flexibilitätspotential in der Fertigung. Ihre Einsatzfähigkeit wird in hohem Maße von ihrer Möglichkeit bestimmt, durch geeignete Werkzeuge auf den Prozeß einzuwirken. In der Montage ist die Flexibilität einer Fertigungsanlage direkt abhängig von der Leistungsfähigkeit der eingesetzten Greifsysteme. Trotz ihres geringen Investitionsvolumens gegenüber der gesamten Anlage bedingen sie wesentlich Taktzeit, Produktivität und Fertigungsqualität [44].

#### **8.1.1 Situationsanalyse flexibler Greifsysteme**

Für den Einsatz von Industrierobotern in der Montage- und Handhabungstechnik kann das Greifen als eine Tätigkeit nach [20] charakterisiert werden:

*Greifen ist eine Funktion des Sicherns zum vorübergehenden Erhalten räumlich definierter Zustände durch die Wirkprinzipien Kraft- oder Formschluß.*

Die fertigungsbedingten Anforderungen an die Entwicklung von Greifern lassen sich nach den Gesichtspunkten des zu greifenden Objektes, des Handhabungssystems, der Fertigungsumgebung und -aufgabe einordnen [131]. Einfluß nehmen die Form, die Größe, das Gewicht und die Empfindlichkeit der zu manipulierenden Werkstücke. Die Handhabungseinrichtung bestimmt die Flanschform, die zur Verfügung stehenden Energieformen, das zulässige Gewicht und die Steuerungsart. Des weiteren sind der Arbeitsraum sowie die Umwelteinflüsse von Bedeutung. Die Positioniergenauigkeiten, durchzuführende Fügebewegungen und zusätzliche Funktionen

werden von der durchzuführenden Aufgabe definiert. Zur Erfüllung möglichst vieler dieser Anforderungen besteht der Trend zu vorzugsweise universellen Greifmechanismen.

Für die Durchführung flexibler Handhabungsoperationen haben sich in der industriellen Praxis mehrere Lösungen herausgebildet (Bild 101). Wechselsysteme erlauben den Austausch der Greifer am Flansch, um unterschiedliche Werkstücke greifen zu können. Dies bedingt eine größere Anzahl von notwendigen Greifern und zusätzliche Wechselzeiten. Bei Multifunktionsanordnungen werden eine bestimmte Anzahl von Greifmöglichkeiten, beispielsweise durch Revolvergreifer, erzielt. Hierbei ist neben einem hohen konstruktiven Aufwand eine erhöhte Last am Roboter und ein eingeschränkter Arbeitsraum gegeben. Durch adaptive Systeme wird versucht, mit einem Greifer, der über mehrere Freiheitsgrade verfügt, unterschiedliche Werkstücke zu greifen. Das Spektrum der Entwicklungen reicht von positionierbaren Zweibackengreifern bis zur Nachbildung der menschlichen Hand [60].

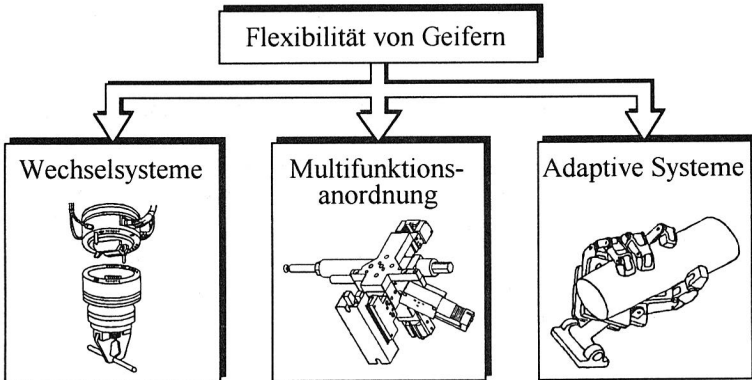


Bild 101: Möglichkeiten des Aufbaus flexibler Montagegreifer [131]

In der industriellen Praxis haben sich jedoch derartige adaptive Greifer bisher nicht etabliert. Bereits in [60] wurde angeführt, daß dies im wesentlichen in einer aufwendigen Mechanik und Steuerung begründet ist. Besonders kleine, robuste Antriebs Elemente bereiten große Probleme. Somit waren die bisherigen Entwicklungen mehr durch theoretische und wissenschaftliche Betrachtungen gekennzeichnet.

Gleichzeitig wird von modernen Greifersystemen eine Reaktion auf aktuell herrschende Prozessverhältnisse mit Hilfe des Einsatzes von Sensoren erwartet [138]. Die Integration einer geeigneten Kraftsensorik in den Greifer und der gewonnenen Informationen in das Steuerungssystem ermöglicht es, eine objekt- und anforderungsabhängige Greifkraft zu gewährleisten.



### 8.1.2 Analyse von Montagetätigkeiten

Die Analyse manuell verrichteter Montagetätigkeiten bildet die Grundlage zur Entwicklung von Lösungen zur Automatisierung von Greif- und Fügeoperationen. Prinzipiell lassen sich vier wesentliche Griffe charakterisieren (Bild 102), mit denen die Tätigkeiten durchgeführt werden [136]. Sie unterscheiden sich in der Anzahl der eingesetzten Finger, der aufzubringenden Kräfte und in der Formschlüssigkeit des Griffs.

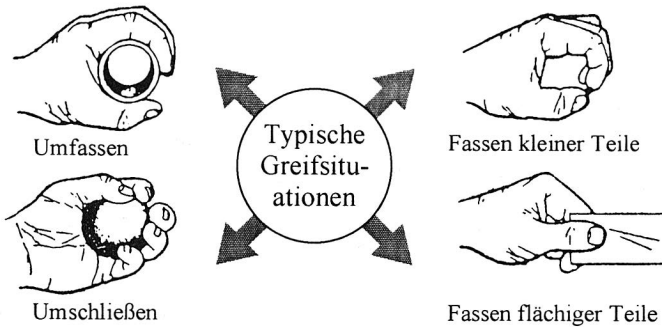


Bild 102: Typische Montagegriffe [136]

Bei vielfältigen Handhabungs- und Fügeoperationen werden die Werkstücke mit der gesamten Hand gegriffen. Hierdurch wird eine Formschlüssigkeit und eine definierte Lage in der Hand erreicht. Die Teile sind hierbei entweder vollständig umschlossen oder bei größeren Werkstücken nur umfaßt. Bei flächigen und größeren Werkstücken besteht nur zwischen einzelnen Teilen oder den Spitzen der Finger und dem Objekt Kontakt. Um diesen kraftschlüssigen Griff sicher auszuführen, werden hierbei größere Kräfte benötigt. In diesem Fall ist die Aufbringung definierter Greifkräfte, besonders bei der Handhabung empfindlicher Teile, notwendig. Ein Greifen mit der maximal möglichen Kraft ist bei diesen Anwendungen überwiegend nicht gegeben.

Kleine und sensible Werkstücke werden oftmals mit zwei Finger gefaßt. Es besteht hier ausschließlich eine kraftschlüssige Verbindung. Bedingt durch lediglich zwei Kontaktpunkte zwischen Werkstück und Finger kann es zu Instabilitäten im Griff kommen. Die menschliche Hand besitzt in diesem Falle eine Nachgiebigkeit, die zu ebenen Kontaktflächen führt.

## 8.2 Entwurf eines Dreifingergreifers

Die Zielsetzung einer hohen Flexibilität der Greifoperationen kann erreicht werden, in dem bei der Entwicklung der Greiferkinematiken von den Bewegungsfähigkeiten der menschlichen Hand ausgegangen wird. Dementsprechend soll die Entwicklung eines Dreifingergreifer beginnend mit dem konstruktiven Aufbau bis zum Steuerungsentwurf dargestellt werden. Die sich hierbei ergebenden Greifmöglichkeiten werden entsprechend herausgestellt.

### 8.2.1 Entwurf einer Dreifinger- Kinematik

Die bisherigen Entwicklung von flexiblen Greifern ist durch eine Vielzahl von möglichen Kinematiken gekennzeichnet, die sich in der Anzahl und der Anordnung der Finger und Gelenke unterscheiden. Die hierzu ausgeführten Arbeiten reichen von positionierbaren Zweifingergreifern bis zu einer Nachbildung der menschlichen Hand [60, 109, 137, 139].

Wesentliche Impulse wurden durch die Arbeiten zur Stanford/JPL Hand [109] und der Utah/MIT-Hand [60] erzielt. Untersuchungen zur Problematik der Auswahl einer günstigen Kinematik haben gezeigt, daß eine optimale Anordnung erreicht wird, wenn 3 Finger mit je 3 Gelenken verwendet werden. Hierbei ist bei einer hinreichenden Anzahl der Freiheitsgrade der Hand eine maximale Anzahl von möglichen Griffen zu erzielen [109, 137, 139].

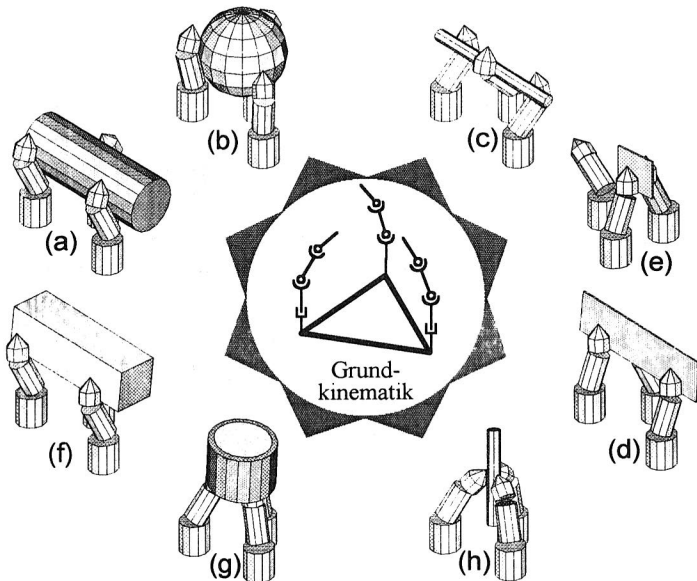


Bild 103: Kinematik des Dreifingergreifers und dessen mögliche Griffe

Die vorgestellte Konstruktion basiert auf der Analyse der notwendigen Greifvorgänge für Montage- und Handhabungsoperationen in der Fertigung [60]. Ausgehend von den hierbei definierten Grundgriffen (Kap. 8.1.2) erfolgte der Entwurf der Kinematik (Bild 103). Es wurde ein symmetrischer Aufbau des Greifers gewählt, der aus 3 Fingern mit jeweils 2 Gelenken für das Einbeugen besteht. Zwei der Finger sind in dieser Anordnung drehbar angeordnet. Somit ergibt sich eine Kinematik mit 8 Freiheitsgraden.

Im Gegensatz zu den Greifern von [109, 139] wurde auf einen Freiheitsgrad verzichtet, was zu einer Vereinfachung des Steuerungsaufbaus und der Realisierung führt. Dies bedeutet allerdings, daß die Teile in der Hand eine Vorzugslage einnehmen müssen. Eine gleichzeitige Feinmanipulation von Teilen im Greifer war nicht Ziel der Arbeiten, da davon ausgegangen werden kann, daß heutige Industrieroboter eine genügend hohe Genauigkeit und Dynamik für die Erfüllung dieser Aufgaben besitzen [111].

Durch die gewählte Kinematik ergeben sich im wesentlichen die in Bild 103 dargestellten Greifmöglichkeiten:

- Außengreifen von runden, quaderförmigen und flachen Teilen (a, d, f)
- Greifen von kugelförmigen Teilen (b)
- Innengreifen von hohlen Teilen (g)
- Zweifingergreifen (e)
- Scherengreifen von dünnen langen Teilen (c)
- Spitzengreifen von schlanken Teilen mit drei Fingern (h)

### 8.2.2 Fingergestaltung und Antrieb

Ein grundsätzliches Problem bei der Entwicklung von flexiblen Fingergreifern stellen die Gestaltung des Antriebs und die Übertragung der Bewegung auf die Fingergelenke dar. Der Zielkonflikt zwischen einem kleinen, robusten Aufbau und einer Übertragung hoher Kräfte verschärft diese Problematik. In Arbeiten zu dieser Problemstellung wurden pneumatisch [60], hydraulische [79] und elektrische [109] Antriebe auf ihre Eignung hin untersucht. Kennzeichnend ist vor allem die Art der Bereitstellung der Energie und ihr Leistungsgewicht. Bei pneumatischen und hydraulischen Antrieben besteht die Möglichkeit der Integration in den Greiferfinger. Jedoch stellt die Herstellung entsprechend kleiner hydraulischer und pneumatischer Aktoren und deren Steuerbarkeit über Ventile ein zusätzliches Problem dar. Elektrische Antriebe sind einfach und genau zu steuern, können aber auf Grund ihrer Baugröße und der Notwendigkeit eines Getriebes nicht in die Finger integriert werden.

Zur Vermeidung der Integrationsprobleme der Antriebselemente in die Finger besteht die Möglichkeit, diese am Handgelenk anzubringen. Hierbei müssen die Bewegungen durch geeignete Übertragungselemente an die Fingerglieder gelangen. In [60, 109] werden beispielsweise für den Antrieb der Finger Seilzüge oder Sehnen eingesetzt. Des weiteren ist der Einsatz von Riemetrieben möglich [139].

Auf Grund der angestrebten kompakten Bauweise und einer einfachen Ansteuerung wurden ein Antrieb mit Elektromotor und Getriebe gewählt. Die Übertragung der Bewegung erfolgt über noch zu betrachtende Übertragungsglieder. Verwendung fand ein Miniaturantrieb mit Getriebe und einer integrierten Lageregelung. Bei einem Gewicht von nur ca. 50g wird ein Drehmoment von 50 Ncm erreicht.

Für die Übertragung der Drehbewegung auf die einzelnen Fingergelenke wurden die in Bild 104 dargestellten Mechanismen auf ihre Eignung untersucht. Die Bewertung erfolgte unter den Gesichtspunkten des Fertigungsaufwandes, der Spielfreiheit, der Reibungsverluste und der übertragbaren Kräfte.

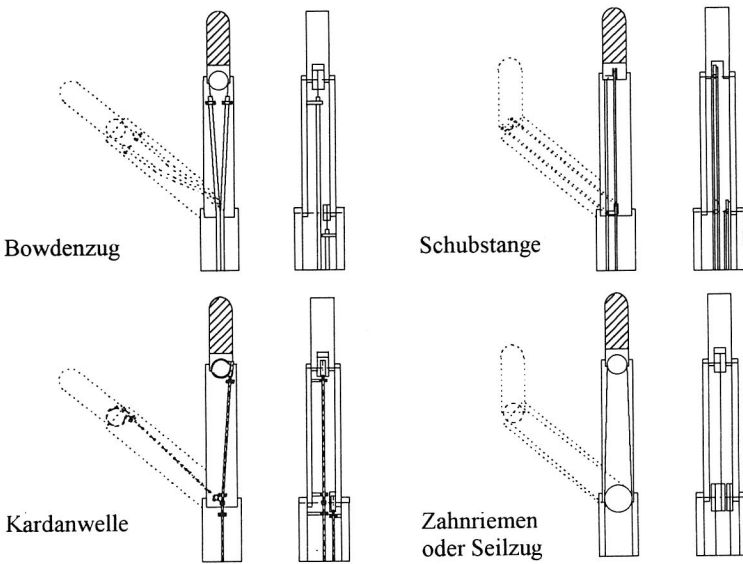


Bild 104: Arten des Fingerantriebes

Die Ausführung des Fingerantriebes mittels eines Bowdenzuges erfordert einen geringen fertigungstechnischen Aufwand, da für das obere Fingerglied keine Bewegungsumsetzung im ersten Gelenk erfolgen muß. Mit Bowdenzugtrieben lassen sich größere Kräfte übertragen, jedoch treten hierbei hohe Reibungsverluste zwischen Drahtseil und Bowde auf. Dies bedingt eine erhöhte Antriebsleistung und erschwert zudem die exakte Positionierbarkeit der Fingerglieder.

Für den Einsatz von Schubstangen ist die Anfertigung von vielen kleinen Übertragungselementen notwendig. Eine ausreichende Spielfreiheit erfordert hier einen hohen Fertigungsaufwand.

Zudem ist mit einem zunehmenden Spiel durch Verschleiß während der Lebensdauer des Greifers zu rechnen.

Bei einem Gelenkantrieb mit Kardanwellen wird an den Fingergelenken ein Getriebe benötigt. Dieses bedingt eine Vergrößerung der Gelenke und damit eine Beeinträchtigung des Greifens von Werkstücken. Außerdem ergibt sich eine Masseanhäufung an einem langen Hebelarm. Die Kardangelenke besitzen nur eine begrenzte Spielfreiheit, verbunden mit einem erheblichen Fertigungsaufwand.

Weiterhin wurde für den Greiferantrieb ein Drahtseil- und ein Zahnriementrieb in Betracht gezogen. Hierbei wird eine hohe Spielfreiheit bei relativ geringem Fertigungsaufwand erzielt. Für den Drahtseiltrieb ist ein sehr flexibles Drahtseil erforderlich, welches für die geringen Radien der Seilscheiben geeignet ist. Dieses muß für eine spielarme Übertragung stark vorgespannt werden. Die Befestigung des Seiles am Fingergelenk ist unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten problematisch. Demgegenüber erfolgt bei einem Zahnriementrieb die Kraftübertragung formschlüssig und ohne wesentliche Vorspannung und Schlupf des Riemens.

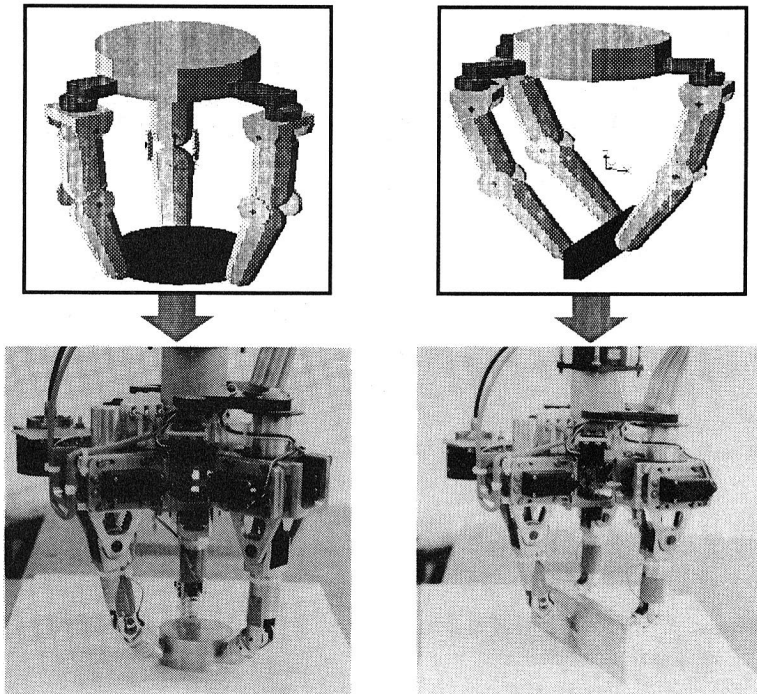


Bild 105: Simulation und Einsatz des Dreifingergreifers

Bedingt durch die Kinematik wird beim Kardan- und Bowdenzugantrieb die Orientierung des zweiten Fingergliedes bei Bewegung des ersten Gliedes mit verändert. Beim Schubstangen-, Drahtseil- und Zahnriemenantrieb wird die Orientierung des zweiten Gliedes bei einer Bewegung des ersten Gliedes beibehalten. Dies ist lediglich für den Entwurf des Steuerungssystems von Bedeutung und hat auf die Auswahl der Antriebe keinen Einfluß.

Für den entworfenen Dreifingergreifer wurde der Zahnriementrieb als Kinematik gewählt, weil er Spiel- und Schlupffreiheit, geringe Reibungsverluste und eine einfachere konstruktive Ausführung garantiert. Die Konstruktion ergab folgende Merkmale für den flexiblen Greifer:

- Integration des Motors in den Fingeransatz
- Verstellbereich der Fingerglieder  $\pm 90^\circ$
- Volumen des Greifers ca. 200 x 200 x 200 mm
- Greifbare Teile bis ca. 200 mm
- Gewicht 1,5 kg
- Tragfähigkeit bis max. 1 kg
- Integration verschiedenster Sensoren durch austauschbare Fingerspitzen

### 8.2.3 Steuerungsaufbau

Ausgehend von dem gewählten elektrischen Antriebskonzept wurde angestrebt, ein Steuerungskonzept zu entwerfen, welches die Ansteuerung der Motoren zur Einnahme der Winkelstellungen auf der Basis einer verallgemeinerten Beschreibung der Greifpositionen ermöglicht. Zweckmäßige Schnittstellen gewährleisteten sowohl eine Integration in die Fertigungsumgebung als auch eine anwenderfreundliche Bedienung und Programmierung. Aus praxisrelevanten Gesichtspunkten sollten möglichst universelle, kommerziell verfügbare Komponenten eingesetzt werden. Mit dem Ziel eines modular aufgebauten Systems zur Verteilung und Strukturierung nach einzelnen Funktionen wurde die in Bild 106 dargestellte Anordnung gewählt.

Durch den Einsatz von Servomotoren mit integrierter Positionsregelung für den Fingerantrieb ist keine zusätzliche Verstärkerschaltung und kein weiterer Regler notwendig. Die Positionswertvorgabe geschieht ausschließlich durch ein PWM-Signal, welches durch einen Mikroprozessor erzeugt wird, der intern über entsprechende Funktionen zur Generierung von PWM-Signalen verfügt. Integrierte Analog-Digital-Wandler ermöglichen zudem eine unmittelbare Aufnahme von Kraftsignalwerte. Für den Mikroprozessor findet das in Kapitel 5.4 beschriebene Echtzeitsystem Anwendung, wodurch eine einfache Möglichkeit besteht, eine digitale Kraftregelung zu implementieren.

Die Vorgabe der einzustellenden Fingergelenkwinkel und -kräfte erfolgt durch einen Steuer-PC, der seriell mit dem Mikroprozessor verbunden ist. Der PC stellt die Schnittstelle zum Anwender oder zu anderen Fertigungssteuerungen dar. Um eine anwendungsnahe Programmierung des Systems zu ermöglichen, dienen als Benutzerschnittstelle im nachfolgenden beschriebene Greifprimitive, mit deren Hilfe die wesentlichen Greifmöglichkeiten genutzt wer-

den können. Das Softwaresystem des Steuerungs-PC's übernimmt die Aufgabe, aus dieser anwendungsorientierten Beschreibung die Winkelvorgaben für den Mikroprozessor zu erzeugen.

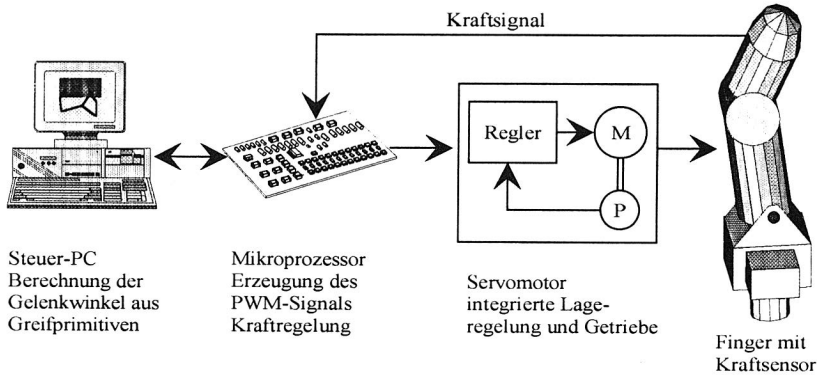


Bild 106: Steuerungsstruktur des flexiblen Greifers

### 8.2.4 Hierarchisches Steuerungskonzept zur Bestimmung der Gelenkwinkel

Neben der konstruktiven Gestaltung eines flexiblen Greifers werden an die Steuerung besondere Anforderungen gestellt. Bedingt durch die kinematische Überbestimmtheit stellen Mehrfingergreifer redundante Kinematiken dar oder können auch als Sonderform von Multirobotersystemen aufgefaßt werden. Die Lösung des Steuerungsproblems erfolgt hierbei entweder mit Hilfe der Auflösung der redundanten Kinematikbeziehungen, mit speziellen Greifstrategien oder mit Planungsverfahren [126, 138].

Für den konstruierten Fingergreifer wurde eine Mehrebenen-Steuerungsstruktur entwickelt (Bild 107), die der Abbildung einer anwendungsnahen Beschreibung der zu greifenden Objekte auf die konkreten Winkelstellungen der Fingerglieder dient. Ziel des Systems ist es, dem Anwender eine Schnittstelle zur Verfügung zu stellen, die ihm eine problemspezifische Sichtweise der Steuerung des Greifers ohne detaillierte Kenntnisse über die Bestimmung der Fingerstellungen und der Ansteuerung der Motoren erlaubt. Die Beschreibung der Greifpositionen erfolgt mit Hilfe von objektbezogenen „Greifprimitiven“, die eine Abstraktion der in Kapitel 8.1.2 analysierten Greifvorgänge der Montage darstellen. Auf der Anwenderschicht können somit Funktionen genutzt werden, die das direkte Greifen von Objekten über die Angabe ihrer Geometrie und einer Parametrierung entsprechend ihrer Größe ermöglichen.

Aus den objektbezogenen Greifvorgaben werden mit Hilfe der entwickelten Methoden die Winkel für die Stellungen der Greiferfinger bestimmt und an die Gelenkebene übergeben. Diese Fingergelenkwinkel liegen im Koordinatensystem des Greifers vor. Dem Anwender steht diese

Ebene zur Verfügung, um eine direkte Vorgabe der Winkelstellung vornehmen zu können, insofern dies erweiterte Greifstrategien erfordern.

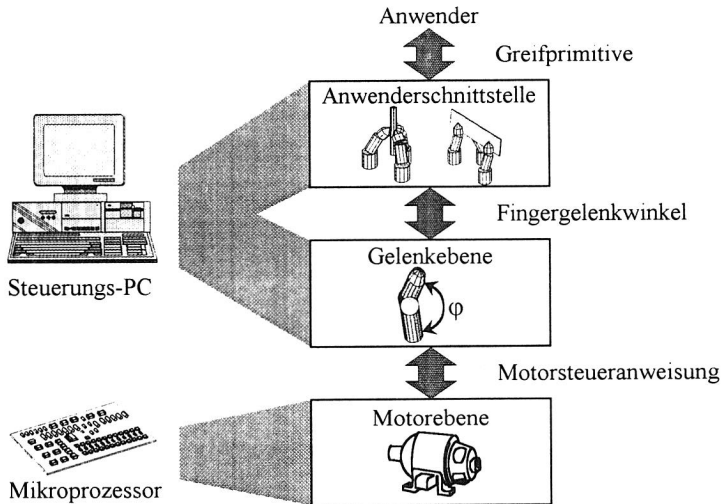


Bild 107: Ebenenmodell des Greifersteuerungssystems

Ausgehend von diesen Winkelstellungen werden die Sollwerte für die Servomotoren bestimmt. An dieser Stelle werden gleichzeitig Korrekturen vorgenommen, deren Werte durch Greiferkalibrierung gewonnen wurden. Die Übergabe der Motorsteueranweisungen an den Mikroprozessor erfolgt über eine Kommunikationsschnittstelle mit Hilfe eines Datenprotokolles. Die Fingerpositionierung auf Motorebene wird durch den Mikroprozessor selbständig ausgeführt.

### 8.2.5 Entwurf definierter Greifprimitive

Wie bereits dargestellt, wurden für eine anwendungsnahe Programmierung vier Greifprimitive definiert (Bild 108), die zur Beschreibung einer Vielzahl von Werkstückgeometrien genutzt werden können. Auch wenn die Form des Teiles nicht der des Greifprimitives entspricht, so besteht oftmals die Möglichkeit, die Greifpunkte entsprechend den Primitiven vorzugeben. Durch Parametrierung der Primitive erfolgt die konkrete Größenvorgabe für das zu greifende Teil. Bedingt durch die Reduktion der Freiheitsgrade des Greifers wird vorausgesetzt, daß die Werkstücke eine Vorzugslage im Greifer einnehmen. Somit sind wesentliche Randbedingungen für die Berechnung der Fingerwinkel bereits gegeben. Bestimmte Fingerwinkel können demzufolge unmittelbar aus den Greifprimitiven abgeleitet werden, wohingegen die restlichen Größen in Abhängigkeit der Greifparameter zu bestimmen sind.



Das Greifprimitiv „Außengreifen“ ist für alle größeren Körper geeignet, die mit 3 Fingern an ihren seitlichen Flächen gegriffen werden können. Dies können kugelförmige, elliptische, quaderförmige oder flache Körper sein. Zudem ist diese Funktion für das umfassende Greifen von zylindrischen Teilen geeignet. Der „Innengriff“ ist für alle hohlen runden, elliptischen oder vier-eckigen Werkstücke anwendbar. Mit Hilfe des „Zweifingergriffs“ können vor allem kleine und dünne Teile gegriffen werden. Lange stiftartige Körper können mit dem „Scherengriff“ sicher gehalten werden.

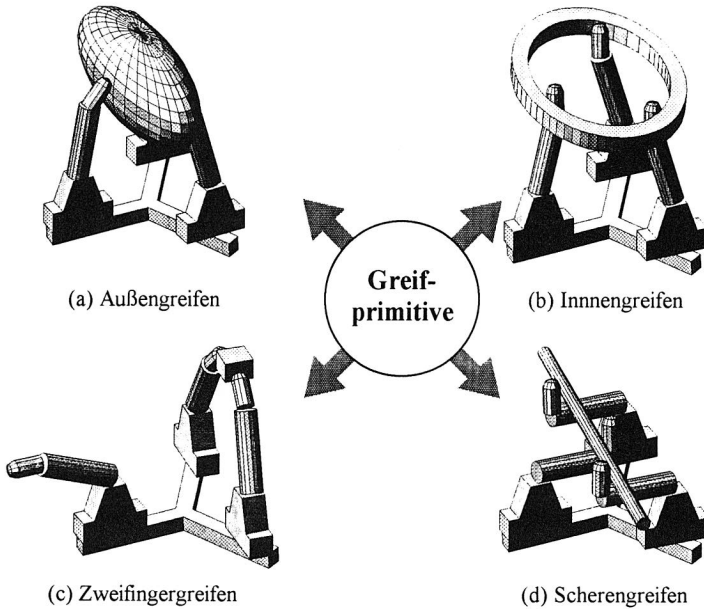


Bild 108: Fingergrundpositionen der Greifprimitive

Die implementierten Softwarefunktionen der Greifprimitive bieten dem Anwender nachfolgende Funktionalitäten:

- Einnehmen einer Grundstellung vor dem Zugreifen in Abhängigkeit des Greifprimitives
- Bestimmen der Vorzugslage, die ein Objekt beim Greifen einnehmen muß. Diese Funktion wird benötigt, um die durch die Wahl der Kinematik bedingten definierten Lage des Objektes relativ zum Greifer zu bestimmen.
- Einnahme einer bestimmter Fingerposition zum Greifen des Teiles entsprechend dem Greifprimitiv und den vorgegebenen Parametern

### 8.3 Verfahren zur Bestimmung der Fingerstellungen aus vorgegebenen Greifprimitiven

Die Anwendung definierter Greifprimitive macht es notwendig, für die Berechnung der Fingerwinkel entsprechende Algorithmen zu entwickeln. Hierbei wurde eine Untergliederung in zwei Berechnungsstufen vorgenommen. Zuerst muß die Lage des Körpers im Greifer und die daraus resultierenden Beruhungspunkte der Fingerspitzen bestimmt werden. Aus diesen Punkten im kartesischen Greiferkoordinatensystem lassen sich die Fingerwinkel ermitteln. Im Folgenden soll die wohl am häufigsten auftretende Problemstellung des „Auengreifens“ von nicht elliptischen Teilen näher betrachtet werden.

Für die Funktionen des „Auengreifens“ von elliptischen Körpers, dem „Innengreifen“, dem „Zweifingergreifen“ und dem „Scherengreifen“ werden die Positionen der Fingerspitzen und die Winkel der Fingergelenke in vergleichbarer Form ermittelt.

#### 8.3.1 Kinematische Voraussetzungen

Grundlage der Herleitung der mathematischen Beziehungen für die Steuerung des Greifers ist die Festlegung eines kartesischen Koordinatensystems. Dies erfolgt in der Art, daß möglichst einfache, mathematische Beziehungen resultieren (Bild 109).

Der Ursprung des Koordinatensystems wird im Schnittpunkt der Hauptachse des Greifers mit der Ebene der ersten Fingergelenke festgelegt. Der Arm, der den nicht drehbar ausgeführten Finger trägt, wird mit Arm 0 bezeichnet, und bestimmt gleichzeitig die Richtung der X-Koordinate. Der Abstand vom Mittelpunkt bis zum Fingeransatz wird als  $r_a$  definiert. Die Länge des ersten Greiferfingers wird mit  $r_b$  und die des zweiten mit  $r_c$  bezeichnet. Alle Finger haben die gleichen Größenverhältnisse. Die Drehwinkel der Fingergelenke werden mit  $\alpha_1, \alpha_2$  für die Fingerdrehung, sowie mit  $\vartheta_{0b}, \vartheta_{1b}, \vartheta_{2b}, \vartheta_{0c}, \vartheta_{1c}$  und  $\vartheta_{2c}$  für die Knickbewegung benannt. Die Winkel  $\alpha$  sind zu  $0^\circ$  definiert, wenn die Finger auf den Mittelpunkt des Greifers ausgerichtet sind. Für die Winkel  $\vartheta$  gilt  $0^\circ$ , wenn die Finger senkrecht stehen.

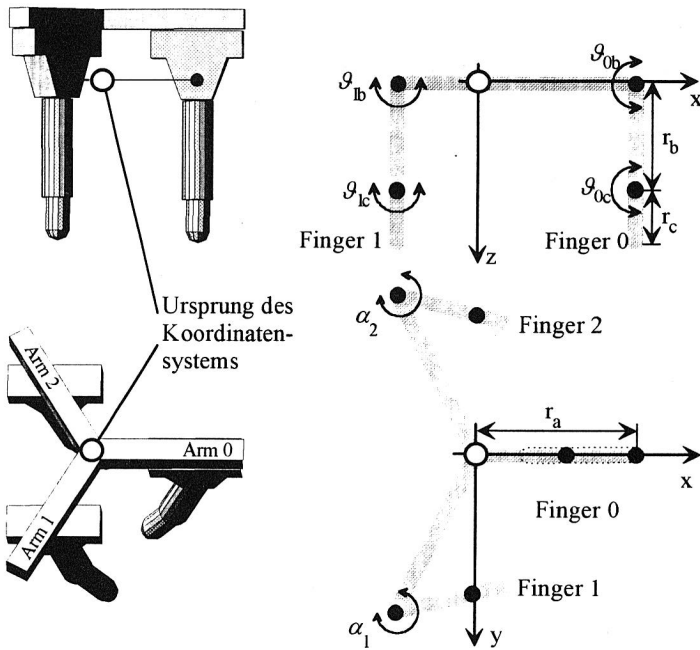


Bild 109: Koordinatensystem des Greifers

### 8.3.2 Bestimmung der Kontaktpunkte der Fingerspitzen am Objekt

Grundsätzlich ist es für einen sicheren Griff notwendig, daß die Greifpunkte der Fingerspitzen symmetrisch am Objekt anliegen. Betrachtet man den Greifer seitlich projiziert in die  $x$ - $z$ -Ebene, so ist ersichtlich, daß die  $Z$ -Koordinate aller Greifpunkte gleich sein muß. Daraus resultiert, daß die Stellung aller Finger und somit die Winkel  $\vartheta_b$  und  $\vartheta_c$  aller Finger gleich groß sein müssen. Ebenfalls ist der Abstand vom Fingeransatz bis zur Fingerspitze projiziert in die  $x/y$ -Ebene für alle Finger identisch. Diese Festlegungen bilden die Voraussetzung für die Berechnung der Fingerpositionen.

Das Greifprimitiv „Außengreifen“ wird durch die anwenderspezifischen Parameter der Breite und die Länge eines Objektes bestimmt. Bei der Berechnung der Greifpunkte müssen zwei Fälle unterschieden werden. Es ist offensichtlich, daß bei kürzeren Objekten eine Drehung der Finger 1 und 2 im Fingeransatz notwendig ist, wohingegen bei größeren Teilen eine feste Stellung eingenommen werden kann. Entsprechend des Aufbaus liegt der Grenzwert bei einer Länge des Objektes von  $\sqrt{3} \cdot r_a$ .

**Fall 1: Das Objekt ist kürzer als  $\sqrt{3} \cdot r_a$** 

Der erste Schritt der Bestimmung der Greifpunkte ist die Ermittlung der x- und y-Koordinaten der Punkte  $P_{MP}$ ,  $P_{g0}$ ,  $P_{g1}$  und  $P_{g2}$  aus den kinematischen Gegebenheiten (Bild 110).

Aus der Kinematik lassen sich angeben:

$$\text{Position des Punktes } P_{g0}: \quad x_{g0} = r_a - (x_{MP} + b) \quad \text{Gl. 40}$$

$$y_{g0} = 0 \quad \text{Gl. 41}$$

$$\text{Position des Punktes } P_{g1} \text{ (beziehungsweise Punkt } P_{g2}): \quad x_{g1} = x_{MP} - b, \quad x_{g2} = x_{MP} - b \quad \text{Gl. 42}$$

$$y_{g1} = \frac{1}{2}L = l, \quad y_{g2} = -\frac{1}{2}L = -l \quad \text{Gl. 43}$$

$$\text{Geradengleichung } \overline{P_1 P_{g1}}: \quad y_{g1} = -\tan \beta \cdot x_{g1} + \frac{1}{2}r_a(\sqrt{3} - \tan \beta) \quad \text{Gl. 44}$$

Auf Grund des gleichen Abstandes zwischen dem Fingerursprung und der Fingerspitze besteht folgender Zusammenhang:

$$|\overline{P_0 P_{g0}}| = |\overline{P_1 P_{g1}}| \quad \text{Gl. 45}$$

$$\sqrt{(x_{g1} + \frac{1}{2}r_a)^2 + (\frac{1}{2}\sqrt{3}r_a - y_{g1})^2} = r_a - (x_{MP} + b) \quad \text{Gl. 46}$$

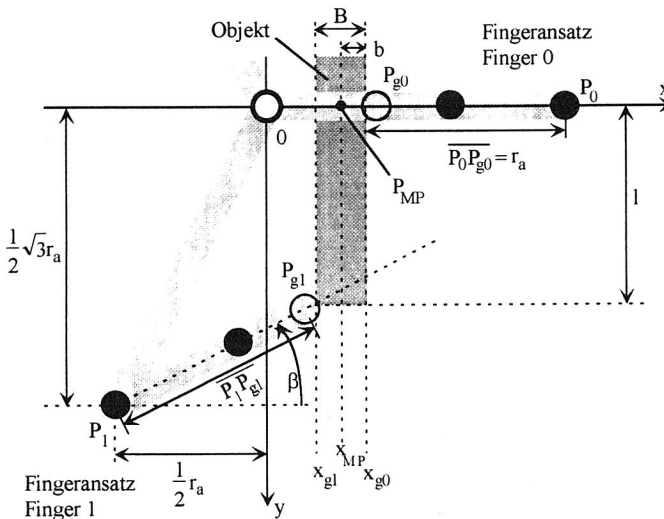


Bild 110: Geometrieverhältnisse beim Außengreifen

Setzt man (3) und (4) in (7), so ergibt sich für den Mittelpunkt des Körpers  $P_{MP}(x_{MP}, y_{MP})$ :

$$x_{MP} = \frac{\sqrt{3} \cdot r_a \cdot l - r_a \cdot b - l^2}{3r_a - 4b} \quad \text{Gl. 47}$$

$$y_{MP} = 0 \quad \text{Gl. 48}$$

Die Lage der Fingerspitze  $P_{g1}$  ergibt sich anschließend durch Einsetzen von (8) in (3):

$$x_{g1} = \frac{\sqrt{3} \cdot r_a \cdot l - r_a \cdot b - l^2}{3r_a - 4b} - b \quad \text{Gl. 49}$$

Aus den vorangehenden Beziehungen läßt sich der Drehwinkel des Fingergrundgelenkes ermitteln. Die Gerade  $\overline{OP_1}$  bildet mit der x-Achse einen Winkel von  $60^\circ$ . Somit ergibt sich für den Schnittwinkel der Geraden  $\overline{P_1P_{g1}}$  und der x-Achse:

$$\beta = \alpha + 60^\circ \quad \text{Gl. 50}$$

Durch Einsetzen die Geradengleichung (5) in (11), erhält man für den Winkel  $\alpha_1$ :

$$\alpha_1 = -\arctan\left(\frac{1 - \frac{1}{2}\sqrt{3}x_a}{x_{g1} + \frac{1}{2}x_a}\right) - 60^\circ \quad \text{Gl. 51}$$

Den Winkel  $\alpha_2$  erhält man durch Negation von  $\alpha_1$ , da die Greiferfinger bezüglich der x-Achse symmetrisch liegen.

### Fall 2: Das Objekt ist länger als $\sqrt{3} \cdot r_a$

Bedingt durch die senkrechte Lage der Greiferfinger zum Objekt können wesentliche Vereinfachungen getroffen werden. Der Mittelpunkt des Objektes liegt direkt zwischen den Punkten  $P_0$  und  $P_1$  auf der x-Achse:

$$P_{MP}: \quad x_{MP} = \frac{1}{4} \cdot r_a \quad \text{Gl. 52}$$

$$y_{MP} = 0 \quad \text{Gl. 53}$$

Für die Greifpunkte ergeben sich somit:

$$P_{g0}: \quad x_{g0} = \frac{1}{4} \cdot r_a + b \quad \text{Gl. 54}$$

$$y_{g0} = 0 \quad \text{Gl. 55}$$

$$P_{g1}: \quad x_{g1} = \frac{1}{4} \cdot r_a - b \quad \text{Gl. 56}$$

$$y_{g1} = \frac{1}{2}\sqrt{3} \cdot r_a \quad \text{Gl. 57}$$

$$P_{g2}: \quad x_{g2} = \frac{1}{4} \cdot r_a - b \quad \text{Gl. 58}$$

$$y_{g2} = \frac{1}{2}\sqrt{3} \cdot r_a \quad \text{Gl. 59}$$

Für die Fingergrundgelenkwinkel gilt:

$$\alpha = -60^\circ \quad \text{Gl. 60}$$

Die noch fehlende z-Koordinate der Greifpunkte ergibt sich aus der Stellung des letzten Fingergliedes zum gegriffenen Objekt (Bild 112). Dies läßt sich darstellen durch:

$$z_{MP} = r_b \cdot \cos(\vartheta_b) + r_c \cdot \cos(\vartheta_c) \quad \text{Gl. 61}$$

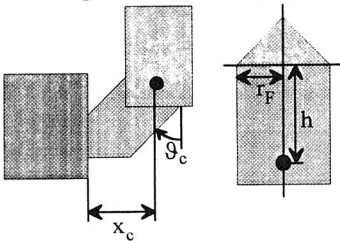
Die Winkel  $\vartheta_b$  und  $\vartheta_c$  werden nachfolgend bei der Betrachtung der Fingerspitzen ermittelt.

### 8.3.3 Gestaltung des zweiten Fingergliedes

Einfluß auf die Bestimmung der oberen Fingergelenkwinkel  $\vartheta_c$  hat vor allem die Form der Fingerspitzen. Durch ihre geometrische Ausprägung ist eine gewisse Stellung zum Objekt vorgegeben. Anwendung fänden Fingerspitzen mit  $45^\circ$  abgeschrägten Flächen, auf denen Kraftsensoren angebracht werden können. Um hiermit ein sinnvolles Greifen zu ermöglichen, müssen die Fingerenden plan auf den Objektoberflächen aufsitzen. Zusätzlich werden die Beziehungen für runde Fingerspitzen betrachtet. Die sich ergebenden Verhältnisse sind in Bild 111 angegeben.

Der Winkel  $\vartheta_c$  und die Art der Fingerenden sind somit Parameter, die für jede Konfiguration gegeben sind und als Setup-Werte abgelegt werden. Aus dieser Vorgabe ergibt sich die Größe von  $x_c$ , wobei angenommen wird, daß ein gerades Teil gegriffen wird.

45° abgeschrägte Fingerspitzen



runde Fingerspitzen

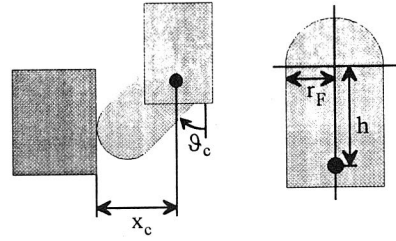


Bild 111: Einfluß unterschiedlicher Fingerformen auf die Geometrieverhältnisse

#### Betrachtung für runde Fingerspitzen:

$$x_c = r_F + (r_c - r_F) \cdot \sin \vartheta_c \quad \text{Gl. 62}$$

#### Betrachtung für abgeschrägte Fingerspitzen:

$$x_c = r_c \cdot \frac{1}{2} \sqrt{2} \quad \text{Gl. 63}$$

Bedingt durch die variable Gestaltungsmöglichkeit der Fingerspitzen sind auch andere Fingerformen möglich. Das Steuerungssystem erlaubt die Anpassung an diese Formen durch eine geeignete Parametrierung.

### 8.3.4 Bestimmung der Fingergelenkwinkel

Zur Ermittlung der Winkel  $\vartheta_c$  für die ersten Fingerglieder wird eine Projektion des Greifers in die x-z-Ebene vorgenommen (Bild 112).

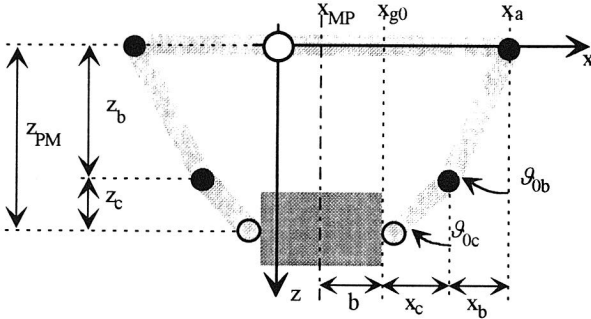


Bild 112: Bestimmung der Fingerspitzenpositionen

Für den Abstand des Greifpunkts von der Mittelachse gilt:

$$x_b = x_a - x_{g0} - x_c \quad \text{Gl. 64}$$

$$x_{g0} = x_{MP} + b \quad \text{Gl. 65}$$

Mit (Gl. 64) und (Gl. 65) ergibt sich für den Winkel  $\vartheta_{b0}$ :

$$\vartheta_{b0} = \arcsin\left(\frac{x_a - (x_{MP} + b) - x_c}{r_b}\right) \quad \text{Gl. 66}$$

## 8.4 Kraftgeführte Greifvorgänge von Objekten

Die Flexibilität von Montage- und Handhabungsgeräten wird nicht ausschließlich durch eine komplexere Kinematik der Greifer bestimmt, sondern gleichfalls durch die Möglichkeit, auf aktuell herrschende Prozeßverhältnisse reagieren zu können. Die Integration von Sensorik und einer darauf basierenden Steuerungsstrategie führt zu einer höheren Leistungsfähigkeit der Greifer und einer Verfügbarkeitssteigerung durch Minimierung der auftretenden Fehler. Das Greifen empfindlicher Teile und die Unterstützung von Fügebewegungen wird durch die Überwachung und die Beeinflussung der im Prozeß auftretenden Kräfte ermöglicht. Zudem gewährleistet die Aufbringung definierter Kräfte auf das gegriffene Objekt eine hohe Griff-sicherheit.

### 8.4.1 Integration der Kraftsensorik in den Fingergreifer

Die Eigenschaften einer Steuerung der Greifkraft werden bestimmt durch die Art der eingesetzten Sensoren und deren Plazierung an den Fingern. Die Plazierung kann sowohl an den Fingerspitzen als auch an den Fingergliedern erfolgen. Die Kraftsensoren können als Folien an der Oberfläche befestigt werden oder mittels Dehnmeßstreifen die Kräfte direkt im Finger bestimmen [139]. Bei der Auswahl der Sensoren sind Meßbereiche, Lebensdauer, Zuverlässigkeit, Möglichkeiten der Plazierung am Finger und die Auswertung der Meßsignale von wesentlicher Bedeutung.

Bedingt durch den überwiegenden Einsatz der Fingerspitzen bei den Greifvorgänge wurden die Kraftsensoren an dieser Stelle angebracht. Für den flexiblen Fingergreifer wurden kraftempfindliche Widerstandssensoren (Force Sensing Resistor - FSR) eingesetzt, die in Form von dünnen Folien zur Verfügung standen [50]. Sie bestehen aus zwei Polymerfolien, auf deren einer Seite mäanderförmige Elektroden und auf der gegenüberliegenden Seite ein Halbleiterpolymer angebracht ist (Bild 113). Wirkt auf die sensible Fläche eine Kraft ein, so verringert sich der Widerstand des Sensors. Hierbei wirkt sich sowohl die Fläche der einwirkenden Kraft als auch deren Größe auf das Meßergebnis aus. Der Meßbereich liegt in einem für Handhabungsaufgaben relevanten Rahmen. Die FSR-Sensoren zeichnen sich durch eine gute Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse, auch nach mehreren Millionen Einwirkzyklen, aus.

Für den Fingergreifer kam eine Ausführung des FSR-Sensors mit einer kreisförmigen aktiven Fläche zum Einsatz. Die Sensoren wurden auf die abgeschrägte Fläche der Fingerspitzen aufgeklebt. Um ein von der einwirkenden Fläche unabhängiges Meßsignal zu erhalten, sind die Sensoren mit Gummikappen abgedeckt. Die Auswertung erfolgt durch eine Spannungsteilerschaltung, die den direkten Anschluß an einen Analog-Digital-Wandler erlaubt.

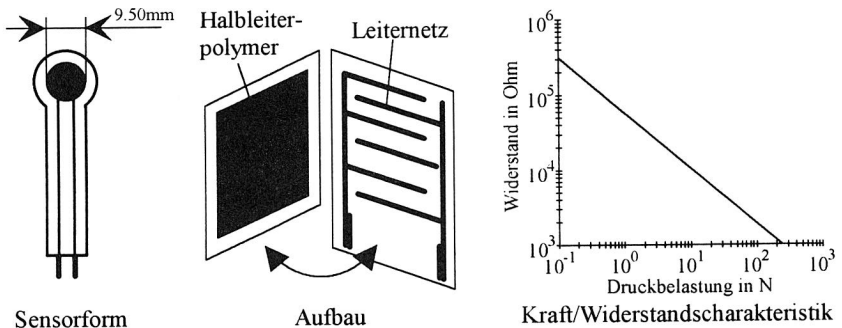


Bild 113: Merkmale eines Force Sensing Resistor



Um definierte Greifkräfte zu erzielen, ist eine Kalibrierung der Sensoren und eine Kennlinienapproximation vorgenommen worden. Der Anschluß des Sensors erfolgt direkt an den Mikroprozessor der Greifersteuerung (Bild 106). Dieser führt die Routinen der Sensorregelung in einem Takt von 2 ms aus. Gleichzeitig wurden Funktionen integriert, die eine Identifikation der Strecke und den Test der Regelung unterstützen. Die Kraftregelung erfolgt für jeden Finger separat und wirkt sich nur auf die Winkeländerung des ersten Fingergliedes aus. Somit wird die Stellung des zweiten Fingergliedes zum gegriffenen Objekt beibehalten.

### 8.4.2 Entwurf und Implementierung einer Kraftregelung

Zum Aufbau der Kraftregelung wurden durch die Schritte Identifikation der Regelstrecke, Modellbildung, Reglerentwurf mit simulativer Unterstützung und praktischer Test durchgeführt. Die Identifikation des Verhaltens der Regelstrecke erfolgte mit Hilfe von Sprungantworten. Zu diesem Zweck wurde eine sprungförmige Änderung der Winkelstellung des ersten Fingergliedes bei aufgelegter Fingerspitze aufgebracht und der Kraftverlauf des Sensors gemessen. Bei verschiedenen Winkelstellungen war eine unterschiedliche zu erreichende Endkraft festzustellen, die aus den Unterschieden im Abstand zwischen erstem Fingergelenk und Greifpunkt resultiert (Bild 114).

Festzustellen war, daß die Winkelstellung eine Auswirkung auf die Dynamik der Regelstrecke hat. Deutlich zu bemerken ist ein Totzeitverhalten von 43 ms - 59 ms, was auf mechanische Gegebenheiten zurückgeführt werden kann. Die ermittelte Einschwingzeit von 153 ms - 202 ms bei einer Einschwingtoleranz von 5% läßt für den zu entwerfenden Regler nur eine geringe Dynamik erwarten. Die Regelstrecke ist zudem durch ein asymptotisches Einlaufen in den Endwert ohne Überschwingen gekennzeichnet.

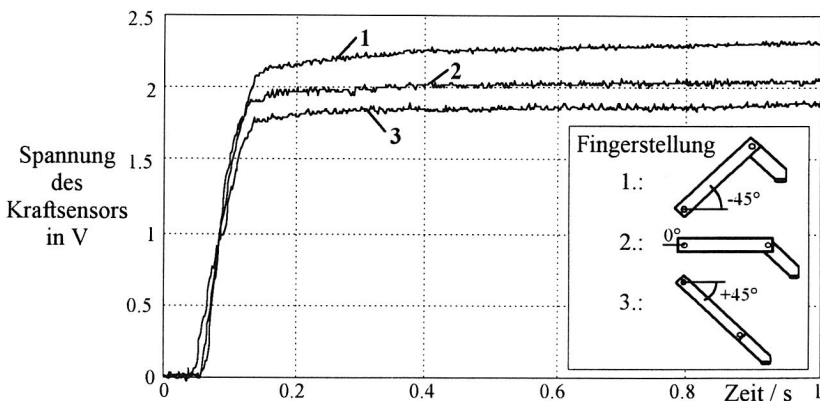


Bild 114: Sprungantwort der Regelstrecke

Ausgehend von den aufgenommenen Meßkurven wurde eine Identifikation der Regelstrecke vorgenommen. Zur Bestimmung der Steckenübertragungsfunktion kam das in Kapitel 6.2.2 vorgestellten Optimierungsverfahren zum Einsatz. Hierbei konnte für ein System 3. Ordnung mit Totzeit eine gute Übereinstimmung mit der Regelstrecke erzielt werden. Bedingt durch die Realisierung der Regelung durch einen Mikroprozessor wurde die Übertragungsfunktion für eine Abtastzeit von 2 ms diskret ermittelt. Für die Greiferstellung  $0^\circ$  lautet diese:

$$G_s(z) = \frac{p_{s1}z + p_{s0}}{z^3 + q_{s2}z^2 + q_{s1}z + q_{s0}} \cdot z^{-26} \quad \text{Gl. 67}$$

Die Übertragungsfunktion für die Fingerstellung  $0^\circ$  bildete anschließend die Grundlage für den Reglerentwurf. Als Regler wurde ein diskreter PI-Regler eingesetzt, um eine Robustheit gegenüber den Parameteränderungen der Regelstrecke, verursacht durch verschiedene Winkelstellungen, zu gewährleisten. Für den PI-Reglers wurde der in Gl. 30 beschriebene diskrete Regelalgorithmus eingesetzt.

Die Ermittlung der Reglerparameter erfolgte analog der Identifikation durch Optimierung mit Nebenbedingungen. Zielvorgabe war eine mögliche Annäherung an die Dynamik des unregulierten Systems bei einem maximalen Überschwingen von 10%.

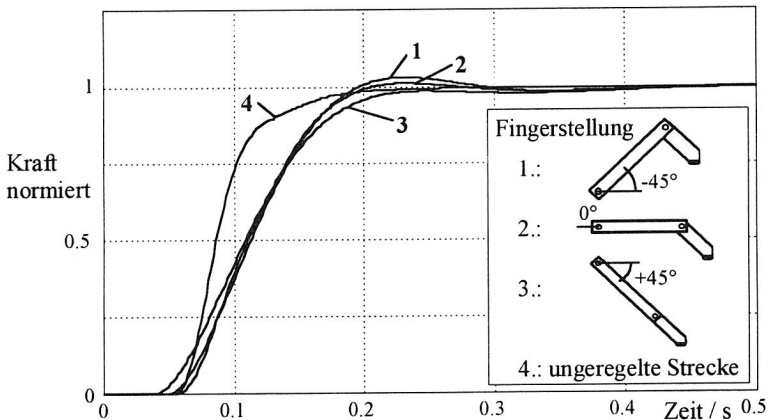


Bild 115: Sprungantwort des geregelten Systems mit PI-Regler

Eine anschließende Simulation des geschlossenen Regelkreises ergab bei Verwendung des entworfenen Reglers mit den für die drei unterschiedlichen Fingerstellungen identifizierten Streckenparametern eine Ausregelzeit von 178 ms - 186 ms bei einer zulässigen Sollwertabweichung von 5%. Zu einem späteren Zeitpunkt ist kein Überschwingen mehr zu beobachten. Die von der Strecke verursachte Totzeit wurde durch den Regler nicht vergrößert. Die gere-

gelte Strecke ist durch einen geringeren Anstieg der Regelgröße gekennzeichnet, wobei jedoch der Sollwert in annähernd gleicher Zeit erreicht wird, wie im unregelten Fall.

Nachfolgende Stabilitätsbetrachtungen haben ergeben, daß die Pole und Nullstellen des geschlossenen Systems innerhalb des Einheitskreises liegen, und somit ein ausreichend gedämpftes und stabiles System gegeben ist.

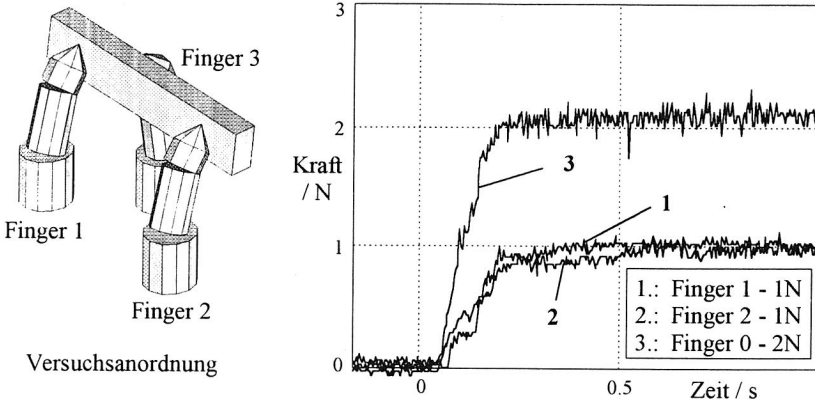


Bild 116: Zeitverhalten des Greifens eines Objektes mit drei Fingern

Nach diesen theoretischen Untersuchungen wurden der Regler auf dem Mikroprozessor implementiert. Zu diesem Zweck wurde die Übertragungsfunktion in eine Differenzgleichung umgewandelt. Mit dem so kraftgeregelten flexiblen Greifer sind unterschiedliche Versuche von Greifvorgängen verschiedener Objekte durchgeführt worden. Es wurden sowohl Belastungs- als auch Entlastungsvorgänge untersucht (Bild 116). Hierbei konnte festgestellt werden, daß die Dynamik des simulierten Systems durch die praktischen Untersuchungen weitestgehend erreicht worden ist.

Das Ziel einer definierten Kraftvorgabe beim Greifen von Objekten ohne wesentliche Beeinträchtigung der Systemdynamik konnte mit dem entworfenen Kraftregler erreicht werden. Störende Einflüsse, wie beispielsweise unterschiedlichen Greiferstellungen, wurden durch den Regler zuverlässig ausgeglichen.

## 9 Zusammenfassung

Veränderte Marktbedingungen zwingen bundesdeutsche Unternehmen zu einer zunehmenden Rationalisierung und Automatisierung der Fertigung, um im internationalen Wettbewerb trotz hoher Lohnkosten bestehen zu können. Neue organisatorische Strukturen und technische Innovationen sollen die rationelle Produktion kleiner Losgrößen mit hoher Variantenvielfalt und Qualität gewährleisten. Produktionsanlagen, die diesen Anforderungen genügen, zeichnen sich durch eine hohe Leistungsfähigkeit der eingesetzten Fertigungsgeräte aus. Das Flexibilitäts- und Leistungspotential von Industrierobotern ermöglicht es, sich wechselnden Fertigungsbedingungen anzupassen und gleichzeitig die geforderten Qualitätsparameter einzuhalten. Trotz dieser Potentiale sind hierbei Defizite bei der Manipulation von biegeschlaffen Teilen, der Ausführung komplexer Fügeoperationen und der Einhaltung definierter Beziehungen Werkstück-Werkzeug zu verzeichnen. Der Einsatz von mehreren kooperierenden Robotern erlaubt bei einer zunehmenden Prozeß- und Produktkomplexität die Gestaltung neuer Formen der Manipulation und Bearbeitung und somit eine wesentliche Steigerung der Flexibilität der Fertigung.

Neben den Leistungsmerkmalen der Industrieroboter bestimmen vor allem die eingesetzten Peripherieeinrichtungen, Handhabungskomponenten und Sensoren die Fähigkeiten der Fertigungs- und Montagesysteme. Deren Möglichkeiten der Programmierung und Integrationsfähigkeit in ein übergreifendes Steuerungssystem sind maßgebend für die Akzeptanz durch den Anwender. Eine durchgängige informationstechnische Verknüpfung aller Komponenten in einer flexiblen Fertigungszelle und eine damit verbundene Informationstransparenz sind die Voraussetzung für eine effiziente Steuerung des Fertigungsablaufes.

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung und Realisierung eines Konzeptes zur Steuerung von Fertigungszellen mit kooperierenden Robotern, basierend auf der Nutzung der Leistungspotentiale aller Komponenten der Zelle und der Integration von Sensorinformationen zur Steuerung der Fertigungsvorgänge. Der Entwurf neuer funktionaler Eigenschaften der Roboter und der Sensoren sowie deren steuerungstechnische Einbindung in ein homogenes System der Steuerung einer Fertigungszelle standen dabei im Vordergrund.

Ausgangspunkt bildet die Analyse der Fähigkeiten, der Formen der Kooperation und der Struktur der Steuerung von mehreren zusammen agierenden Robotern. Darauf aufbauend, werden die Nutzenpotentiale des Einsatzes von kooperierenden Industrierobotern in der automatisierten Fertigung aufgezeigt. Besonders die Gesichtspunkte einer höheren Flexibilität, eines erweiterten Bewegungsvermögens und einer möglichen Kosteneinsparung werden dabei herausgestellt. Ausgehend von bestehenden Defiziten derzeitiger Steuerungssysteme von Industrierobotern wurden die Schwerpunkte der Entwicklung des Steuerungssystems für kooperierende Roboter und der Integration von Sensoren abgeleitet und umgesetzt.

Vor dem Hintergrund des steigenden Softwareaufwandes für komplexe Steuerungssysteme wurde ein Zellensteuerungssystem unter Verwendung von Methoden des Software Engineering konzipiert. Speziell für die Belange der Steuerung von Zellen mit Industrierobotern wurde ein Funktionsumfang zur Programmierung und Ausführung des Fertigungsablaufes, der Bedienung und Steuerung der Komponenten und der Erfassung von Maschinen- und Betriebsdaten realisiert. Eine anwendungsnahe Spezifikation der zur Ausführung eines Auftrages notwendigen Abläufe wird durch eine grafisch interaktive Programmierung und dessen Realisierung auf einem Zellenrechner ermöglicht.

Die Überlegungen zum Einsatz von mehreren flexiblen Handhabungsgeräten münden in ein Konzept zur kooperierenden Bewegungsführung von Robotern. Ausgehend von grundlegenden Bewegungsformen wurde die hierauf beruhenden Bahnplanungsmethoden zur Erzeugung unabhängiger und kooperierender Bahnen entwickelt. Das Verfahren eines virtuellen Masters erlaubt hierbei die Beschreibung von komplexen räumlichen Bewegungsbahnen. In diesem Zusammenhang galt es, die Frage nach der Erkennung und Abwendung möglicher Kollisionen in komplexen Anordnungen mehrerer Roboter zu analysieren. Durch den Einsatz einer vereinfachten Geometriemodellierung konnte eine Lösung zur On-line-Kollisionserkennung für zwei Industrieroboter aufgezeigt werden.

Die entworfenen Verfahren zur Bewegungsplanung bedürfen erweiterter Fähigkeiten der eingesetzten Robotersteuerungen. Auf der Basis eines hybriden und modularen Rechnersystems wurde ein Steuerungskonzept entwickelt, welches den Funktionsumfang der Bewegungsvorbereitung, der koordinierten Bahninterpolation und der Überwachung der Bewegung realisiert. Im Hinblick auf den Einsatz von kooperierenden Robotern wurden auf der Grundlage normierter Programmierstechniken für Industrieroboter geeignete Sprachelemente und Funktionalitäten für die Programmerstellung entworfen.

Die Möglichkeiten einer Flexibilisierung und Leistungssteigerung von Fertigungssystemen mit Industrierobotern durch den Einsatz von Sensoren wurden an Hand sensoreregelter Bewegungen transparent gemacht. Betrachtungen zum Nutzenpotential und den noch bestehenden Defiziten einer Sensorintegration sind vorangestellt worden. Aus den Untersuchungen zu verschiedenen Regelungsstrategien hinsichtlich ihres dynamischen Verhaltens konnten die hieraus resultierenden Eigenschaften für den Einsatz im Prozeß abgeleitet werden. Um die Rückführung der Sensorinformationen in den Bewegungsablauf zu gewährleisten, erfolgte die Entwicklung eines Konzeptes zur Sensor- und Positionsführung.

Durch die Anordnung von mehreren Basissensoren und der Nutzung intelligenter und konfigurierbarer Auswertesysteme konnten Profilsensoren für den Einsatz während der Bearbeitung und Montage entwickelt werden. Für die Erfassung der Lage und Anwesenheit von Werkstücken in einer Fertigungszelle wurde ein flexibler Lasersensor entworfen und realisiert, der die Steuerung des Zellenablaufes und die Einhaltung von Qualitätsparametern ermöglicht.

Die markanten Flexibilitätsdefizite von Greifern gegenüber Industrierobotern wurden durch den Aufbau eines flexiblen Mehrfingergreifers überwunden. Durch eine objektbezogene Beschreibung der auszuführenden Greifoperationen wird eine Steuerung des Greifers unter gleichzeitiger Integration einer Kraftsensorik erreicht.

Mit den dargestellten Arbeiten konnte ein Beitrag zu dem Gesamtanspruch der Steigerung der Flexibilität der Fertigung und der Gestaltung neuer Formen der Manipulation und Bearbeitung von Werkstücken durch den Einsatz von kooperierenden Robotern und der Integration von Sensoren geleistet werden. Es wurde der Nachweis erbracht, daß auch unter den Bedingungen der automatisierten Fertigung der Einsatz von mehreren flexiblen Handhabungsgeräten möglich ist.

# Literatur

1. Adept:  
V+ Language Ver. 11.0 - User's Guide.  
Adept Technology Inc., 1993
2. Adolphs, P.:  
Echtzeitfähiges Verfahren zur Kollisionsvermeidung für Industrieroboter in stationärer und sich dynamisch verändernder Umgebung.  
Dissertation, TH Darmstadt, 1992
3. Arkin, R.C.:  
Cooperation without Communication: Multiagent Schema-Based Robot Navigation.  
Journal of Robotic Systems 9 (1992) Nr. 3, S. 351-364
4. Bärnreuther, B.:  
Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen.  
Carl Hanser Verlag, München Wien, 1992
5. Bartosz, R.:  
FIP - Feldbus-Alternative aus Frankreich und Italien.  
Elektronik (1993) Nr. 10, S. 52, 73-77
6. Bechtloff, J.:  
Interpolationsverfahren höheren Grades für Robotersteuerungen.  
Braunschweiger Schriften zur Mechanik, 7-1992, 1992
7. Benameur, B.; Akhamlich, N.; Ouriachi, K.; Bourton, M.:  
Hierarchical Programming of Assembly Tasks.  
Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, California, S. 923-926, 1991
8. Bender, K.:  
PROFIBUS: Der Feldbus für die Automation.  
Carl Hanser Verlag, München Wien, 1990
9. Berg, J.O.:  
Path and Orientation Accuracy of Industrial Robots.  
Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology (1993) Nr. 8, S. 29-33
10. Blumann, W.; Horstmann, A.:  
Fertigungsautomatisierung mit MMS.  
VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993
11. Blüschke, A.; Schmucker, U.:  
Die Wirbelstromzeile - ein neuer Sensor zur Erkennung von Konturen und Materialeigenschaften metallischer Körper.  
Kongreßunterlagen zur Sensor'93. Nürnberg, S. 247-252. 1993
12. Borgolte, U.:  
Flexible, realzeitfähige Kollisionsvermeidung in Mehrroboter-Systemen.  
Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1991
13. Brasche, U.; Eschenbach, R.; Drüke, H.; Ewers, H.-J.; Müller, K.:  
Produktinnovation in der Sensorik.  
VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH, Berlin, 1991

14. Brooks, R. A.; Maes, P.; Matarik, M.; Mor, G.:  
Lunar Base Construction Robots.  
Proc. IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, Japan, pp. 389-392, 1990
15. Christensen, J.:  
Dreidimensionale Roboterführung mit dem LASAR™-System.  
VDI-Berichte Nr. 1094 "Intell. Steuerung und Regelung von Robotern", S. 855-863, 1993
16. Classe, D.:  
Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuereungskonzepte.  
Carl Hanser Verlag München Wien, 1988
17. Dauchez, P.; Fournier, A.; Jourdan, R.:  
Hybrid Control of a Two-Arm Robot for Complex Tasks.  
Robotics Autonomous Systems (1989) Nr. 5, S. 323-332
18. DeMarco, T.:  
Structured Analysis and System Specification.  
Englewood Cliff, N.J.: Prentice Hall, 1978
19. DIN:  
Industrieroboter, Programmiersprache, Industrial Robot Language (IRL), DIN 66312, Teil 1.  
Beuth Verlag, Berlin, 1993
20. DIN:  
Montage und Handhabungstechnik, DIN 2860.  
Beuth Verlag, Berlin, 1990
21. DIN:  
Industrieroboter, Programmiersprache, Industrial Robot Language (IRL), DIN 66312, Teil 1.  
Beuth Verlag, Berlin, 1993
22. Dohaut, D.; Monacelli, E.:  
Concurrent Programming for Robotic Applications Using an Interpreter.  
Proc. of the Int. Conf. CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future, S. 1226-1232. 1992
23. Drews, P.; Fuchs, K.; Wagner, R.; Willms, K.:  
Prozeßrechner koordiniert verschiedene Roboter mittels Sensorinformationen.  
Robotersysteme (1987) Nr. 3, S. 161-166
24. Drews, P.; Zunker, L.:  
Echtzeit-Bahnplanung eines Roboters unter Sensoreinsatz.  
Robotersysteme (1989) Nr.5, S. 213-218
25. Duellen, G.; Kirchhoff, U.; Held, J.; Münch, H.:  
Automatische Bewegungssynthese für bahnbezogene kooperierende Industrieroboter.  
Robotersysteme (1987) Nr. 3, S. 107-113
26. Dungere, O.v.; Schmidt, G.:  
Vorbereitende und begleitende Ablaufplanung für flexible Montagezellen in industrieller Umgebung.  
Robotersysteme (1990) Nr. 6, S. 225 - 235
27. Eißler, W.; Knappmann, R. J.:  
Praktischer Einsatz von berührungslos arbeitenden Sensoren.  
expert Verlag, Ehningen bei Böblingen, 1989



28. Endress, U.H.:  
Sensoren als Fundament der Prozeßinformatik.  
atp 33 (1991) Nr. 4, S. 171-177, 1991
29. Feldmann, K.:  
Wettbewerbsfähigkeit durch Integration neuer Technologien und optimierter Prozeßketten.  
Fachtagung "Flexible Produktionssysteme für innovative Elektronik", Productronica, 1993
30. Feldmann, K.:  
Integrierte Datenverarbeitung in der Produktion: Chance und Herausforderung für den  
Mittelstand.  
Tagungsunterlagen "Fünftes Regenburger CIM-Anwenderforum", Regensburg, S. 4-15, 1991
31. Feldmann, K.; Schönherr, U.; Zeller, J.:  
Fast Sensory Feedback for Demanding Robot Applications in New Technologies.  
Proc. of the 25th Int. Symp. on Industrial Robots, Hannover, Germany, S. 549-554, 1994
32. Feldmann, K.; Schönherr, U.; Zeller, J.:  
Programming and Control of Laser Beam Processing by Fast Sensor Guided Robots.  
Proc. of Int. Conf. Laser Assisted Net shape Engineering (LANE'94), S.749-758, 1994
33. Feldmann, K.; Schönherr, U.; Zeller, J.:  
Multisensor Integration for Sensor Guided Robots.  
Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. München, S. 1730-1735, 1994
34. Franke, E.A.; Sturdivant, V.R.; Nedungadi, A.:  
Sensor Integrated Control for Manipulators.  
Proc. of Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, Los Angeles, S. 791-796, 1990
35. Freund, E.; Bühler, C.:  
Intelligent Robot Systems.  
Proc. of IEEE Int. Workshop on Intelligent Motion Control, S. SL1-7, 1990
36. Freund, E.; Hoyer, H.:  
Realtime Pathfinding in Multirobot Systems Including Obstacle Avoidance.  
The Int. Journal of Robotic Research vol.7 (1988) no.1, S. 42-70
37. Fukuda, T.; Buss, M.; Hosokai, H.; Kawauchi, Y.:  
Cell Structured Robot System CEBOT: Control Planning and Communication Methods.  
Robotics and Autonomous Systems 7 (1991), S. 239-248
38. Glas, J.:  
Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware.  
IWB Forschungsberichte 61, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1993
39. Gramm, U.:  
EPA - die erweiterte MAP-Architektur für Echtzeit-Kommunikation.  
Elektronik (1990) Nr. 4, S. 63-70, Elektronik (1990) Nr. 5, S. 79-83, Elektronik (1990) Nr. 6,  
72-83, Elektronik (1990) Nr. 7, S. 50-59, Elektronik (1990) Nr. 8, S. 56-62
40. Haberland, R.; Seidel, K.-H.:  
Kapazitives Sensorsystem nach dem Impulsladeverfahren.  
VDI-Berichte Nr. 677, Düsseldorf, S. 489-493, 1988
41. Hartley, D.J.; Pirbhai, I.A.:  
Strategien für die Echtzeit-Programmierung.  
Carl Hanser Verlag, München Wien, 1993

42. Hashimoto, M.; Oba, F.; Nakahara, H.; Imamaki, K.; Eguchi, T.:  
Trajectory Generation and Tracking Control Methods for a Multiple Transfer Robots System.  
Proc. IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, S. 799-804, 1991
43. Heerens, W.:  
Application of capacitive techniques in sensor design.  
Journal of Physics E:Sci. Instrum. 19 (1986), S. 897-906
44. Heisel, U.; Richter, F.:  
Drehen ist besser als wechseln.  
Roboter (1995) Nr.8
45. Hirzinger, G.:  
Das Raumfahrt-Robotik-Experiment ROTEX - Konzepte, Erfahrungen und Perspektiven.  
VDI-Berichte Nr. 1094, S. 21-50, 1993
46. Höfler H.; Schmidtke G.:  
Schnelle Qualitätskontrolle mit optischem 3-D-Meßsystem.  
Sensor '93, Kongreßband III, S. 123-128, 1993
47. Horn, A.:  
Optische Sensorik zur Bahnführung von Industrierobotern mit hohen Bahngeschwindigkeiten.  
Springer Verlag, Berlin, 1994
48. Hoshino, T.; Furuta, K.:  
Real-Time Control of a Multiple-Arm System by Large-Scale Multiprocessing.  
Control Engineering Practice vol. 1 (1993) No. 4, S. 645-654
49. Hussaini, S.S.; Jakopak, D.E.:  
Multiple Manipulators and Robotic Workcell Coordination.  
Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, S. 1236-1241, 1986
50. Interlink:  
Force Sensing Resistor - Technische Übersicht.  
Interlink Electronics Europe, Luxemburg, 1992
51. Isermann, R.:  
Digitale Regelsysteme.  
Band I Springer Verlag, Berlin, 1988
52. Isermann, R.:  
Identifikation dynamischer Systeme Band I.  
Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1988
53. Ishida, Y.; Asama, H.; Endo, I.; Ozaki, K.; Matsumoto, A.:  
Communication and Cooperation in a Autonomous and Dezentralized Robot System.  
IFAC Int. Symposium on Distributed Intelligent Systems, S. 299-304, 1991
54. ISO:  
Information Process Systems - Open System Interconnection - Basis Reference Model  
(ISO 7498).  
International Organisation for Standardisation, New York, 1984
55. ISO:  
Industrial Automation Systems - Manufacturing Message Spezifikation -Part 1; Part 2  
(ISO 9506-1, ISO 9506-2).  
International Organisation for Standardisation, New York, 1990

56. ISO:  
Industrial Automation Systems - Manufacturing Message Specification -Part 1: Companion Standard for Robotics (ISO 9506-3).  
International Organisation for Standardisation, New York, 1991
57. ISO:  
Information Processing Systems - Local Area Networks, Part 2: Logical Link Control Addendum 2: Acknowledged Connectionless-mode service and protocol, Typ 3 (ISO 8802-2).  
International Organisation for Standardisation, New York, 1989
58. ISO:  
Information Processing Systems - Specification of Abstract Syntax Notation One (ASN.1) (ISO 8824 ).  
International Organisation for Standardisation, New York, 1987
59. ISO:  
Manipulating Industrial Robots - Programming Language for Robots (PLR).  
ISO-Working Draft ISO/WD 11513.1, 1991
60. Jacobson, S.C., Ivelsen, E.K., Knutti, D.F., Johnson, R.T., Biggers, K.B.:  
Design of the Utah/MIT Dextrous Hand.  
Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, S. 1520-1532; 1986
61. Jimenez, J.; Sevillano, J.L.; Balcells, A.C.; Diaz, F. Breu, A.C.:  
RISC-Based Architectures for Multiple Robot Systems.  
Microprocessors and Microsystems vol.16 (1992) no.4, S.177-186,
62. Karstedt K.:  
Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung.  
Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1990
63. Kasagami, F.; Ishimatsu, T.; Watanabe, S.; Izawa, A.; Koujina, Y.:  
Coordinated Motion of ARC Welding Robots using Parallel Data Processors.  
Proc. of the IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics, Control, Instrumentation and Automation, S. 656-663, 1992
64. Kegler, A.:  
Kapazitive Oberflächensensoren mit Feldfokussierung.  
VDI-Berichte Nr. 677, Düsseldorf, 1988
65. Keppeler, M.:  
Führungsgrößenerzeugung für numerisch bahngesteuerte Industrieroboter.  
Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1986
66. Khatib, O.:  
Cooperative Mobile Robotic Manipulation.  
Proc. of the Int. Conf. on Robotics, Vision and Parallel Processing for Industrial Automation, S. 371-377, 1994
67. Kuntze, H.-B.; Brodbeck, E.; Grünbacher, S.; Jacobasch, A.:  
Kraft- und Positionsregelung eines Industrieroboters zur Bearbeitung komplexer Werkstücke.  
VDI Berichte Nr. 598, S. 99-117, 1986
68. Lang, J.; Meier, W.; Thomma, W.:  
Anwendung von Fortgeschrittenen Positions-Kraft-Regelungskonzepten bei einem Zweiarmrobotersystem.  
Robotersysteme (1991) Nr. 7, S. 155-163

69. Laperriere, L. ELMaraghy, H.A.:  
Automatic Generation of Robotic Assembly Sequences.  
The Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology (1991) Nr. 6, S. 299-316
70. Levine, J.R.; Mason, T.; Brown, D.:  
lex & yacc.  
O'Reilly & Associates, Sebastopol, 1992
71. Li, W.:  
Automatische Bestimmung kollisionsfreier Bewegungsbahnen für Industrieroboter.  
Robotersysteme (1990) Nr. 6, S. 218-224
72. Lindau, U.:  
Objektorientierte Zellensteuerung.  
ZwF 88 (1993) Nr. 7-8, S. 355-357
73. Lu J.:  
Ein dreidimensionales Bildverarbeitungssystem für die Automatisierung visueller Prüfvorgänge.  
Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1993
74. Mämpel, W.:  
Aufbau und Arbeitsweise von Arcnet.  
Design & Elektronik (1991) Nr. 6, S. 46-51, Design & Elektronik (1991) Nr. 7, S. 54-60
75. Mason, M.T.:  
Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators.  
In: Robot Motion, Brady, M et. al. (edt.), MIT Press Cambridge, S. 373-404, 1984
76. Math Works:  
MATLAB - Optimization Toolbox.  
The Math Works, Inc, Natick, USA, 1992
77. Matsushita:  
MG-F Fotoelektrische Sensoren mit Lichtleiter.  
Produktinformation Matsushita Inc., 1992
78. May, F.B.; Kaye, A.R.; Mahmoud, S.A.:  
Control and Communication for Multiple Cooperating Robot.  
Robotics & Computer-Integrated Manufacturing vol. 6 (1989) no. 1, pp.37-53
79. Menzel, R., Wöfl, K., Pfeiffer, F.:  
Entwicklung einer hydraulischen Hand.  
VDI Berichte Nr. 1094, S. 845-854, 1993
80. Microware Systems:  
OS-9 Advanced System Software.  
User Manual, Microware Systems Corp., Des Moines, 1987
81. Milberg, J.; Schmidt, M.:  
Stand und Trend der flexiblen Montageautomatisierung in der Feinwerktechnik.  
VDI-Berichte Nr. 747, S. 15-40, 1989
82. Münch, H.:  
Bewegungssynthese zur Steuerung redundanter und kooperierender Kinematiken.  
Carl Hanser Verlag, München Wien, 1991
83. Münch, H.; Sorowka, D.:  
Sensorgestützte, lage- und kraftgeregelte Automatisierung von Montageaufgaben.  
ZwF-CIM 89 (1994) Nr. 9, S. 430-432

84. N.N.:  
So kommen die Räder an's Auto.  
Roboter (1994) Nr. 2, S. 10-12, 1994
85. Nagao, Y.; Ohta, H.; Urabe, H.; Matsuura, S.:  
Petri Net Based Programming System for FMS.  
Robotics and Flexible Manufacturing Systems (1992) Nr. 4, S. 295-304,
86. Nagata, M.:  
Parallel Detektion and Resolution of Deadlocks in Multiple Robot Systems.  
Proc. of the IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics, Control, Instrumentation and Automation  
, S. 577-582, 1992
87. Nagata, T.; Honda, K.; Teramoto, Y.:  
Multirobot Plan Generation in a Continuous Domain: Planning by Use of Plan Graph and  
Avoiding Collisions Among Robots.  
IEEE Journal of Robotics and Automation vol. 4 (1988) no.1, S. 4-13
88. National Semiconductors:  
LM 628 Precision Motion Controller.  
Special Purpose Linear Devices, National Semiconductors Co., S. 4-15 - 4-35, 1989
89. Nof, S.Y.:  
The Multiple-Robot Assembly Plan Problem.  
Journal of Intelligent and Robotic Systems (1993) 5, Netherland, pp. 57-71
90. On Time:  
RealTime Multitasking Kernel für Programmiersprache C.  
Benutzerhandbuch Version 3.0, On Time Informatik GMBH, 1991
91. Papadimitriou, I.:  
Steuerungskonzepte für automome mobile Unterwasser-Roboter.  
Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8, Nr. 258, VDI Verlag, Düsseldorf, 1991
92. Papageorgiou, M.:  
Optimierung.  
Oldenbourg Verlag, München, 1991
93. Pritschow, G.; Bauder, M.:  
Steuerungsstruktur und Programmierkonzept zur On-line-Bewegungskordinierung zweier  
Roboter in einer flexiblen Montagezelle.  
Robotersysteme (1990) Nr. 6, S. 211- 217
94. Pritschow, G.; Dalacker, M.; Kurz, J.  
Ein mobiler Roboter zur automatisierten Erstellung von Mauerwerk auf der Baustelle.  
VDI-Berichte Nr. 1094. S. 491-500, 1993
95. Pritschow, G.; Frager, O.:  
Roboterzellen-Programmierung: die Sprache IRL und der Zwischencode ICR.  
Robotersysteme (1992) Nr. 8, S. 25-32
96. Pritschow, G.; Horn, A.:  
Dynamik derzeitiger Sensorregelkreise für Industrieroboter.  
Robotersysteme (1991) Nr. 7, S. 178-184
97. Pritschow, G.; Klingel, H.; Bauder, M.; Horn, A.:  
Erhöhung der Bahngenaugigkeit von Industrierobotern.  
Robotersysteme (1992) Nr. 8, S. 162-170

98. Pritschow, G.; Koch, T.:  
Koordinierte Bahnführung zweier Roboter.  
Robotersysteme (1991) Nr. 7, S. 133-138
99. Pritschow, G.; Spur, G; Weck, M.:  
Leit- und Steuerungstechnik in flexiblen Produktionsanlagen.  
Carl Hanser Verlag, München Wien, 1991
100. Pritschow, G.; Spur, G; Weck, M.:  
Roboteranwendungen für die flexible Fertigung.  
Carl Hanser Verlag, München Wien, 1994
101. Pritschow, G.; Uhl, A.; Demel, P.:  
Flexibility and Cost Efficiency with an Open Multitasking Control Architecture for Robots.  
Proc. of the 25th Int. Symp. on Industrial Robots, Germany, S. 395-402, 1994
102. Qu, Z.; Kauppila, J.; Moio, T.:  
A Seam Tracking system for Sheet Metal Pipe Fabrication by Laser Beam Welding.  
Proc. of Int. Conf. Laser Assisted Net shape Engineering (LANE'94), S. 741-748, 1994
103. Rabinowitz, G.; Mehrez, A.; Samaddar, S.:  
A Scheduling Model for Multirobot Assembly Cells.  
The International Journal of Flexible Manufacturing Systems (1991) Nr. 3, S. 149-180
104. Reinhart, G.; Lindl, H.; Trunzer, W.  
Planning and Integration of Laser Systems into Flexible Production Structures.  
Proc. of Int. Conf. Laser Assisted Net shape Engineering (LANE'94), S. 687-704, 1994
105. Reinisch, H.:  
Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen.  
Carl Hanser Verlag, München Wien, 1992
106. Roach, J.W.; Boaz, M.N.:  
Coordinating the Motions of Robot Arms in a common Workspace.  
IEEE Journal of Robotics and Automation vol.RA-3 (1987) no.5, S. 437-444
107. Rusch, M.:  
Beitrag zur Führungsgrößenerzeugung für freie und Kraftschlüssige Bewegung von Industrierobotern.  
Carl Hanser Verlag, München Wien, 1993
108. Sackmann, F.:  
Mit MS-Windows Automatisierungsaufgaben lösen.  
atp 35 (1993) Nr.11, S. 624-628
109. Salisbury, J.K., Mason, M.T.:  
Robot Hands and the Mechanics of Manipulation.  
Cambridge, MA, MIT Press; 1985
110. Scheller, J.:  
Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen.  
Carl Hanser Verlag, München Wien, 1991
111. Schmid, D.:  
Fortschrittliche Robotersteuerungstechnik.  
Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1990
112. Schmid, D.; Sichler, K.; Michalak, E.:  
Sensorgestützte Bahnprogrammierung beim Laserschweißen mit Roboter.  
Robotersysteme 8 (1992), S. 21-24

113. Schmidt, J.; Bott, K.:  
Hartes sanft entgratet- Flexible Fertigungszelle zum Entgraten von Keramik.  
Roboter (1991) Nr. 8, S. 28-30
114. Schnell, G.:  
Sensoren in der Automatisierungstechnik.  
Viehweg Verlag, Braunschweig, 1991
115. Schönherr, U.:  
Ein dreidimensionaler Lasersensor für die Fertigungsautomatisierung.  
IGT-Fachbericht 126: Sensoren - Technologie und Anwendung, S. 597-602, 1994
116. Schönherr, U.; Zeller, J.:  
Bestimmung von Werkstückparametern mit Hilfe vektoriell Basissensoren.  
Kongreßband Sensor'95, Nürnberg, S. 795-798, 1995
117. Schraft, R.D.  
Vom Industrieroboter zum Serviceroboter - Stand der Technik, Chancen und Grenzen.  
VDI-Berichte Nr. 1094, S. 1-20, 1993
118. Schraft, R.D.:  
Schlüsseltechnologie Automatisierungstechnik.  
wt- Produktion und Management 83 (1993) Nr. 9, S.131
119. Schreyer, C.; Bender, H.:  
Echtzeitsoftware systematisch geplant.  
Elektronik (1994) Nr. 8, S.142-149
120. Schrödel, O.:  
Flexible Werkstattsteuerung mit Objektorientierten Softwarestrukturen.  
Carl Hanser Verlag, München Wien, 1992
121. Sendler, U.:  
Offline-programmiertes Laserschneiden im Automobilbau.  
VDI-Z 136 (1994) Nr.1/2, S. 28-30
122. Shaffer, C.A.; Herb, G.M.:  
A Real-Time Robot Arm Collision Avoidance System.  
IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.8 (1992) No.2, S. 149-160
123. Sick:  
DME 2000 - Entfernungsmeßgerät.  
Betriebsanleitung DME 2000, Firmendokumentation, 1991
124. Sommer, E.:  
Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen.  
Carl Hanser Verlag, München Wien, 1992
125. Spur, G.:  
Produktionsfabriken im Wandel.  
ZwF-CIM 89 (1994) Nr. 1-2, S. 1
126. Stansfield, S.A.:  
Robotic Grasping of unknown Objects: A Knowledge-Based Approach.  
The Int. Journal of Robotic Research vol.10 (1991) no.4. S. 314-326
127. Stettmer, J.:  
Sensorgestützte Kollisionsvermeidung bei Industrierobotern.  
Verlag Shaker Aachen, 1994

128. Taipale, T.; Hirai, S.:  
A Comparative Study of Multi-Robot Systems.  
Bulletin of Elektrotechnical Laboratory vol. 56, S. 30-60, 1992
129. Tao, J.M.; Luh, J.Y.S.; Zheng, Y.F.:  
Compliant Coordination of Two Moving Industrial Robots.  
IEEE Transaction on Robotics and Automation 6 (1990) Nr. 3, S. 322-330
130. Tsai, C.-K.:  
Multiple Robot Coordination and Programming.  
Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, S. 978-984, 1991
131. VDI:  
Rechnerintegrierte Konstruktion und Produktion, Band 8: Flexible Montage.  
VDI-Gesellschaft Produktionstechnik (ADB), VDI Verlag, Düsseldorf, 1992
132. Walze, H.:  
FIAS - Japaner machen Nägel mit Köpfen.  
Elektronik (1992) Nr. 11, S. 110-114
133. Wedekind, H.:  
Verteilte Systeme, Grundlagen und zukünftige Entwicklungen.  
BI Wissenschaftsverlag, Mannheim, 1994
134. Welling, A.:  
Effektiver Einsatz bildgebender Sensoren zur Flexibilisierung automatisierter  
Handhabungsvorgänge.  
Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1994
135. Wiwic, C.:  
RTX51Tiny für 8051.  
Design & Elektronik (1994) Nr.12, S. 34-36
136. Wloka, D.W.:  
Robotersystem I, Technische Grundlagen.  
Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1992
137. Woelfl, K., Pfeiffer, F.:  
Grasp Strategies for a Dextrous Robotic Hand.  
Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, S. 366-373, 1994
138. Wöhlke, G.:  
Object Manipulation with Dextrous Multi-Finger Hands: Improved Computation Method; Proc.  
of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, S. 1469-1476, 1994
139. Wöhlke, G.:  
The Karlsruhe Dextrous Hand: Grasp Planning, Programming & Real-Time Control.  
Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, S. 352-359; 1994
140. Yin, Q.; Zheng, Y.F.:  
Performance Analysis of Token Bus LAN in Coordinating Multiple Robots.  
Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, S. 455-460, 1992
141. Zamperoni, P.:  
Methoden der digitalen Bildverarbeitung.  
F. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 1989
142. Zeller J.; Schönherr U.:  
Sensorintegration in moderne Robotersteuerung.  
VDI-Berichte Nr. 1094, S. 691-700, 1993



143. Zeller, F.-J.:  
Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter.  
Carl Hanser Verlag, München Wien, 1995
144. Zheng, Y.F.:  
Kinematik and Dynamiks of Two Industrial Robots in Assembly.  
Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, S. 1360-1365, 1989
145. Zheng, Y.F.: Luh, J.Y.S.: Jia, P.F.:  
Integration Two Industrial Robots into a Coordinated System.  
Computer in Industry (1989) 12, S. 285-298,
146. Zöllner, B.:  
Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion.  
Carl Hanser Verlag, München Wien, 1995
147. ZVEI  
Konfigurieren statt Programmieren - Empfehlung des ZVEI-Arbeitskreises "Systemaspekte".  
Elektronik (1994) Nr. 8, S. 112-117, Elektronik (1994) Nr. 9, S. 90-96, Elektronik (1994)  
Nr. 10, S. 82-85



# Lebenslauf

## Persönliches

Uwe Schönherr  
geb. am 20. Februar 1962 in Chemnitz  
verheiratet mit Grit Schönherr, geb. Schubert, 3 Kinder  
Eltern: Horst Schönherr, Eva Schönherr, geb. Ullrich

## Schulbildung

1968 - 78 Polytechnische Oberschule in Chemnitz

## Berufsausbildung

1978-81 Berufsausbildung zum Elektromonteur mit Abiturabschluß bei Numerik Chemnitz

## Wehrdienst

1981 - 83 Grundwehrdienst

## Studium

1983 - 88 Studium der Technischen Kybernetik und Automatisierungstechnik an der Technischen Universität Chemnitz,  
Abschluß: Diplom-Ingenieur

## Berufstätigkeit

1981/1983 Elektromonteur bei Numerik Chemnitz

1988-90 Anstellung als Ingenieur im Bereich Wartung technischer Spezialausrüstungen der Elektronikfertigung bei Textimaelektronik Chemnitz

1990-91 Laboringenieur am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

1991-95 wissenschaftlicher Angestellter in der Gruppe für Steuerungs- und Sensortechnik am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
Leiter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann

seit 1995 Oberingenieur der Forschungsgruppe für Steuerungs- und Sensortechnik am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik



# Reihe Fertigungstechnik Erlangen

Band 1

Andreas Hemberger

**Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch  
wissensbasierte Systeme**

208 Seiten, 107 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 2

Detlef Classe

**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montage-  
systeme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**

194 Seiten, 70 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 3

Friedrich-Wilhelm Nolting

**Projektiertung von Montagesystemen**

201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Kartoniert.

Band 4

Karsten Schlüter

**Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz  
der Simulationstechnik**

177 Seiten, 97 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 5

Shir-Kuan Lin

**Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern**

168 Seiten, 46 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 6

Rudolf Nuss

**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem  
Laserstrahlschneiden**

206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989. Kartoniert.

Band 7

Wolfgang Scholz

**Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter  
Montageanlagen**

194 Seiten, 89 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 8

Hans-Jürgen Wißmeier

**Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-  
Fließpreßmatrizen**

179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989. Kartoniert.

Band 9

Rainer Eisele

**Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der  
Produktion**

183 Seiten, 86 Bilder. 1990. Kartoniert.

- Band 10  
Rolf Pfeiffer  
**Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik**  
216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990. Kartoniert.
- Band 11  
Herbert Fischer  
**Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung**  
201 Seiten, 82 Bilder. 1990. Kartoniert.
- Band 12  
Gerhard Kleineidam  
**CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung**  
203 Seiten, 107 Bilder. 1990. Kartoniert.
- Band 13  
Frank Vollertsen  
**Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls**  
XIII + 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990. Kartoniert.
- Band 14  
Stephan Biermann  
**Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern**  
VIII + 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 15  
Uwe Geißler  
**Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle**  
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 16  
Frank Oswald Hake  
**Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen**  
XIV + 166 Seiten, 77 Bilder. 1991. Kartoniert.
- Band 17  
Herbert Reichel  
**Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung**  
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 18  
Josef Scheller  
**Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen**  
198 Seiten, 65 Bilder. 1991. Kartoniert.
- Band 19  
Arnold vom Ende  
**Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize**  
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 20  
Joachim Schmid  
**Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern**  
XIV + 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 21

Egon Sommer

**Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen**

188 Seiten, 102 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 22

Georg Geyer

**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage**

192 Seiten, 112 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 23

Rainer Flohr

**Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)**

186 Seiten, 79 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 24

Alfons Rief

**Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung**

VI + 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 25

Christoph Thim

**Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation**

188 Seiten, 74 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 26

Roland Müller

**CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen**

141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992. Kartoniert.

Band 27

Günther Schäfer

**Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung**

195 Seiten, 76 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 28

Martin Hoffmann

**Entwicklung einer CAD/CAM-Prozeßkette für die Herstellung von Blechbiegeteilen**

149 Seiten, 89 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 29

Peter Hoffmann

**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen : Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen**

186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992. Kartoniert.

Band 30

Olaf Schrödel

**Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen**

180 Seiten, 84 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 31

Hubert Reinisch

**Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen**

XI + 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 32

Brigitte Bärnreuther

**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens  
von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**  
XI + 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. Kartonierte.

Band 33

Joachim Hutfless

**Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung  
einer CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage**  
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993. Kartonierte.

Band 34

Uwe Günzel

**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative  
und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung**  
XIV + 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993. Kartonierte.

Band 35

Bertram Ehmann

**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener  
Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**  
XV + 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. Kartonierte.

Band 36

Harald Kolléra

**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems  
für das Laserstrahlschneiden**  
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993. Kartonierte.

Band 37

Stephanie Abels

**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen  
in einem integrierten Simulationssystem**  
188 Seiten, 88 Bilder. 1993. Kartonierte.

Band 38

Robert Schmidt-Hebbel

**Laserstrahlbohren durchflußbestimmender  
Durchgangslöcher**  
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993. Kartonierte.

Band 39

Norbert Lutz

**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit  
XeCl-Excimerlaserstrahlung**  
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994. Kartonierte.

Band 40

Konrad Grampp

**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an  
Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien**  
178 Seiten, 88 Bilder. 1995. Kartonierte.

Band 41

Martin Koch

**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung  
in der Investitionsgüterindustrie**  
169 Seiten, 68 Bilder. 1995. Kartonierte.

Band 42

Armin Gropp

**Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem  
gepulsten Nd:YAG-Laser**  
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995. Kartonierte.



Band 43  
Werner Heckel  
**Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung  
mit dem Lichtschnittverfahren**  
149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 44  
Armin Rothhaupt  
**Modulares Planungssystem zur Optimierung  
der Elektronikfertigung**  
180 Seiten, 101 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 45  
Bernd Zöllner  
**Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion**  
195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 46  
Bodo Vormann  
**Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung  
komplexer Blechbiegeteile**  
126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 47  
Peter Schnepf  
**Zielkostenorientierte Montageplanung**  
144 Seiten, 75 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 48  
Rainer Klotzbücher  
**Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung  
in flexiblen Fertigungssystemen**  
156 Seiten, 62 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 49  
Wolfgang Greska  
**Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen**  
144 Seiten, 96 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 50  
Jörg Franke  
**Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien  
für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)**  
196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 51  
Franz-Josef Zeller  
**Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter**  
190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 52  
Michael Solvie  
**Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen**  
200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 53  
Robert Hopperdietzel  
**Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie**  
180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996. Kartoniert.

Band 54  
Thomas Rebhahn  
**Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern –  
Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen**  
148 Seiten, 61 Bilder, 4 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 55

Henning Hanebuth

**Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik**

154 Seiten, 58 Bilder, 10 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 56

Uwe Schönherr

**Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen  
mit kooperierenden Robotern**

188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996. Kartoniert.