





Lehrstuhl für  
Montagesystemtechnik und Betriebswissenschaften  
der Technischen Universität München

**Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch  
aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten**

**Tim Angerer**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart
2. Hon.-Prof. Dr.-Ing. G. Hirzinger

Die Dissertation wurde am 17.09.2003 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 15.01.2004 angenommen.



***Forschungsberichte***

---

***iwb***

***Band 185***

***Tim Angerer***

***Effizienzsteigerung in der  
automatisierten Montage durch  
aktive Nutzung mechatronischer  
Produktkomponenten***

---

***herausgegeben von***

***Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh***

***Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart***

---

***Herbert Utz Verlag***



# Forschungsberichte iwb

Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen  
und Betriebswissenschaften  
der Technischen Universität München

herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh  
Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart  
Technische Universität München  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation  
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte  
bibliografische Daten sind im Internet über  
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2004

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch  
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des  
Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der  
Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege  
und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben,  
auch bei nur auszugsweiser Verwendung, vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2004

ISBN 3-8316-0336-7

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München  
Tel.: 089/277791-00 · Fax: 089/277791-01

## Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung. Denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren und Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Was wir wissen, ist ein Tropfen,  
was wir nicht wissen – ein Ozean.

*Isaac Newton*



## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh, den Leitern dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerd Hirzinger, dem Leiter des Instituts für Robotik und Mechatronik am Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt in Oberpfaffenhofen, möchte ich mich für die Übernahme des Koreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts sowie allen Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, recht herzlich. Meinem Bruder Christoph und Herrn Dr.-Ing. Paul Ross danke ich besonders für die zahlreichen Diskussionen und wertvollen Anregungen, die zum Gelingen dieser Arbeit maßgeblich beigetragen haben.

Nicht zuletzt gilt ein ganz besonderer Dank meinen Eltern, die mir meine Ausbildung ermöglicht haben.

Claudia, meiner Frau, möchte ich dafür danken, dass Sie mich zu jeder Zeit motiviert und angetrieben und an unzähligen Abenden und Wochenenden auf mich verzichtet hat.

München, im März 2004

*Tim Angerer*



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation .....	1
1.2	Gliederung der Arbeit .....	6
<b>2</b>	<b>Situationsanalyse.....</b>	<b>9</b>
2.1	Überblick .....	9
2.2	Flexibilität .....	10
2.2.1	Begriffsdefinition .....	10
2.2.2	Arten von Flexibilität in der Montage .....	12
2.2.3	Maßnahmen zur Flexibilisierung von Montagesystemen .....	13
2.3	Qualität .....	14
2.3.1	Begriffsdefinition .....	15
2.3.2	Qualitätssichernde Maßnahmen in der Montage.....	15
2.3.3	Montagenahe Qualitätssicherung .....	17
2.3.4	Qualitätssicherung durch Nutzung der sensorischen Eigenschaften von Aktoren .....	19
2.4	Industrieroboter .....	24
2.4.1	Anforderungen an Robotersysteme .....	25
2.4.2	Industrierobotersteuerung.....	26
2.4.3	Schnittstellen in Robotersystemen .....	27
2.5	Mechatronik .....	34
2.5.1	Entstehung und Definition des Begriffes Mechatronik.....	34
2.5.2	Mechatronische Systeme .....	36

2.5.3	Mechatronische Komponenten.....	42
2.5.4	Beispiele mechatronischer Systeme.....	45
2.6	Zusammenfassung .....	48
<b>3</b>	<b>Zielsetzung der Arbeit .....</b>	<b>49</b>
<b>4</b>	<b>Nutzung mechatronischer Produktkomponenten im automatisierten Montageprozess.....</b>	<b>53</b>
4.1	Überblick.....	53
4.2	Anforderungen an das Montagesystem .....	54
4.2.1	Flexibilität .....	55
4.2.2	Montagequalität.....	55
4.3	Integration von Produktkomponenten in ein Robotersystem .....	57
4.3.1	Zusammenschluss von Produkt und Robotersystem.....	57
4.3.2	Kommunikationskreis .....	59
4.3.3	Anforderungen an die einzelnen Teilsysteme .....	70
4.4	Anwendungsszenarien .....	73
4.4.1	Nutzung der Produktsensoren .....	73
4.4.2	Nutzung der Produktaktoren .....	79
4.4.3	Nutzung der Produktsoftware .....	82
4.4.4	Nutzung von Produktfunktionalitäten .....	84
4.5	Bewertung der Nutzung mechatronischer Produktkomponenten.....	85
4.6	Hinweise zur Produktkonstruktion .....	88
4.7	Zusammenfassung .....	91

<b>5</b>	<b>Kommunikationsschnittstelle .....</b>	<b>93</b>
5.1	Überblick .....	93
5.2	Anforderungen an die Kommunikationsschnittstelle.....	94
5.2.1	Funktion.....	94
5.2.2	Flexibilität.....	98
5.2.3	Programmierung.....	98
5.3	Konzeption der Kommunikationsschnittstelle .....	100
5.3.1	Randbedingungen .....	100
5.3.2	ISO/OSI-Schichten der Schnittstelle .....	101
5.3.3	Hardwareteil der Schnittstelle .....	103
5.3.4	Softwareteil der Schnittstelle.....	103
5.4	Zusammenfassung.....	107
<b>6</b>	<b>Auswirkung auf die Montagesystemplanung.....</b>	<b>109</b>
6.1	Überblick .....	109
6.2	Planungsvorgehen .....	110
6.2.1	Planungsvorbereitung .....	111
6.2.2	Kommunikationsplanung .....	112
6.2.3	Grob- und Feinplanung.....	114
6.3	Zusammenfassung.....	115
<b>7</b>	<b>Anwendungsbeispiele .....</b>	<b>117</b>
7.1	Überblick .....	117
7.2	Montage eines Magnetventils .....	117
7.2.1	Aufgabenstellung und Analyse des Montageprozesses .....	117

## **Inhaltsverzeichnis**

---

7.2.2	Umsetzung des Montagekonzeptes .....	118
7.2.3	Bewertung .....	119
7.3	Automatisierte Montage der SpaceMouse®.....	121
7.3.1	Aufgabenstellung .....	124
7.3.2	Analyse der Montageprozesse.....	126
7.3.3	Umsetzung der Automatisierung.....	128
7.3.4	Umsetzung der Kommunikationsschnittstelle .....	137
7.3.5	Bewertung des Systems.....	141
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>147</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>151</b>
<b>10</b>	<b>Glossar .....</b>	<b>165</b>

# 1 Einführung

## 1.1 Motivation

Die zunehmende Globalisierung der Märkte führt zu einem immer stärker werdenden Wettbewerb unter den Unternehmen. Um gegenüber der starken Konkurrenz vor allem aus Niedriglohngeländern wie Südostasien, China oder Osteuropa weiterhin bestehen zu können, sind Unternehmen gezwungen, ihre Produktion zu rationalisieren. Unter Rationalisierung sind dabei sämtliche Maßnahmen zu verstehen, die es ermöglichen, mit geringstem Aufwand an Material, Energie, menschlicher Arbeitskraft, Zeit, Information und Kapital das bestmögliche Produktionsergebnis zu erzielen. Rationalisierungsmaßnahmen lassen sich in einen organisatorischen Bereich und einen technischen Bereich aufteilen. Der organisatorische Bereich beinhaltet hauptsächlich Abstimmungsprozesse und eine arbeitswissenschaftliche und arbeitsorganisatorische Optimierung der Produktion. In den Bereich der technischen Maßnahmen fallen z.B. flexible Automatisierung, Anwendung neuer Fertigungs- und Montagetechnologien, Produkt- und Einzelteilgestaltung, Fügeverfahren und Verbindungsarten, Toleranzen und Qualität [SCHRAFT & KAUN 1998, S. 8ff].

Viele Unternehmen sind der Auffassung, dass eine optimale Rationalisierung nur durch eine radikale Verringerung der Fertigungstiefe oder durch die Komplettverlagerung der Produktion in Billiglohnländer erreicht werden kann [SCHRAFT & KAUN 1998, S. 10]. Oft werden die vor allem an eine Auslandsproduktion gestellten hohen Erwartungen jedoch nicht erfüllt. Gründe hierfür sind z.B. Qualitätsmängel bei den Produkten und Arbeitskräften, zu lange Reaktionszeiten auf Marktänderungen, unzureichende Infrastruktur und Lieferfähigkeit und der eintretende Know-how-Verlust im Unternehmen. Dies führt dazu, dass die Unternehmen eine Rationalisierung durch eine Effizienzsteigerung der Produktion am Standort Deutschland anstreben [REINHART 1998, WIENDAHL & RÖHRIG 1999].

Innerhalb des gesamten Produktionsprozesses treten in der Montage die größten Zeit- und Kostenpositionen auf. Dies liegt daran, dass sie als letztes Glied der Wertschöpfungskette durch alle vorgelagerten Bereiche von der Planung über die Entwicklung und Konstruktion bis hin zur mechanischen Fertigung beeinflusst wird. Zuvor gemachte Fehler müssen in der Montage mit hohem Aufwand aus-

geglichen werden [MILBERG 1987, REINHART ET AL. 1998]. Der Zeitanteil der Montage an der gesamten Produktion liegt nach ANDREASEN & AHM [1988, S. 161] bei 60%, der Kostenanteil bei 30%. PFEIFFER [1989] beziffert den Anteil der Montagekosten mit etwa 50%, GAIROLA [1985] sogar mit bis zu 70%. Diese hohen Zeit- und Kostenanteile in der Montage lassen auf ein erhebliches Rationalisierungspotential schließen. Aufgrund der Tatsache, dass viele Unternehmen oft nur noch die Montage ihrer Produkte durchführen, wird dies zunehmend zu einem entscheidenden Wettbewerbsfaktor [RÖHRIG 2002, S. 2].

Das große Rationalisierungspotential der Montage wurde bereits vor vielen Jahren erkannt [EVERSHEIM 1987]. Durch die rasche Entwicklung im IT-Bereich entstand Ende der 80er Jahre der Trend zur Hochautomatisierung [WIENDAHL & RÖHRIG 1999]. Da die starke Zunahme der Automatisierungsbestrebungen damals nicht zum gewünschten Erfolg führte, begann man zu Beginn der 90er Jahre verstärkt organisatorische Maßnahmen umzusetzen. Doch auch hier stieß man bald an die Grenzen des Umsetzbaren und seit Mitte der 90er Jahre zeigen stark ansteigende Umsatzzahlen der Automatisierungstechnik-Hersteller ein erneutes Umdenken [BÖNKER & SCHMIDT 2001, GREBE 2001, PRODUKTION 2001]. Den Unternehmen wird wieder bewusst, dass sie nur durch eine massive Automatisierung der Produktion die Wettbewerbsfähigkeit aufrechterhalten können [GRUNDLER 2001].

Doch nicht nur die zunehmende Globalisierung stellt produzierende Unternehmen vor immer größere Herausforderungen. Die Entwicklung des Marktes vom Anbieter- zum Käufermarkt führt zu einer Abhängigkeit von den Kundenwünschen [FELDMANN & SLAMA 2001, WESTKÄMPER 1998]. Durch die steigenden Anforderungen der Kunden sind die Unternehmen mehr und mehr gezwungen, ihre Produkte trotz immer kürzer werdender Innovationszyklen leistungsfähiger, individueller und kostengünstiger zu machen, um den Kunden nicht zu verlieren [REINHART & ROSS 2003]. Die Individualisierung der Produkte im Zuge steigender Kundenwünsche hat vermehrt eine Zunahme der Variantenzahl zur Folge. Die Sättigung der Märkte in den meisten Bereichen führt dabei zwangsläufig zu einer Verminderung der Losgrößen [BRUSSEL 1996, SPATH & BAUMEISTER 2001].

Doch die Kunden fordern neben den auf ihre Bedürfnisse angepassten Produkten auch neue und verbesserte Produktfunktionalitäten bei erhöhter Qualität. Eine große Chance der Unternehmen, diesen Anforderungen gerecht zu werden, besteht in der Mechatronik [KALJAS & REEDIK 1998, KLAPDOR 2000]. Durch einen



steigenden Anteil von Elektronik und Informatik in den Produkten können diese in ihrer Funktionalität erweitert und speziell auf Kundenwünsche abgestimmt werden. Sie zeichnen sich durch technische und wirtschaftliche Vorteile gegenüber nicht mechatronischen Produkten aus und helfen dem Unternehmen, sich gegenüber Wettbewerbern zu differenzieren und zu behaupten [SCHERNIKAU 2001]. Die geänderte Produktstruktur mechatronischer Systeme führt aufgrund ihrer hohen Integration von Mechanik, Elektrik, Elektronik und Informatik jedoch zu komplexeren Montageprozessen und erfordert eine steigende Funktions- und Qualitätskontrolle bereits während der Montage (zu Definitionen und Beschreibungen aus dem Bereich Mechatronik siehe Kapitel 2.5). Für die Unternehmen bedeutet dies ein hohes Maß an Flexibilität bei höchster Qualität. Am Stärksten betroffen ist dabei die Montage. Die dadurch entstehenden Mehrkosten können jedoch nicht auf den Kunden umgelegt werden.

Dieser neuen Generation von Produkten kann somit nur mit einer immer flexibler werdenden Infrastruktur in der Produktion begegnet werden [WENK 2002]. Um weiterhin Rationalisierungspotential durch Automatisierung ausschöpfen zu können, müssen Montageanlagen durch leistungsfähige Systeme und durch entsprechend auf die Produkte angepasste Montagestrategien an die geforderte Flexibilität und die notwendigen Qualitätsanforderungen angepasst werden. Automatisierung muss flexibel, einfach aufgebaut und leicht zu bedienen sein. Sonst laufen die Firmen Gefahr, anstatt der erhofften Rationalisierung am Ende einen Zusatzaufwand zur Deinstallierung der automatisierten Betriebsmittel zu haben [WIENDAHL ET AL. 2001].

Ebenso wie bei Produkten werden daher auch in der Automatisierungstechnik die Bereiche Elektrik/Elektronik und Informatik in die Mechanik integriert [BÖNKER & SCHMIDT 2001, SCHRAFT 2001]. 1970 betrug der Investitionsanteil der Mechanik am Gesamtwert einer Produktionsmaschine noch annähernd 100%. Inzwischen ist er auf weniger als die Hälfte zurückgegangen. Im Gegenzug sind die Elektronik- und Softwarekosten im Verhältnis zur Mechanik rapide angestiegen (Abbildung 1-1). Maschinen wandeln sich immer mehr zu Automaten, die aus Mechanik, Sensorik und Aktorik bestehen und von Software gesteuert werden [BENDER 1998].

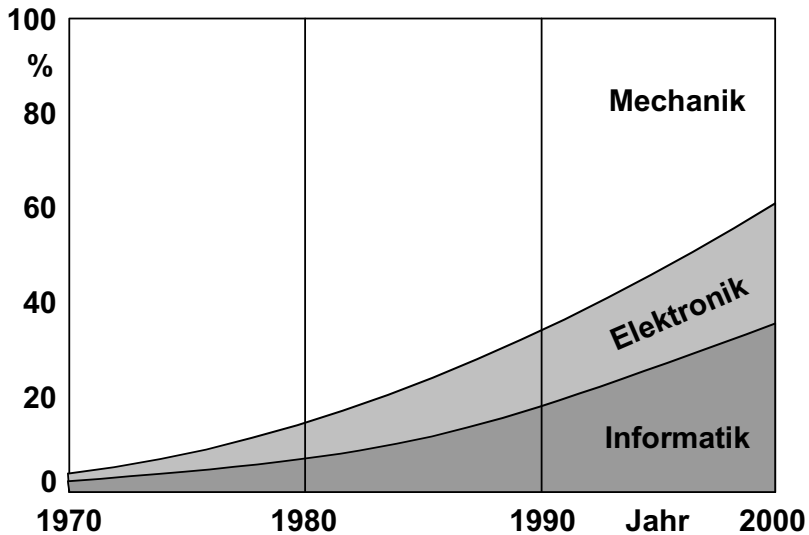


Abbildung 1-1: *Verhältnis von Mechanik, Elektronik und Software in Produktionsanlagen (nach Glas/Kohen/McKinsey).*

Der vermehrte Einzug der Mechatronik in die Automatisierungstechnik hat dazu geführt, dass die Leistungsfähigkeit von Automatisierungskomponenten in den letzten Jahren stark gestiegen ist [NEUGEBAUER 1999, SCHNEIDER 1998A]. Durch den Einsatz von zusätzlichen Sensoren, Aktoren und Software kann eine bisher noch nicht gekannte Flexibilität von Montagesystemen erreicht werden. Diese „multi-sensorielle Intelligenz“ ermöglicht die Anpassung der Anlagen an die gestellten Anforderungen.

Obwohl bei „intelligenten“ Sensoren ein immer noch unzureichendes Preis-Leistungsverhältnis besteht [SCHRAFT & KAUN 1999, S. 67], wird mit der zunehmenden Mechatronisierung der Automatisierungssysteme auch eine Kostensenkung verbunden sein. So sind die Kosten der Industrieroboter als Hauptbestandteil automatisierter Montagezellen in den letzten 10 Jahren um etwa ein Viertel ihres früheren Wertes gesunken. Jedoch haben sich Aufwand und Preise für die aufgrund der „Blindheit“ und „Gefühllosigkeit“ der Roboter notwendigen präzisen aber meist mechanischen Zuführeinheiten bisher kaum verändert [HIRZINGER 1999] (Abbildung 1-2).

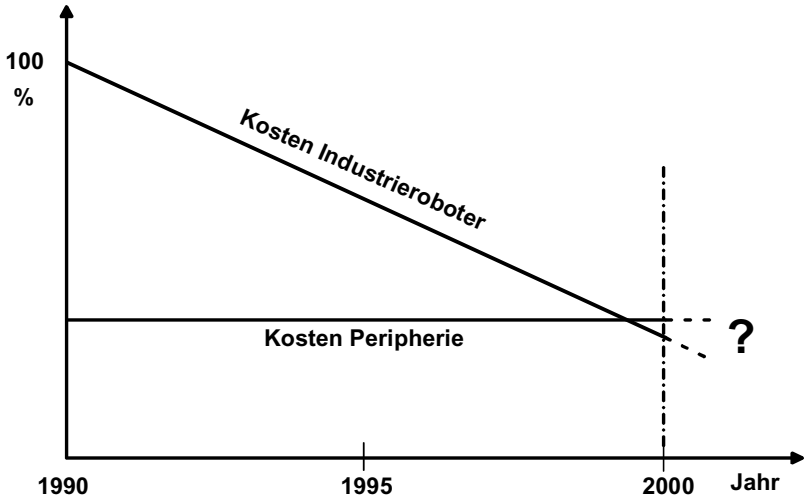


Abbildung 1-2: Qualitative Kostenentwicklung von Industrierobotern und Peripherie [HIRZINGER 2000B]

Trotz der enormen Weiterentwicklung der Automatisierungstechnik in den letzten Jahren sehen nach einer Umfrage des „Fraunhofer Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA)“ [SCHRAFT & KAUN 1999, S. 30] ca. 87% der befragten Unternehmen die steigende Variantenvielfalt und die damit einhergehenden sinkenden Losgrößen als eines der Haupthindernisse für eine automatisierte Montage an. Bei diesen Voraussetzungen erfolgt die Montage weitgehend manuell [HOLMSTEDT ET AL. 1997]. Eine weitere Ursache ist die mangelnde Flexibilität der Anlagen [RÖHRIG 2002, S. 22]. Weiterhin halten nach FELDMANN ET AL. [2001] und SCHRAFT & KAUN [1999, S. 32] etwa 80% der Befragten in Zukunft die Integration von Qualitätssicherungsprozessen in den Montageablauf für notwendig. Gerade diese Punkte stellen die Automatisierung bei mechatronischen Produkten mit ihrer auf den Kunden ausgerichteten Funktionsvielfalt vor große Herausforderungen. Nicht nur die wirtschaftliche Flexibilität, sondern auch die Fähigkeit, Produktfunktionen und durchgeführte Prozesse bereits während der Montage automatisiert zu prüfen, müssen in Zukunft von automatisierten Montagesystemen geleistet werden.

Die Entwicklung in der Produktion und die daraus resultierenden Folgen für die Montage fasst Abbildung 1-3 zusammen.

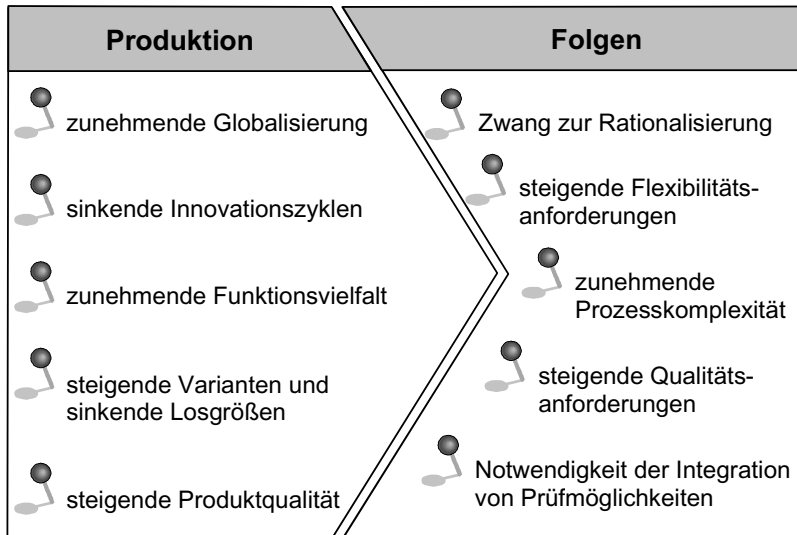


Abbildung 1-3: Entwicklung der Produktion und ihre Folgen für die Montage

### 1.2 Gliederung der Arbeit

Um dem Rationalisierungsdruck gerecht werden zu können, reicht es nicht mehr aus, Personalkosten durch den Einsatz von Automatisierungskomponenten zu senken. Die zukünftigen Anforderungen an die Montage erfordern vielmehr leistungsfähige, flexible und autonom arbeitende Montagesysteme. Um dies zu erreichen, müssen neben den bestehenden Leistungsmerkmalen der Automatisierungskomponenten ebenso die Besonderheiten einbezogen werden, welche die Mechatronik und ihre Umsetzung in Anlagen und Produkten mit sich bringen.

In **Kapitel 2** werden die notwendigen Grundlagen für die vorliegende Arbeit aus den Bereichen der Automatisierungstechnik und der Mechatronik geschaffen. Dazu werden zunächst bestehende Ansätze untersucht, eine automatisierte Anlage vor allem in Bezug auf Varianten und Losgrößen flexibel zu gestalten. Anschließend wird die Qualitätssicherung in der Montage näher beleuchtet. Dabei werden neben Maßnahmen zur montagenahen Qualitätssicherung auch Ansätze zur Nutzung der sensorischen Eigenschaften von Aktoren für die Prüfdatengewinnung betrachtet. Der Industrieroboter als zentrales Element der automatisierten Montage bildet den nächsten Abschnitt. Neben der Funktion des Industrierob-

boters wird zudem auf die informationstechnische Einbindung von Peripheriekomponenten eingegangen.

Den Abschluss bildet ein Überblick über die Mechatronik. Dabei erfolgt nach einer kurzen Beschreibung der Entstehung des Begriffes und einigen vorherrschenden Definitionen eine Begriffsfestsetzung für die Arbeit. Anschließend werden mechatronische Systeme und ihre Systemstruktur erarbeitet und es wird auf die Eigenschaften derartiger Systeme näher eingegangen. Daraufhin folgt eine Beschreibung der typischen mechatronischen Produktkomponenten, ehe Beispielanwendungen der Mechatronik in technischen Systemen aufgezeigt werden.

Basierend auf der zuvor erarbeiteten Situationsanalyse in der automatisierten Montage und dem Überblick über die Mechatronik, erfolgt in **Kapitel 3** eine Beleuchtung der Aufgabenstellung und eine genaue Einordnung der Arbeit.

Ausgehend von den aufgezeigten Defiziten wird in **Kapitel 4** eine Methode vorgestellt, mechatronische Produktkomponenten aktiv in die automatisierte Montage einzubeziehen, um diese effizienter zu gestalten. Hierfür werden zu Beginn die Anforderungen an ein Montagesystem für Produkte mit mechatronischen Komponenten aufgestellt. Im nächsten Schritt erfolgen die Konzeption der Methode und die Beschreibung der dafür notwendigen informationstechnischen Kommunikationsflüsse zwischen Produkt und Montagesystem. Daraufhin werden die Anforderungen erarbeitet, die sich aus der vorgestellten Methode für die einzelnen Systemkomponenten ergeben. Zum Schluss des Kapitels wird der erarbeitete Ansatz an möglichen Anwendungsszenarien gespiegelt und es werden die dafür notwendigen Abläufe genauer beleuchtet, ehe die Methode bewertet wird.

**Kapitel 5** beinhaltet die Beschreibung der Kommunikationsschnittstelle. Dabei werden zuerst Anforderungen an Funktion, Aufbau und Programmierung der Schnittstelle erarbeitet. Anschließend erfolgt die Konzeption der Hardware wie der Software.

In **Kapitel 6** wird auf die Montagesystemplanung eingegangen. Dabei wird die herkömmliche Vorgehensweise durch eine weitere Phase erweitert und die bestehenden Phasen durch zusätzliche Arbeitsschritte ergänzt.

Um die Produktionstauglichkeit einer automatisierten Montage unter Nutzung mechatronischer Produktkomponenten aufzuzeigen, werden in **Kapitel 7** zwei

# 1 Einführung

---

mögliche Anwendungen vorgestellt. Zum einen wird die Montage eines Magnetventils dargestellt, zum anderen werden ausgewählte Montageprozesse der SpaceMouse®, einem Gerät zur 3D-Manipulation von Objekten, beschrieben. Dabei werden nach der Produkt- und Prozessanalyse sowohl die erarbeiteten Schnittstellen als auch die entscheidenden Montageprozesse erläutert. Eine technologische und wirtschaftliche Bewertung bilden den Abschluss.

In **Kapitel 8** werden die in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse noch einmal zusammengefasst und es wird ein Ausblick auf zukünftig erforderliche Forschungsaktivitäten gegeben.

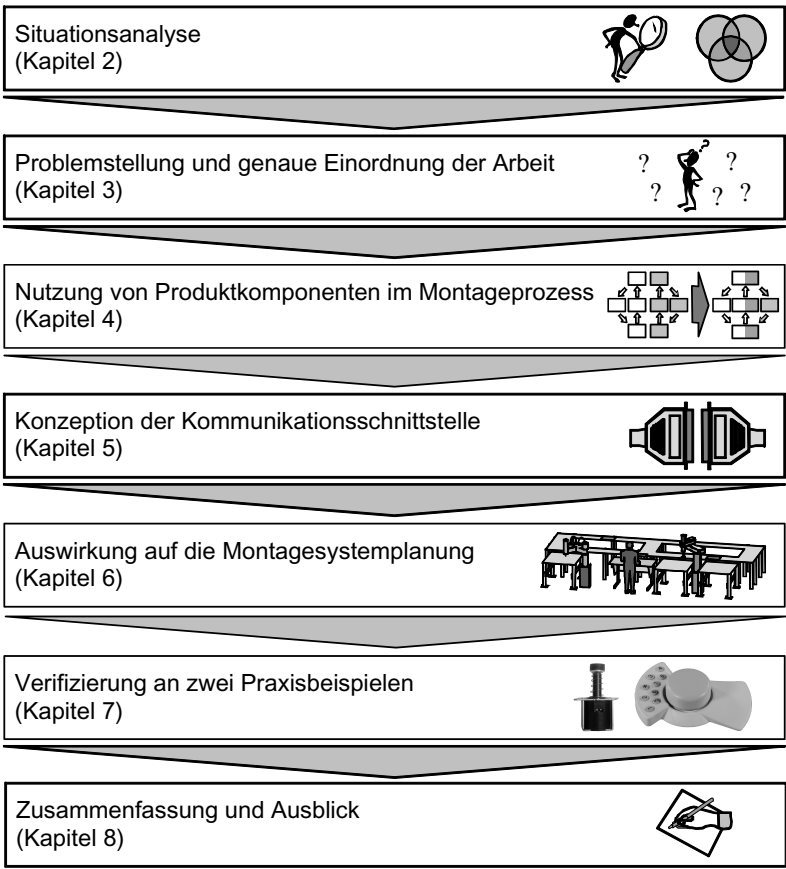


Abbildung 1-4: Vorgehensweise innerhalb der Arbeit

## 2 Situationsanalyse

### 2.1 Überblick

Ein Schlüssel für die, durch den globalen Wettbewerb bedingte, Rationalisierung der Produktion ist die Automatisierung der Montage. Aufgrund der in Kapitel 1.1 angesprochenen Veränderungen in der Produktion wird die Realisierung einer wirtschaftlichen Montageautomatisierung mit den herkömmlichen Montagesystemen jedoch immer schwieriger.

In der Regel sind die derzeit im Einsatz befindlichen automatisierten Montagesysteme produktorientiert aufgebaut und auf große Losgrößen ausgerichtet. Sie stellen sowohl im Bereich der Montage als auch im Bereich der Qualitätssicherung meist kostenintensive Sonderlösungen dar und besitzen demnach eine hohe Komplexität. Sie bieten eine geringe Flexibilität gegenüber Produkt- und Variantenänderungen und werfen Probleme bei einer in den Montageablauf integrierten Qualitätsprüfung und Prozessüberwachung auf. Diesen Tatsachen stehen eine steigende Variantenvielfalt und sinkende Losgrößen gegenüber. Auch die vor allem bei mechatronischen Produkten immer komplexer werdenden Montageprozesse und eine steigende Anzahl an notwendigen Funktions- und Qualitätskontrollen erschweren die Automatisierung [FELDMANN ET AL. 1999].

Es müssen Vorgehensweisen und Methoden geschaffen werden, die automatisierte Montage effizienter zu gestalten. Die DIN EN ISO 9000 [2000] definiert den Begriff *Effizienz* als das Verhältnis zwischen dem erzielten Ergebnis und den eingesetzten Mitteln. Mit der Effizienz eines Systems bzw. Prozesses wird demnach bewertet, wie schnell und kostengünstig das System bzw. der Prozess eine definierte Leistung erbringt. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird Effizienz oft als „die Dinge richtig tun“ bezeichnet. Für die automatisierte Montage heißt das vor allem, richtig zu fügen, zu handhaben, zu justieren und zu kontrollieren. Unter „richtig“ sind dabei Methoden zu verstehen, welche auf die Anforderungen abgestimmt sind, die sich durch die Art der Produkte ergeben.

In diesem Kapitel wird zuerst die heutige Situation in der automatisierten Montage im Hinblick auf die genannten Anforderungen untersucht. Dazu erfolgt anfangs eine Darstellung bestehender Ansätze zur Flexibilisierung automatisierter Montageanlagen vor allem in Bezug auf Variantenvielfalt. Anschließend werden Maßnahmen zur Qualitätssicherung aufgezeigt, wie sie aktuell in der Automati-

sierungstechnik vorliegen, und die Integration von Prüfprozessen wird näher betrachtet. Einen Schwerpunkt bildet dabei die Nutzung sensorischer Eigenschaften von Aktoren zur Gewinnung von Prüfdaten. Der Industrieroboter als das Hauptelement der flexibel automatisierten Montagezelle wird danach genauer untersucht. Neben Aufbau und Steuerungsstruktur liegt ein Augenmerk auf den Schnittstellen, wie sie in Robotersystemen zu finden sind.

Im Anschluss daran werden die zum Verständnis der Arbeit notwendigen Grundlagen und Definitionen aus dem Bereich der Mechatronik erläutert. Dazu wird im ersten Schritt der Begriff Mechatronik und seine Entstehung näher beschrieben. Anschließend wird auf mechatronische Systeme und ihren typischen Aufbau eingegangen, bevor ihre Eigenschaften und Potentiale gegenüber herkömmlichen mechanischen Systemen näher beleuchtet werden. Dies wird anhand bekannter Beispiele aus der Praxis weiter verdeutlicht.

## 2.2 Flexibilität

Flexibilität gilt als die bedeutendste Anforderung an die Produktion [RÖHRIG 2002, S. 28]. Damit ist es möglich, wirtschaftlich effizient auf die steigende Individualisierung der Produkte und damit auf die zunehmende Produkt- und Variantenvielfalt zu reagieren. Dabei muss Flexibilität in allen Bereichen des Produktentstehungsprozesses vorhanden sein. Ein besonderes Augenmerk soll in der vorliegenden Arbeit auf die Flexibilität in der Montage, im Besonderen auf Möglichkeiten zur Flexibilisierung automatisierter Montageanlagen, gelegt werden.

### 2.2.1 Begriffsdefinition

Die Bedeutung des Begriffes Flexibilität ist nach RÖHRIG [2002, S. 30] stark subjektiv und nicht absolut erfassbar. Daher wird die Flexibilität häufig als nicht zielgerichteter Kostenverursacher gesehen. Aus diesem Grunde soll nun Flexibilität näher definiert werden.

HESSELBACH [1989] definiert Flexibilität als die Fähigkeit von Produktionssystemen, für verschiedene Aufgaben einsatzfähig zu sein. Nach MILBERG [1987] und WELLING [1994] bedeutet Flexibilität weitergehend die Fähigkeit, sich an unterschiedliche Arbeitsaufgaben im Rahmen definierter Grenzen anzupassen. Eine weitere Detaillierung für den Bereich der Montage geben



REINHART & SCHNEIDER [1995]. Sie beschreiben die Flexibilität eines Montagesystems als die Anpassungsfähigkeit an Änderungen bei den zu produzierenden Produkten wie Geometrie, Werkstoffe oder Bauteilzahl, an Änderungen bei den Produktionsanforderungen wie Montageumfang, Stückzahl oder Kosten und an Änderungen bei den Produktionsbedingungen wie Betriebsmittel oder Personal. Das bedeutet, dass flexibel automatisierte Anlagen die Fähigkeit besitzen, sich auf ein wechselndes Varianten- und Produktspektrum einzustellen [MILBERG & SCHMIDT 1990]. Diese Anpassung ist jedoch in der Regel begrenzt. Eine Erweiterung der Grenzen durch flexibilitätssteigernde Maßnahmen verursacht Kosten, die wieder ausgeglichen werden müssen.

Zusammenfassend soll Flexibilität als die Anpassungsfähigkeit von Montagesystemen an Änderungen bei den zu produzierenden Produkten und Varianten, bei den Montageprozessen und Betriebszuständen und bei den Randbedingungen innerhalb vorgegebener Grenzen verstanden werden (Abbildung 2-1). Flexible Montagesysteme können verschiedene Arten von Produkten produzieren, bei unterschiedlichen Varianten und Stückzahlen [KOREN ET AL. 1999].

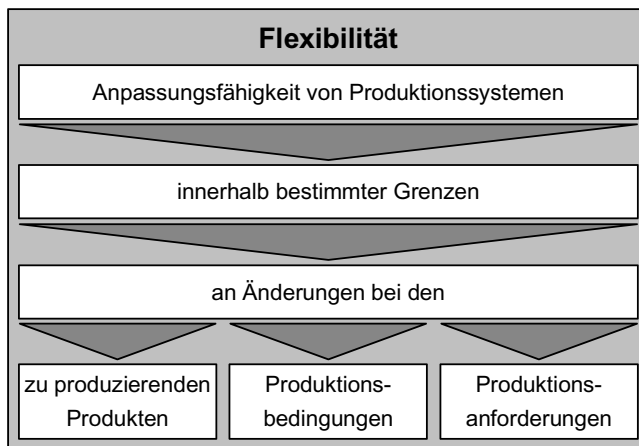


Abbildung 2-1: Definition des Begriffes Flexibilität

SCHMIDT [1992, S. 48] teilt den Begriff der Flexibilität in eine Flexibilität erster und zweiter Ordnung. Flexibilität erster Ordnung beschreibt die Fähigkeit eines Montagesystems, sich kurzfristig auf Änderungen der Produkte, der Betriebszustände von prozessausführenden Komponenten oder der Systemrandbedingungen

selbständig anzupassen, um etwa Störungen zu verhindern. Dies setzt eine gewisse Autonomie der Anlage voraus. Flexibilität zweiter Ordnung bezieht sich auf mittel- und langfristige Änderungen von Produkten, Prozessen und Randbedingungen. Die Flexibilität zweiter Ordnung unterteilt SCHMIDT [1992, S. 48] weiter in eine interne und eine externe Flexibilität. Intern bedeutet hierbei eine Änderung etwa durch ein einfaches Umprogrammieren der Anlage, extern bedeutet die Anpassung durch einen Austausch von Komponenten über die Systemgrenzen hinaus, z.B. einen Werkzeugaustausch.

### 2.2.2 Arten von Flexibilität in der Montage

RÖHRIG [2002, S. 35] zeigt anhand des Produktlebenszyklus drei grundlegende Flexibilitätsanforderungen an ein Montagesystem für variantenreiche Produkte auf. So ist zu Beginn die Stückzahlflexibilität entscheidend. Ist der Produktabsatz auf einem konstanten Niveau, tritt die Variantenflexibilität in den Vordergrund. Am Ende des Produktlebenszyklus gewährleistet die Produktflexibilität die Verwendung des Systems oder einzelner Komponenten für Folgeprodukte.

- Die *Stückzahlflexibilität* wird bei Montagesystemen in der Regel durch eine hybride Automatisierung erreicht, das heißt, durch eine Kombination aus automatisierter und manueller Montage, deren Verhältnis veränderbar und damit an die geforderten Stückzahlen anpassbar ist. KUBA ET AL. [1995], REINHART & MILBERG [1998] und REINHART & FICHTMÜLLER [1994] nennen Methoden zur stückzahlflexiblen Gestaltung von Montagesystemen. Da sich die vorliegende Arbeit lediglich mit der Automatisierung der Montage befasst, sollen Möglichkeiten zur Steigerung der Stückzahlflexibilität nicht weiter betrachtet werden.
- *Variantenflexibilität* bezeichnet nach DIRNDORFER [1993] die Fähigkeit eines Montagesystems, verschiedene Varianten in kürzester Abfolge ohne externen Eingriff montieren zu können.
- *Produktflexibilität* ist nach SCHLAICH & KAUFMANN [1990] die Fähigkeit, gleichzeitig oder nacheinander verschiedene Produkttypen montieren zu können. Die Umrüstung von Anlagen zur Montage neuer Produkte soll daher problemlos ohne größeren Kosten- und Änderungsaufwand möglich oder im Idealfall gar nicht notwendig sein.

Nach KALDE [1987] kommen zu diesen Flexibilitätsarten in der Montage noch die Funktions- bzw. Prozessflexibilität und die Störungsflexibilität hinzu.

- *Funktions- oder Prozessflexibilität* bedeutet, dass dasselbe Montagesystem in der Lage ist, mehrere Handhabungs- und Montagefunktionen, abhängig oder unabhängig von der zu montierenden Variante, durchzuführen. Dies können sowohl unterschiedliche Prozesse als auch gleiche Prozesse mit unterschiedlichen Ein- und Ausgangsparametern sein.
- Durch eine *Störungsflexibilität* ist ein Montagesystem in der Lage, vorhersehbare oder unvorhersehbare Ereignisse automatisch zu erkennen und selbständig darauf zu reagieren. Sie setzt somit eine Autonomie des Systems voraus.

### 2.2.3 Maßnahmen zur Flexibilisierung von Montagesystemen

Die Flexibilisierung von Montagesystemen vor allem in Bezug auf Varianten und Produkte wurde bereits in vielen Forschungsarbeiten behandelt. In der Industrie erfolgte die Umsetzung dabei fast ausschließlich durch eine Modularisierung der Anlagenkomponenten. Der Vorteil von modularen Montagesystemen liegt in der Wiederverwendbarkeit der einzelnen Komponenten. Die meisten Anwender scheuen aber eine Flexibilisierung ihrer Montageanlagen aufgrund des höheren Planungsaufwandes und größerer Anfangsinvestitionen.

FICHTMÜLLER [1996] stellt anhand der von WILLY [1994] aufgestellten Flexibilisierungsformen „konstruktiv vorgesehene Mehrfachverwendung“, „automatische Adaption“ und „Entwicklung eines Baukastensystems“ Untersuchungen zum Thema Flexibilisierungsmöglichkeiten von Montagesystemen zusammen.

- Die *konstruktiv vorgesehene Mehrfachverwendung* bezeichnet Systeme, die verschiedene Varianten eines Produktes oder unterschiedliche Produkte bearbeiten können, wie beispielsweise Multifunktionsgreifer oder Universalmagazine. Bei komplexer werdenden Systemen kann hier der Aufwand einer Realisierung jedoch sehr groß werden.
- Bei einer *automatischen Adaption* passen sich die Montageeinrichtungen durch ein Verändern ihrer Gestalt an. Dies kann aktiv durch Stellelemente wie Pneumatikzylinder oder Motoren, oder passiv durch nachgiebige oder kompliante Systeme realisiert werden.

## 2 Situationsanalyse

---

Diese beiden Flexibilitätsanforderungen können als innere Flexibilität bezeichnet werden.

- Bei einem *Baukastensystem* bestehen die Komponenten aus einzelnen Modulen, welche je nach Aufgabe individuell zusammengestellt werden können. Aufgrund des Eingreifens von außen in das System liegt hier eine äußere Flexibilität vor.

SCHMIDT [1992, S. 57] stellt sechs Gestaltungsregeln für flexible Montagezellen auf. Darauf basierend hat er ein Baukastensystem für flexible Montagesysteme erarbeitet, welches sich am Aufbau flexibler Bearbeitungszentren orientiert. Dabei gilt für die Montagezelle die Trennung in produktneutrale und produktspezifische Komponenten. So besteht der Grundaufbau aus aufgabenneutralen, standardisierten, statischen und kinematischen Grundsystemen. Darin sind ein Diagnosesystem und Sensoren implementiert. Produktspezifische Werkzeuge und Vorrichtungen sind in einer der Zelle vorgelagerten Station integriert. Dort können sie sowohl vom Montagesystem automatisiert als auch vom Werker manuell entnommen werden.

Bereits in ABELE [1984] sind Gestaltungsmaßnahmen beschrieben. So erwarten viele Anwender eine Flexibilisierung einer einzelnen Montagezelle durch:

- modulare Systeme mit definierten mechanischen Schnittstellen,
- eine Verwendung von frei programmierbaren Steuerungen oder
- die Entwicklung von universell einsetzbaren, flexiblen Vorrichtungen.

Die Realisierung einer Funktions- bzw. Prozessflexibilität wird hauptsächlich durch den Einsatz frei programmierbarer flexibler Handhabungsautomaten wie Industrieroboter erreicht. Für die Störungsflexibilität bildet die Steuerung dieser Automaten ebenfalls die wichtigste Voraussetzung. Eine Integration von Sensoren und die Erweiterung der normalen Steuerungsfunktionen tragen weiterhin zu einer Störungsflexibilität bei.

### 2.3 Qualität

Die Sicherung der Qualität gewinnt vor allem in der flexibel automatisierten Montage zunehmend an Bedeutung [FELDMANN 1993]. Trotz präventiver Qualitätssicherungsmethoden rückt die montagenahe Qualitätssicherung immer stärker

in den Vordergrund. LOTTER [1993] forderte vor einigen Jahren bereits die Integration qualitätssichernder Maßnahmen in den Montageablauf. Die Entwicklung zu steigenden Variantenzahlen, zunehmenden Produktfunktionen und zunehmender Komplexität der Montageprozesse verstärkt die Notwendigkeit derartiger Qualitätssicherungsmaßnahmen. Aus diesem Grunde soll im Folgenden nach einer Begriffsdefinition auf Maßnahmen zur Qualitätssicherung in der Montage und auf bereits bestehende Ansätze eingegangen werden.

### 2.3.1 Begriffsdefinition

Der Begriff Qualität stammt von dem lateinischen Wort „qualis“ (wie beschaffen) bzw. „qualitas“ (Beschaffenheit eines Gegenstandes) ab. Laut REINHART ET AL. [1996, S. 6] ist Qualität grundsätzlich die wertfreie Beschreibung einer Beschaffenheit. Eine Bewertung der Qualität ist erst durch den Vergleich von Produktmerkmalen und Produkteigenschaften mit den eigenen Anforderungen möglich. Die DIN EN ISO 9000 [2000] berücksichtigt dies und definiert Qualität als den Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt. Die DIN ISO 8402 [1994] definiert Qualität als die Gesamtheit von Merkmalen einer Einheit, bezüglich ihrer Eignung festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen. Dabei können nach WENDT [1992, S. 12] unter einer „Einheit“ sowohl das Ergebnis von Tätigkeiten und Prozessen als auch die Tätigkeiten und Prozesse selbst verstanden werden. Die Qualität liefert eine Aussage darüber, wie gut die Anforderungen durch kennzeichnende Eigenschaften erfüllt werden. Sie ergibt sich aus einem Soll-Ist-Vergleich von Produktmerkmalen mit festgelegten Kriterien und dem daraus resultierenden Erfüllungsgrad.

### 2.3.2 Qualitätssichernde Maßnahmen in der Montage

Qualitätssichernde Maßnahmen beziehen sich heute nicht mehr nur auf die Qualitätsprüfung am Ende der Montage, sondern umfassen eine kontinuierliche Überwachung von Prozessen und Betriebsmitteln. Damit sollen Qualitätsschwankungen der Produkte möglichst früh erkannt werden. Im Sinne eines Regelkreises ist es möglich, korrigierend in den Prozess einzugreifen.

Nach REINHART ET AL. [1996, S. 99] können qualitätssichernde Maßnahmen in vier Bereiche eingeteilt werden (Abbildung 2-2). Die *Qualitätsprüfung* ist rein produktorientiert und beinhaltet die Prüfung qualitätsrelevanter Produkt-

## 2 Situationsanalyse

merkmale wie z.B. Geometrie, Oberfläche oder Aussehen. Sowohl produkt- als auch prozessbezogen ist die Prozessüberwachung bzw. die *statistische Prozessregelung*. Dabei werden zunächst in der Prozessüberwachung Produkt- und Prozessparameter erfasst und überwacht. Mit einer statistischen Auswertung können in einer Prozessregelung diese Parameter entsprechend korrigiert werden. Die *Fähigkeitsuntersuchungen* weisen die Eignung der Prozesse und Betriebsmittel zur Gewährleistung einer sicheren Montage nach. Für die Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit der Anlage über die gesamte Montagedauer dient die *systematische Anlagenbetreuung*.

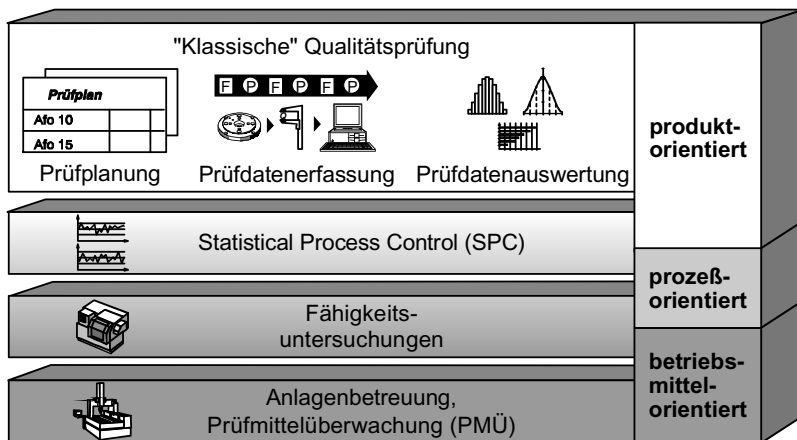


Abbildung 2-2: *Qualitätssichernde Maßnahmen in der Montage nach REINHART ET AL. [1996]*

Fähigkeitsuntersuchungen und systematische Anlagenbetreuung stellen vorbeugende Maßnahmen dar, die im Normalfall nicht während oder unmittelbar nach den Montageprozessen durchgeführt werden und sollen daher im weiteren Verlauf der Arbeit keine Rolle spielen. Einen umfassenden Überblick über die Qualitätssicherung geben HERING ET AL. [1993].

Qualitätsprüfung und statistische Prozessregelung sind korrigierende und überwachende Maßnahmen, die direkt am oder im Montageprozess stattfinden. In der Montage werden dabei hauptsächlich Anwesenheits- und Lagekontrollen, die Überwachung von Fügeprozessen und Prüfungen der Produktfunktionen durchgeführt.

### 2.3.3 Montagenae Qualitätssicherung

Die Kontrolle von Fügeprozessen ist aufgrund von Bauteiltoleranzen in der Montage oft schwierig und erschwert eine statistische Prozessregelung. Aus diesem Grund greifen Unternehmen vermehrt auf eine 100%-Prüfung zurück. Automatisch durchgeführte Prüfungen bieten dabei durch genauer definierte Prüfbedingungen und den fehlenden Bedienerinfluss eine bessere Reproduzierbarkeit und Zuverlässigkeit als manuelle Prüfungen. Jedoch herrscht eine starke Produktabhängigkeit von Aufgaben und Einrichtungen [REITER 1998]. Dies führt oft zu kostenintensiven und unflexiblen Sonderlösungen.

Durch den Einzug der Mechatronik in die Produkte müssen Qualitätssicherungsmaßnahmen immer stärker in den Montageablauf eingebunden werden, die Montage erfordert im Gegenzug aber immer mehr Flexibilität. Bei der Realisierung von montagenahen Qualitätssicherungsmaßnahmen vor allem in der flexibel automatisierten Montage herrscht noch großer Handlungsbedarf [REITER 1998]. Unter montagenah sollen dabei Qualitätssicherungsmaßnahmen verstanden werden, die unmittelbar den Montageprozess betreffen und damit zur Qualitätsprüfung oder Prozessregelung zu zählen sind.

In der Vergangenheit wurde bereits eine Reihe von Untersuchungen zu diesem Thema durchgeführt. Die drei gängigsten Methoden einer montagenahen Qualitätssicherung in der automatisierten Montage sind im Folgenden beschrieben:

- Die erste Methode ist die *Integration von zusätzlichen Sensoren in ein Montagesystem*. Diese Methode ist die am weitesten verbreitete Möglichkeit, qualitätssichernde Maßnahmen in der Montage umzusetzen. Anhand der Sensoren können Qualitätsmerkmale detektiert und von der Steuerung ausgewertet werden. Die gewonnenen Daten werden dann unmittelbar in den Qualitätsregelkreis zurückgeführt.
- Die zweite Methode ist die *Realisierung einer eigenständigen Prüf- und Justierzelle*. In dieser Zelle werden durch Prüfmodule die Qualitätsmerkmale nach den entsprechenden Montageprozessen auf ihre Erfüllung hin kontrolliert und die Daten in die vorgelagerten Prozesse zurückgeführt.

SCHMITT [2000] beschreibt eine Weiterentwicklung dieser Methode. Durch die Entwicklung einer automatisierten robotergestützten Mess- und

## 2 Situationsanalyse

---

Prüfstation zeigt er eine Möglichkeit auf, die Flexibilität der meist produktabhängigen Aufgaben und Vorrichtungen zu steigern.

- Die dritte Methode basiert auf einer *Teilung in anlagenfest installierte, flexible Sensoren und produktspezifische Prüfmodule*. Dies ist im Grunde eine Vereinigung der beiden anderen Methoden, um von beiden Strategien profitieren zu können. WENDT [1992] stellt dafür Konzepte und Lösungsansätze für flexible Sensoren in automatisierten Montageanlagen vor. REITER [1996] beschreibt ein Baukastensystem für flexible Prüfeinrichtungen.

Diese Maßnahmen zielen auf die hardwaretechnische Umsetzung der Qualitätssicherung ab. Bei allen drei Methoden werden Sensoren zur Prüfdatengewinnung eingesetzt und dadurch ein montagenaher Qualitätsregelkreis aufgebaut. Derartige Regelkreise stehen in einem engen Zusammenhang mit der Montage- und damit auch mit der Produktqualität. Ein Qualitätsregelkreis basiert nach WENDT [1992, S. 141] auf den Kriterien Qualitätsziel, Reaktionsart und Durchsetzungsart.

- Das *Qualitätsziel* ist die genaue Erfüllung der Qualitätsanforderungen. Dies beinhaltet das Ermöglichen, das Verbessern und das Sichern der Qualität im Produkt.
- Wird das Qualitätsziel nicht erreicht, werden *Reaktionen* darauf eingeleitet, den Montageprozess entsprechend zu korrigieren. Die Reaktionen können daraus bestehen, dass der Prozess wiederholt, entsprechend verändert fortgeführt oder abgebrochen wird.
- Die *Durchsetzungsart* beschreibt die Art und Weise, wie die im Prozess gewonnenen Erkenntnisse in den Montageprozess zurückgeführt werden können. Dabei gibt es die Möglichkeit, den Prozessschritt zu beeinflussen, aus dem die Prozessinformationen generiert wurden. Die zweite Möglichkeit besteht darin, durch die gewonnenen Informationen die Montage des nachfolgenden Produktes anzupassen. Eine dritte Möglichkeit ist die Beeinflussung eines Wiederholsschrittes des eben durchgeführten Prozesses.

Montagenaher Qualitätsregelkreise ermöglichen durch das Erfassen von Fehlern bei der Entstehung ein lokales und damit sehr schnelles Reagieren noch innerhalb der Montagezelle. Sie sind die Voraussetzung für die in die Montageprozesse integrierten Qualitätsprüfungen. Jedoch erfordern sie gerade bei variantenreichen



Produkten eine sehr große Flexibilität. Diese Flexibilität kann oft durch die oben beschriebenen Maßnahmen nicht wirtschaftlich erreicht werden.

### **2.3.4 Qualitätssicherung durch Nutzung der sensorischen Eigenschaften von Aktoren**

Die Montage komplexer elektromechanischer Baugruppen stellt hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Prozesse. Eine mögliche Lösung besteht darin, einen Abgleich- oder Justiervorgang am Ende des Montageprozesses durchzuführen. Daher ist es wichtig, Justiervorgänge innerhalb eines flexibel automatisierten Montagesystems sowie die Integration von Prüf- und Justiermitteln in gemeinsame Vorrichtungen zu realisieren. Da Prüfaufgaben meist sehr produktspezifisch sind, ist in der Regel eine sensorische Erfassung der Zielgrößen mit viel Aufwand verbunden. Diese produktspezifischen Aufgabenstellungen stellen ein großes Hindernis für die Flexibilisierung der dafür notwendigen Einrichtungen dar [REITER 1996].

Bei elektromechanischen Baugruppen befindet sich oft ein Aktor in der Nähe der Prüfstelle, so dass eine Auswertung seiner sensorischen Eigenschaften besonders sinnvoll erscheint. Aktoren und Sensoren haben innerhalb eines Prozesses im Normalfall unterschiedliche Aufgaben. Während Sensoren Informationen über einen Prozesszustand bereitstellen, bewirken Aktoren unter Aufnahme von Energie eine Änderung des Prozesszustandes [REINHART ET AL. 1996, S. 127]. Gelingt es jedoch, die Rückwirkungen der Prozessseite eines Aktors auf der Eingangsseite z.B. durch die Aufnahme der Änderung des Strombedarfes zu erfassen, dann lassen sich durch seine sensorischen Eigenschaften Aussagen über den Prozesszustand treffen. Das ermöglicht unter anderem die Durchführung von Überwachungsaufgaben, Funktionsprüfungen und Justiervorgängen. Durch die Nutzung der Rückwirkungen von Aktoren kann eine Vereinfachung und Flexibilisierung der Prüfmittel erreicht werden. Somit lassen sich neben den Kosten für Sensoren auch die Kosten für die Implementierung in die Anlage einsparen. Messdaten können direkt am Ort des Geschehens aufgenommen werden und der zur Verfügung stehende Platz wird nicht durch zusätzliche Sensoren begrenzt.

### 2.3.4.1 Prinzipien und Implementierung

Bei der Ausnutzung der Rückwirkungen von Aktoren bestehen nach WÜNSCHE & HEINZL [1993] prinzipiell folgende Möglichkeiten:

#### **Auswertung der Energieaufnahme**

Bei den meisten Aktoren lässt sich ein Zusammenhang zwischen Energieaufnahme und Prozesszustand bzw. Zustandsänderung erkennen. Dadurch können über eine Auswertung von Menge, Verlauf und Schwankung der Energie an Versorgungsleitungen bzw. Aktoreingängen Informationen über den Prozess und dessen Änderungen generiert werden. Einfacher können diese Informationen über Größen wie Druck oder Strom gewonnen werden, die mit der Energieaufnahme in Zusammenhang stehen.

Während bei Gleichstrommotoren mit Neben- und Reihenschlussverhalten eine direkte Nutzung der Informationen durch eine einfache Messschaltung möglich ist, wird bei Motoren mit Drehfeld der Aufwand größer. Zur Auswertung des Strombedarfes muss dieser in ein läuferfestes Koordinatensystem transformiert und die Lage des Rotors bestimmt werden.

#### **Erfassen von Parameteränderungen**

Die Auswertung der Veränderung von Parametern des Aktors lässt ebenfalls Aussagen über Prozesszustände bzw. -änderungen zu. Diese Änderungen können entweder durch das Funktionsprinzip des Aktors oder durch Nebeneffekte entstehen. Es wird zwischen den zwei folgenden Arten von Parameteränderungen unterschieden.

- *Passive sensorische Effekte* erfordern das Zuführen eines zusätzlichen externen Signals. Die Prozessänderung beeinflusst das Signal und wird von diesem abgebildet. Als Beispiel sei die Erfassung der Temperatur mit Hilfe eines im Aktor integrierten temperaturabhängigen Widerstandes genannt. Durch einen zusätzlich erzeugten Messstrom kann der Spannungsabfall am Widerstand als Funktion der Temperatur gemessen werden. Weitere Beispiele hierfür sind nach WÜNSCHE [1993] die Induktivitätsänderung bei elektromagnetischen Systemen und die Veränderung der Resonanzfrequenz bei Pneumatikzylindern.
- Bei *aktiven sensorischen Effekten* gibt der Aktor bei Systemänderungen Signale ab, welche erfasst und ausgewertet werden können. Dies ist vor allem

bei Materialien der Fall, die auf reversiblen physikalischen Effekten basieren wie Piezoelemente. Diese können beispielsweise als Schallerzeuger und als Mikrofon dienen. Bewirkt der Aktor eine Änderung im Prozess, die gleichzeitig die sensorische Information liefert, kann ein getakteter Betrieb des Aktors erforderlich sein, d.h. eine zeitliche Aufteilung in Intervalle für sensorische und aktorische Nutzung.

Für die Implementierung des Messverfahrens zur Nutzung der sensorischen Eigenschaften von Aktoren stellt REITER [1998] ein Vorgehen in drei Schritten vor. Im ersten Schritt werden die erforderliche Messgenauigkeit festgelegt und die Rückwirkungen des Aktors analysiert. Anschließend werden quantitative und qualitative Prüfmerkmale durch eine Off-line-Analyse anhand einer ausreichenden Messdatenbasis bestimmt. Zum Schluss erfolgt der Aufbau der Signalverarbeitung durch eine Kombination der einzelnen Merkmale.

### 2.3.4.2 Beispiele aus der Praxis

Wie bereits angesprochen, werden sensorische Eigenschaften von Aktoren bisher selten genutzt. Trotzdem existieren Beispiele, die zeigen, dass Aktoren als Sensoren dazu dienen können, entweder die Eigenschaften des Produktes zu verbessern oder seine Montage zu unterstützen. Im Folgenden sollen nun einige Umsetzungen beschrieben werden, die auf Sensorsignale von Aktoren zurückgreifen.

Auf dem Gebiet der Synchronmotoren ist bereits eine Reihe von Untersuchungen über sensorische Eigenschaften von Aktoren gemacht worden. Schwerpunkt war die Verbesserung der Motoreigenschaften. Dies gilt auch für das Verfahren zur *Regelung von Hybridschrittmotoren* durch Ausnutzung sensorischer Motoreigenschaften von EISSFELDT [1991]. Wird ein Schrittmotor in einer offenen Steuerkette betrieben, kann es zu Schrittverlusten und damit zu bleibenden Positionsabweichungen kommen. Für einen geregelten Betrieb ist zur Bestimmung der Rotorposition ein zusätzlicher meist teurer Lagesensor notwendig. Durch Ausnutzung der sensorischen Eigenschaften des Schrittmotors wird der Einsatz einer zusätzlichen Einrichtung zur Lageerfassung überflüssig. Die Selbststeuerung des elektrischen Schrittmotors gelingt durch die Auswertung der Spannungssignale an den Klemmen, welche sich aufgrund der Drehung des Rotors im Stator ergeben.

Interessanter für die vorliegende Arbeit ist allerdings die Unterstützung des Montageprozesses durch Produktaktoren. Hierbei sind Aktoren in der Lage,

Justiervorgänge oder Funktionsprüfungen entscheidend zu erleichtern. Sie können sowohl quantitative (z.B. Drehmoment) als auch qualitative Informationen (z.B. Anwesenheit von Bauteilen) liefern.

Ein Beispiel ist die *Funktionsprüfung von Bubble-Jet Tintenstrahldruckern*. Die Oberflächen der Heizelemente in den Druckköpfen sind in der Fertigung den verschiedensten Stoffen ausgesetzt. Dies führt zu unterschiedlichen Oberflächenstrukturen der einzelnen Heizelemente und damit zu Toleranzen in den Spritzparametern. Anhand der Erfassung der Stromänderung an den Anschlüssen eines Heizelementes während des Heizvorganges gelingt es PÖPPEL [1991], die Verdampfungsvorgänge zu erforschen. Dadurch steht ein einfaches Verfahren zur Funktionsprüfung durch eine automatische Erfassung dieser Parameter wie Verdampfungszeit und Minimal- und Maximalheizdauer bereits während der Fertigung zur Verfügung.

Am Beispiel einer *Reinigungs- und Dichtstation für Farbtintendrucker* werden von HEINZL [1994] die Justierung eines Mikroschalters und des Motorträgers durch sensorische Eigenschaften von Aktoren beschrieben. Die Station dient der Reinigung des Druckkopfes durch Absaugen der Tinte und der Abdichtung bei längeren Stillstandszeiten. Der Antrieb der Einheit erfolgt über eine Motor-Getriebe-Einheit. Dabei wird in der einen Drehrichtung des Motors die Saugereinheit zugestellt, in der anderen Drehrichtung der Saugprozess durchgeführt. Die Funktion wird durch einen Mikroschalter gesteuert. Die grundsätzlichen Aufgaben der Justierung sind die korrekten Einstellungen der Motorlage und der Lage des Mikroschalters relativ zu seinem Schalthebel. Die Stellungen des Mikroschalters und des Motorträgers zeigen im Betrieb einen Einfluss auf den Motorstromverlauf. Der Motor wird somit nicht nur als Antrieb der Baugruppe verwendet, sondern auch zur Erfassung weiterer Informationen über den Justierprozess sowohl beim Mikroschalter als auch bei der Justierung des Motorträgers. Weiterhin lassen sich Funktionsprüfungen durch die Auswertung der Stromverläufe durchführen. Eine Undichtigkeit der Reinigungseinheit oder eine fehlerhafte Funktion der eingebauten Ventile sind dadurch zu detektieren.

WÜNSCHE [1993] zeigt die Nutzung der sensorischen Eigenschaften von Aktoren am Beispiel der *Funktionsprüfung eines Pneumatikventils* (Abbildung 2-3).

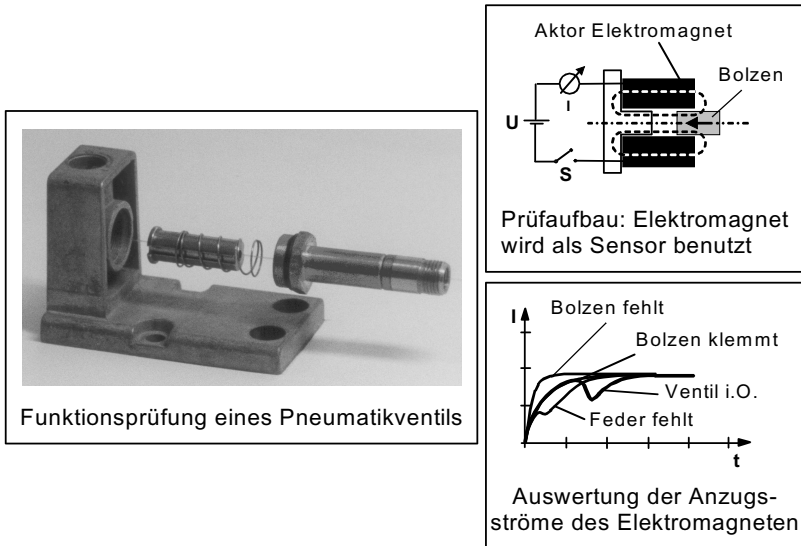


Abbildung 2-3: *Aufbau des Pneumatikventils (links und rechts oben) und Stromverlauf bei verschiedenen Fehlerarten (rechts unten) nach WÜNSCHE [1993]*

Zur Ansteuerung des Pneumatikventils wird ein mit einer Feder vorgespannter Hubkolben elektromagnetisch bewegt. Durch Freigabe und Verschluss von Düsen wird der Servokreis für den pneumatischen Hauptzylinder geschaltet. Bei der Montage können drei verschiedene Fehler auftreten. Zum ersten ist der Einbau der Feder, zum zweiten der Einbau des Hubkolbens unterblieben. Zum dritten verklemmt der Hubkolben aufgrund von Toleranzen oder Verschmutzung. Die Prüfung dieser Eigenschaften durch zusätzlich eingebrachte Sensoren ist äußerst aufwendig. Durch Nutzung der sensorischen Eigenschaften des Aktors kann der Aufwand deutlich verringert werden. Dabei zeigt der Stromverlauf in der Ansteuerspule beim Einschalten deutliche und fehlerspezifische Abweichungen gegenüber dem Normalbetrieb, wenn die oben genannten Montagefehler auftreten.

Zur *Funktions- und Qualitätskontrolle von PKW-Schiebedächern* greift REITER [1998] ebenfalls auf Produktaktoren zurück. Bei Schiebedächern werden unterschiedliche Merkmale wie das Betätigungsdrehmoment, die Öffnungs- und Schließzeiten, die Verschiebekraft des Sonnenschutzes und die Anwesenheit von

bestimmten Bauteilen geprüft. Dies geschieht über die Auswertung der Stromaufnahme des Gleichstrom-Nebenschluss-Elektromotors über einem Betätigungszyklus (Öffnen, Schließen, Ausheben, Absenken). Durch die Bestimmung eines Musterverlaufes und der Zuordnung der charakteristischen Merkmale zu den jeweiligen Produktfunktionen lassen sich Öffnungs- und Schließzeiten, die Betätigungskraft sowie die ordnungsgemäße Montage von Bauteilen ermitteln. Durch die Anwendung dieses Messverfahrens, das sich leicht auf andere Schiebedachtypen transferieren lässt, konnten die Prüfstandskosten um ca. 40% gesenkt werden.

### 2.4 Industrieroboter

Der Begriff Roboter kommt ursprünglich von dem slawischen Wort „Robota“, was „schwere Arbeit“ bedeutet [MÜLLER & SCHWEIZER 1987]. Ein Industrieroboter wird in der VDI 2860 [1990] als ein universell einsetzbarer Bewegungsautomat mit mehreren Achsen bezeichnet, dessen Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei (d.h. ohne mechanischen Eingriff) programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Er ist mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und kann Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben übernehmen. Er wird eingesetzt, um Menschen schwere, ergonomisch bedenkliche oder stupide Arbeiten abzunehmen und damit zu entlasten. Außerdem ist er ein häufiger Bestandteil von Automatisierungslösungen zur Steigerung von Qualität und Produktivität.

Industrieroboter zeichnen sich vor allem aber dadurch aus, dass ihre Bewegung und die von ihnen verwendete Peripherie durch den Anwender vorgegeben werden kann. Voraussetzung für diese Flexibilität und Universalität ist das Zusammenspiel zwischen der Robotermechanik und den Peripheriekomponenten auf der einen und einer entsprechenden Robotersteuerung auf der anderen Seite [KREUZER ET AL. 1994].

Der Industrieroboter spielt als Standardkomponente in der flexibel automatisierten Montage eine entscheidende Rolle. Man findet ihn inzwischen in vielen Bereichen der Produktionstechnik [SELIGER 1998]. Abbildung 2-4 zeigt die Einsatzzahlen von Industrierobotern in Deutschland.

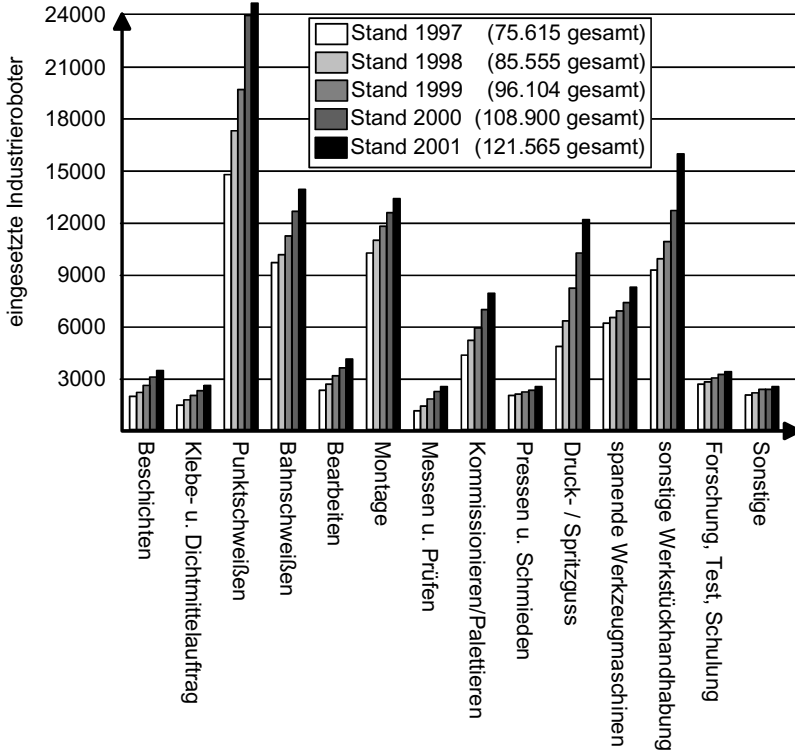


Abbildung 2-4: Einsatzzahlen von Industrierobotern in Deutschland [VDMA 2003]

### 2.4.1 Anforderungen an Robotersysteme

Aufgrund der hohen Universalität und Flexibilität des Einsatzes von Industrierobotern innerhalb automatisierter Montageanlagen hängen die gestellten Anforderungen stark vom Einsatz ab. Auch die durch den Roboter und dessen Steuerung verwendeten Peripherieeinrichtungen ziehen Anforderungen nach sich. Unabhängig von dem auszuführenden Prozess können jedoch nach KREUZER ET AL. [1994] und SCHULLER [1998] Anforderungen an das Robotersystem bzw. an die Robotersteuerung u.a. aus den folgenden Bereichen abgeleitet werden.

Dabei sind beim Roboter als Gesamtsystem

- Wiederhol- und Bahngenaugigkeit,
- Arbeitsraum (Form und Größe),
- Traglast (Nutzlast),
- Schwingungsverhalten und
- Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhalten

interessant, während ausschließlich bei der Steuerung

- mechanische und informationstechnische Schnittstellen, z.B. für Sensoren,
- die Möglichkeit zur Einbindung zusätzlicher Funktionen wie Überwachung oder Fehlererkennung,
- einfache Programmierbarkeit und
- Taktfrequenz und Rechenleistung

wichtig sind. Hinzu kommt noch der Aspekt der Wirtschaftlichkeit und damit der Anschaffungs-, Betriebs- und Wartungskosten des Robotersystems.

Es gilt zu beachten, dass sich die gewünschten Anforderungen aus den verschiedenen genannten Bereichen durchaus widersprechen können. So geht beispielsweise eine höhere Traglast oder ein größerer Arbeitsraum im Normalfall aufgrund der dann notwendigen größeren Bauart zu Lasten des Schwingungsverhaltens bzw. zu Lasten der Genauigkeit. Für alle Industrieroboter gilt jedoch die Grundanforderung einer möglichst genauen Einhaltung von vorprogrammierten Bewegungsabläufen, auch unter veränderlichen, ggf. messtechnisch erfassbaren Umweltbedingungen [KREUZER ET AL. 1994].

### 2.4.2 Industrierobotersteuerung

Die Steuerung von Industrierobotern dient dem Anwender dazu, Bewegungsabläufe eines Roboters entlang festgelegter Bahnen, zu festgelegten Punkten, mit frei definierbaren Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerten, gepaart mit Steueraktivitäten der Peripherie frei zu programmieren.



ZHAO [1990] beschreibt vereinfacht die Steuerungsstruktur von Industrierobotern (Abbildung 2-5). Im Anwenderprogramm werden die Schalt- und Bewegungs-befehle programmiert. Das Programm bestimmt dabei die Reihenfolge und den Zeitpunkt der Abarbeitung. Die einzelnen Befehle werden im Interpreter weiterverarbeitet und die Bewegungs-befehle von den Schaltbefehlen getrennt.

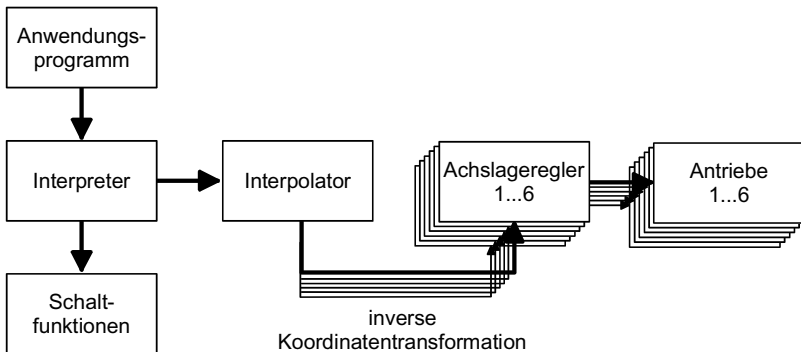


Abbildung 2-5: Vereinfachte Struktur einer Steuerung von Industrierobotern

Aus den Bewegungs-befehlen werden die Bahnverläufe in parametrischer Form erzeugt. Aus dem errechneten Bahnverlauf und aus Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerten generiert der Interpolator zyklisch im Interpolationstakt (ca. 6-24ms) die Stützstellen der Bewegungsbahn. Diese werden durch eine inverse Koordinatentransformation in achsspezifische Koordinaten umgerechnet und daraufhin an die einzelnen Achsregelungen weitergegeben. Hier erfolgt die Umsetzung der Programmbefehle in eine Roboterbewegung. Damit die geforderte Genauigkeit dieser Bewegung gewährleistet ist, wird ein Lageregelkreis mit einer achsspezifischen Positions- und Geschwindigkeitsmessung im Feininterpolationstakt, in etwa 1-2ms, durchlaufen.

### 2.4.3 Schnittstellen in Robotersystemen

Eine Robotersteuerung hat in der modernen Automatisierungstechnik nicht mehr nur die Aufgabe, die Achsen der Kinematik entsprechend der gewünschten Bewegung zu steuern. Durch die immer komplexer werdenden Handhabungs- und Montageaufgaben ist es notwendig, das Robotersystem „intelligent“ zu machen und mit Sinnen auszustatten. Diese Intelligenz wird durch externe Komponenten,

in erster Linie Sensoren, erreicht. Damit die Informationen der zusätzlichen Peripherie von der Robotersteuerung genutzt werden können, muss ein Datenaustausch über so genannte Daten- bzw. Kommunikationsschnittstellen erfolgen (siehe Kapitel 2.4.3.2). Durch entsprechende Datenschnittstellen kann innerhalb aller Ebenen der Robotersteuerung eingegriffen werden.

### 2.4.3.1 Begriffsdefinition

Eine Schnittstelle ist eine Vorrichtung zum Zweck des Informationsaustausches mit anderen informationsverarbeitenden Systemen [SCHÜRMAN 2003]. Unter dem Begriff Schnittstelle wird die Gesamtheit aller Festlegungen der physikalischen Eigenschaften der Leitungen, der auf den Schnittstellenleitungen ausgetauschten Signale und der Bedeutung der ausgetauschten Signale verstanden [DIN 44302 1987]. Sie stellt somit nach DIN 19240 [1985] den Übergang zwischen einer elektronischen Steuerung und ihrer Peripherie, z.B. Sensor, dar. Ort des Übergangs ist die Anschlussstelle der Industrieroboter-Steuerung [DIN V 66 311]. Obwohl die Schnittstelle die Grenze zwischen zwei Systemen darstellt, ist sie nur für ein System bzw. aus dessen Sicht definiert.

Kommunikationsschnittstellen sind externe Schnittstellen, über die verschiedene Geräte bzw. deren Steuerungen miteinander kommunizieren können. Kommunikation ist dabei der Austausch von Informationen zwischen Maschinen bzw. Geräten. Es müssen Geometrie und Belegung der Steckverbindungen definiert, die elektrische Darstellung und Wiedergewinnung der Informationen abgestimmt und eine Sicherung gegen Übertragungsfehler vorhanden sein. Weiterhin ist es notwendig, dass der Dialog zwischen den Kommunikationspartnern gesteuert und die Daten weiterverarbeitet werden [VDI/VDE 2422 1994, S. 12]. Dafür ist eine vorherige Vereinbarung u.a. über Art und Bedeutung der verwendeten Zeichen und die Reihenfolge der Informationen, die übertragen werden, notwendig [KASPERS & KÜFNER 2002].

### 2.4.3.2 Schnittstellenarten

Um die Flexibilität von Robotersystemen zu erhöhen, die geforderte Montagequalität zu gewährleisten und trotzdem wirtschaftlich zu produzieren, besteht eine Möglichkeit im Einsatz von Sensorsystemen. Nach SCHRAFT [2001] ist die Schaffung einer „technischen Intelligenz“ ein immer stärker werdender Trend in der Automatisierungstechnik. Diese Intelligenz wird durch die Steuerung, die

eingesetzten Sensoren und Bedienerchnittstellen innerhalb flexibler, standardisierter Architekturen geschaffen und durch eine Vernetzung von Hard- und Softwarekomponenten realisiert.

Trotz einer Leistungssteigerung der Sensorsysteme, einer Reduzierung des Interpolationstaktes in Robotersteuerungen und einer Zunahme von offenen Robotersteuerungen mit verschiedensten definierten Schnittstellen [SCHNEIDER 1998B] kommen Sensoren jedoch noch nicht in dem Maße zum Einsatz, in dem es oftmals notwendig wäre. Gründe hierfür sieht WENK [2002] vor allem in einer unzureichenden Standardisierung von Datenschnittstellen und dem hohen Engineeringaufwand zur Integration der Sensordaten.

Normalerweise müssen Sensorwerte vorverarbeitet werden, ehe sie von der Robotersteuerung benutzt werden können. Diese Vorverarbeitung erfolgt bei intelligenten Sensoren in diesen selbst (siehe Kapitel 2.5.3.2). Bei anderen Sensoren ist ein zusätzlicher Rechenprozessor notwendig, da Robotersteuerungen meist nicht in der Lage sind, zusätzliche Rechenaufgaben zu übernehmen [ZELLER & SCHÖNHERR 1993]. Die Programmierung der Software sowohl zur Vorverarbeitung der Sensorsignale als auch zur Datenintegration in die Robotersteuerung ist stark anwendungsabhängig und wird in der Regel als Sonderlösung realisiert. Aus diesen Gründen erfolgt die Integration von Sensordaten in die Robotersteuerung im Normalfall über einen externen Rechner, welcher die Benutzerschnittstelle darstellt und die Verarbeitung der Sensordaten vornimmt. Für programmtechnische Schnittstellen für den Datenaustausch von Computersystemen, wie es bei der Kommunikation von Sensoren und Robotersteuerungen der Fall ist, wurde als Richtlinie das ISO/OSI-Referenzmodell entwickelt, welches unter anderem HENSHALL & SHAW [1990] beschreiben.

Sensorschnittstellen werden meist an bestimmte Sensoren und bestimmte Aufgaben angepasst. Das heißt auch, dass für jede Art von Sensor eine eigene Schnittstelle entwickelt wird. Sensorsignale haben nach SWACZINA [1983] die Funktion, den Arbeitsablauf und den Arbeitsraum zu überwachen, statische Bewegungskorrekturdaten oder dynamische Korrekturdaten zu liefern. Sie können dabei schaltend (z.B. schalten eines Greifers anhand eines Sensorsignals), steuernd, suchend (z.B. suchen einer Position durch Bewegungen in unterschiedliche Richtungen), regelnd, lernend oder leitend (z.B. zur Prozesslenkung) auf die Steuerung einwirken [SCHMID 1989]. Je nach Funktion befinden sich die Schnittstellen an einer anderen Stelle der Steuerungshierarchie.

WENK [2002] und KWON [2001] beschreiben die möglichen Schnittstellen auf den unterschiedlichen Ebenen einer Robotersteuerung. Auf der obersten Ebene, der Ablaufsteuerung, kann über Schnittstellen der Programmablauf beeinflusst werden, z.B. über Näherungsschalter. Dafür sind einfache I/Os ausreichend. In der nächsten Ebene, dem Interpreter, erlauben es Schnittstellen, die Bewegungssätze zu beeinflussen, bevor daraus der Bahnverlauf in parametrischer Form berechnet wird. Hier kommen z.B. ortsfeste, messende Sensoren zum Einsatz. Durch Korrekturwerte, beispielsweise von einem mitgeführten Bildverarbeitungssystem, werden Position und Orientierung des Roboters geändert. Im Interpolator werden zyklisch im Interpolationstakt die Stützstellen des errechneten Bahnverlaufes berechnet. Durch eine Schnittstelle können diese Stützstellen verändert und damit die Roboterbahn online korrigiert werden. Schnittstellen der Lageregelung ermöglichen eine Korrektur der Roboterbahn im Feininterpolationstakt. Die Korrekturwerte müssen dazu für jede einzelne Roboterachse vorliegen.

Aufgrund der unterschiedlichen zu verarbeitenden Signale gibt es auch unterschiedliche Schnittstellen. Diese übertragen binäre, digitale und analoge Signale [DIN V 66 311].

- *Analoge Schnittstellen* arbeiten entweder mit Spannung oder Stromstärke. Die gängigsten Varianten sind die -10V..+10V und 4..20mA-Schnittstellen. Dabei entspricht der Strom- bzw. Spannungsbereich 0% bis 100% des Messbereiches. In der Automatisierungstechnik hat sich die 4..20mA-Schnittstelle allgemein durchgesetzt [KOMISCHKE 1988].
- *Digitale Schnittstellen* kann man weiter unterteilen in parallele (z.B. zusammengefasste I/Os), bit-serielle (z.B. RS232) und byte-serielle (z.B. IEC-Bus) Schnittstellen [SCHMID 1989]. Im Bereich digitaler Schnittstellen gibt es bis heute keinen allgemeingültigen Standard. Stattdessen sind inzwischen verschiedenste Formate mit unterschiedlichen Funktionalitäten vorhanden. WELLING [1994] beschreibt RS-232/v.24, Ethernet mit TCP/IP und MAP 3.0 als die gängigsten Kommunikationsmedien in der Fertigungstechnik.
- *Binäre Schnittstellen* (z.B. einzelne I/Os) sind eine spezielle Form digitaler Schnittstellen. Die zu übertragenden Signale besitzen lediglich zwei diskrete Funktionswerte, „0“ und „1“. Da eine Vielzahl an einfachen Komponenten

durch diese Signalart geschaltet wird, werden sie in der Literatur meist extra behandelt [BÄRNREUTHER 1992].

Abbildung 2-6 fasst noch einmal die gängigsten Schnittstellen in Robotersteuerungen zusammen.

		Beschreibung	Beispiel
<b>analog</b>		Strom- bzw. Spannungsbereich entspricht 0%-100% des Messbereiches.	<ul style="list-style-type: none"> <li>-10V..+10V</li> <li>4mA..20mA</li> </ul>
<b>digital</b>	<b>parallel</b>	Digitale Signale werden gleichzeitig übertragen.	<ul style="list-style-type: none"> <li>zusammengefasste I/Os</li> </ul>
	<b>bit-seriell</b>	Digitale Signale werden nacheinander bitweise übertragen.	<ul style="list-style-type: none"> <li>RS 232</li> </ul>
	<b>byte-seriell</b>	Digitale Signale werden nacheinander byteweise übertragen.	<ul style="list-style-type: none"> <li>IEC-Bus</li> </ul>
<b>binär</b>		Sonderform der digitalen Schnittstelle. Besitzt nur zwei diskrete Werte ("0" und "1").	<ul style="list-style-type: none"> <li>digitaler Eingang</li> <li>digitaler Ausgang</li> </ul>

Abbildung 2-6: Übersicht gängiger Schnittstellen in Robotersteuerungen

### 2.4.3.3 Das ISO/OSI Referenzmodell (ISORM)

Im Jahre 1977 begann die Internationale Organisation für Standardisierung (ISO), Normen zur Kommunikation von Computern zu entwickeln und unter dem Namen OSI (Open System Interconnection) zusammenzufassen. Ziel dieser Normen war die Bereitstellung von kommunikationsbasierten Benutzerdiensten zwischen Computern verschiedener Herkunft. Damit sollten Benutzer von Computersystemen unabhängig vom Hersteller der Systeme werden.

Die Grundlage aller ISO/OSI Normen ist das 1979 erstmals veröffentlichte Referenzmodell ISORM [ISO/IEC 7498 1994]. Dieses Modell unterteilt die

## 2 Situationsanalyse

---

komplexen Prozesse im Computerkommunikationsbereich in sieben Schichten und bildet so einen begrifflichen Rahmen. Als Schicht wird hier eine Sammlung von Unterprogrammen verstanden, die bestimmte Aufgaben erfüllen. Die Bitübertragungsschicht stellt zusätzlich dazu noch die Hardware-Komponenten für die Verbindung der Kommunikationspartner bereit.

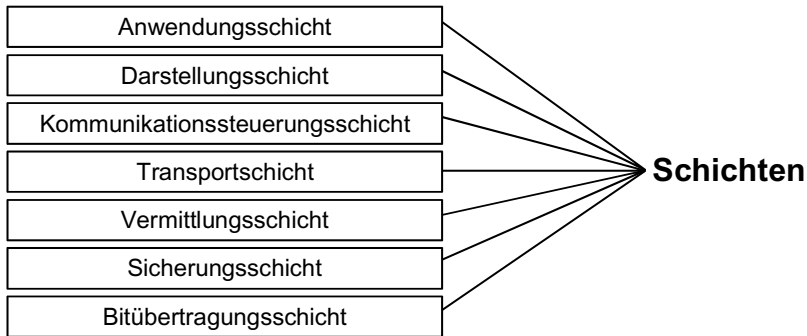


Abbildung 2-7: Schichten des ISO/OSI-Referenzmodells (ISORM)

Das ISORM legt die Aufgaben jeder einzelnen Schicht und die Verbindungen zwischen den Nachbarschichten fest. Zwei Computersysteme, die an einer Kommunikation teilnehmen, müssen zu den einzelnen Normen konforme Implementierungen des Referenzmodells besitzen.

Im Folgenden werden kurz die hauptsächlichen Aufgaben der einzelnen Schichten nach HENSHALL & SHAW [1990] beschrieben. Die Aufgabe, Daten und Prozesse an eine übergeordnete oder an eine untergeordnete Schicht weiterzugeben, ist dabei allen Schichten gemein.

### **Anwendungsschicht**

Das eigentliche Ziel bzw. die genaue Aufgabe der Schnittstelle ist in der Anwendungsschicht verwirklicht. Diese stellt dem Endteilnehmer die kommunikationsbasierten Dienste zur Verfügung. Sie beinhaltet auch die Übertragung von Informationen über OSI zwischen verschiedenen Computersystemen. Da die Dienste der Anwendungsschicht von der Art der Anwendung abhängen, können sie nicht allgemeingültig angegeben werden. Bekannte und häufig benötigte Anwendungsfunktionen sind jedoch Dateiübertragung oder Nachrichtenübertragung. Die untergeordneten Schichten existieren ausschließlich, um die Prozesse,

die innerhalb der Anwendungsschicht stattfinden, zu ermöglichen und zu unterstützen.

### **Darstellungsschicht**

Die Aufgabe der Darstellungsschicht ist die Bereitstellung einer gemeinsamen Darstellung der Anwendungsinformation. Sie fungiert somit als Dolmetscher zwischen den Kommunikationspartnern. Codiert ein Partner beispielsweise Daten im ASCII-Code, während der andere Partner Unicode benutzt, muss sie die Überführung der ASCII-Daten in Unicode sicherstellen und umgekehrt. Dazu verwendet die Darstellungsschicht ein festgelegtes, unter Umständen vom Ausgangsformat unabhängiges internes Format, in welches die Daten übersetzt werden. Aus diesem Format erfolgt dann die anschließende Rückübersetzung.

### **Kommunikationssteuerungsschicht**

Die Kommunikationssteuerungsschicht behandelt den genauen Ablauf eines Kommunikationsprozesses. Nach dem ISORM ist sie insbesondere der Schnittpunkt zwischen der Echtzeitkommunikation der unteren Schichten und der eventuellen Nichtezeitkommunikation der anwendungsorientierten oberen Schichten. Echtzeitkommunikation bedeutet dabei, dass bei Aufruf eines Unterprogramms die Nachricht umgehend verschickt wird. Dass dafür u.U. viele Einzelnachrichten verschickt werden müssen, um diesen Eindruck zu erwecken, ist für diese Schichten nicht ersichtlich. Die Kommunikationssteuerungsschicht stellt Dienste für die Verwaltung und Steuerung des Datenflusses in Ende-zu-Ende-Verbindungen bereit. Dazu gehört zum Beispiel das Einfügen von Synchronisationspunkten, um eine abgebrochene Datenübertragung nicht wieder von vorne beginnen zu müssen. Verwaltungsdienste ermöglichen das Starten, Anhalten, Verlassen und wieder in Gang Setzen der Kommunikation.

### **Transportschicht**

Die Aufgabe der Transportschicht ist die Ausübung einer Fehlerbehandlung von Daten bei einer Übertragung über verschiedene Teilnetze, die nicht für einen zuverlässigen Datenaustausch entworfen wurden. Die Transportschicht stellt sicher, dass die höheren Schichten nur fehlerfreie Daten erhalten. Dies sagt jedoch nichts über semantische Fehler der Daten aus. Sie erfüllt somit einen Dienst mit „ausgewählter Dienstqualität“ wie z.B. Zuverlässigkeit und Geschwindigkeit. Die Dienste der Transportschicht sind dabei unabhängig von Typ, Qualität und Anzahl der betroffenen Teilnetze.

### **Vermittlungsschicht**

Die Vermittlungsschicht befasst sich hauptsächlich mit der Wegewahl, also dem Aufbau eines Pfades zwischen zwei Computersystemen, und der Übertragung, d.h. dem Gebrauch von Zwischensystemen, um den Datenfluss zwischen Teilnetzen zu ermöglichen.

### **Sicherungsschicht**

Die Sicherungsschicht hat die Aufgabe der Fehlererkennung und -behebung auf niedriger Ebene.

### **Bitübertragungsschicht**

Die Bitübertragungsschicht bezeichnet die Verbindung von Computersystemen zum Übertragungsmedium. Sie schließt Aspekte, wie z.B. die physikalische Verbindung zum physikalischen Medium oder das für die Übertragung zu verwendende Spannungsniveau, ein.

## **2.5 Mechatronik**

### **2.5.1 Entstehung und Definition des Begriffes Mechatronik**

Die klassische Mechanik beschäftigt sich mit der Frage, welche Bewegung ein Körper ausübt, wenn eine bestimmte Kraft auf ihn wirkt und definierte Zwangsbedingungen gelten. In der heutigen Zeit wird innerhalb von Systemen oft die Umkehrung dieser Fragestellung behandelt, d.h. welche Kraft muss auf einen Körper ausgeübt werden, um eine festgelegte Bewegung auch bei auftretenden Störungen zu erreichen. Die technische Realisierung dieses Syntheseproblems erfordert das Miteinbeziehen weiterer Disziplinen zur Mechanik wie Elektrik, Elektronik und Informatik [HEIMANN ET AL.1998, SCHWEITZER 1989].

Das Kunstwort Mechatronik ist die sprachliche Verbindung dieser Disziplinen. Es setzte sich ursprünglich aus den Worten Mechanik und Elektronik zusammen und entstand aus der Idee heraus, mechanische Systeme durch den Einsatz von Elektronik zu ergänzen und dadurch „intelligent“ zu machen. Der Begriff Mechatronik wurde 1969 von einem Mitarbeiter der japanischen Yaskawa Electric Company geprägt und 1972 als Warenzeichen geschützt. Da sich der Ausdruck schnell verbreitete, verzichtete die Firma 1982 auf alle diesen Namen betreffenden Rechte [KYURA & OHO 1996, SCHERNIKAU 2001]. Die Entwicklung



der letzten dreißig Jahre vor allem im Bereich der Informationstechnologie hat dazu geführt, dass die Intelligenz der Produkte nicht mehr durch analoge und digitale Kreisläufe, sondern vor allem durch Prozessoren und Software erreicht wird [AUSLANDER 1996]. Dadurch wird der Informatik als eine weitere Disziplin in der Mechatronik eine entscheidende Bedeutung zugesprochen. Die Mechatronik ist also keine neue Technologie, sondern eine Synergie verschiedener bereits existierender Technologien [HSU 1997] (Abbildung 2-8).

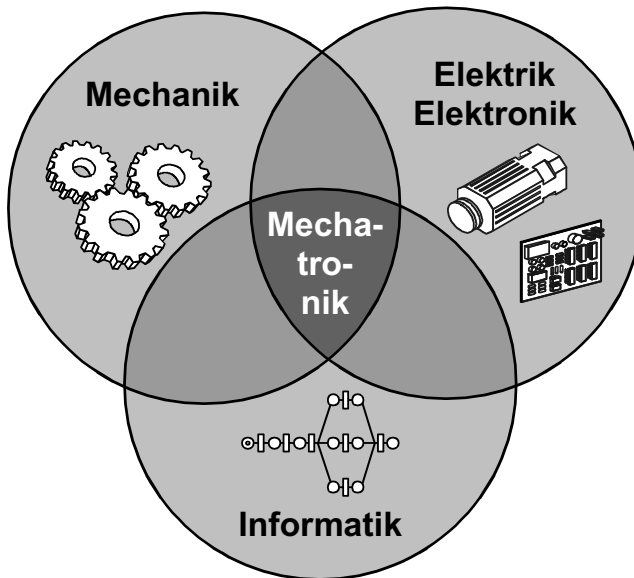
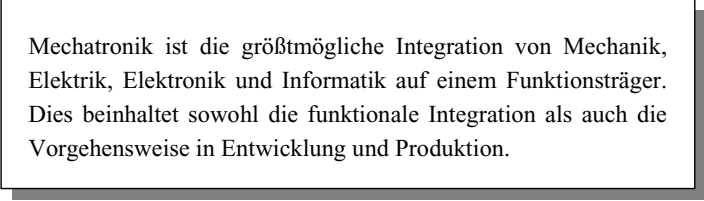


Abbildung 2-8: Synergie der Disziplinen in der Mechatronik

Da die Mechatronik in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen und sich ständig weiterentwickelt hat, existiert im heutigen Sprachgebrauch keine eindeutige Definition für den Begriff. Eine international anerkannte Definition liefert z.B. das IFTMM (International Federation for the Theory of Machines and Mechanism): „*Mechatronics is the synergistic combination of precision mechanical engineering, electronic control and systems thinking in design of products and manufacturing processes*“ [KYURA & OHO 1996]. Weitere Definitionen liefern unter anderem AUSLANDER [1996], BRUSSEL [1996], HSU [1997], KALLENBACH [2001], SCHERNIKAU [2001], TOMIZUKA [2000] und das

**Bayerische Kompetenznetzwerk für Mechatronik, BKM [2003].** All diesen Definitionen ist gemein, dass die Mechatronik eine interdisziplinäre Vorgehensweise zur Entwicklung von Produkten und ein interdisziplinäres Zusammenspiel von Komponenten der einzelnen Teilbereiche zur Erreichung der Produktfunktionalität ist. Während früher das mechatronische Produkt im Vordergrund stand, werden inzwischen mit der Mechatronik auch die Abläufe und Zusammenhänge bei Entwicklung und Produktion mechatronischer Systeme verbunden. Die Mechatronik stellt eine neue Art des Denkens und Handelns dar, in der alle beteiligten Disziplinen gemeinsam betrachtet und behandelt werden müssen. Sie ist damit mehr als nur die Summe dieser Teilbereiche.

Im Rahmen dieser Arbeit soll unter dem Begriff Mechatronik deshalb Folgendes verstanden werden:



Mechatronik ist die größtmögliche Integration von Mechanik, Elektrik, Elektronik und Informatik auf einem Funktionsträger. Dies beinhaltet sowohl die funktionale Integration als auch die Vorgehensweise in Entwicklung und Produktion.

*Abbildung 2-9: Definition der Mechatronik im Rahmen der vorliegenden Arbeit*

Im Gegensatz zu SCHERNIKAU [2001] stellt hier die geometrische Integration keine zwingende Voraussetzung der Mechatronik dar. So soll unter einem Funktionsträger ein in sich geschlossenes System, welches aber nicht zwangsweise in einem Gehäuse untergebracht sein muss, verstanden werden. Beispielsweise wird hier ein Industrieroboter, der durch Kabel mit seiner Steuerung verbunden ist, als ein einziger Funktionsträger bezeichnet.

### 2.5.2 Mechatronische Systeme

Nach der Definition des Begriffes Mechatronik wird nun auf mechatronische Systeme eingegangen. Der Beschreibung eines mechatronischen Systems folgen der Aufbau und die wesentlichen Eigenschaften im Gegensatz zu klassischen mechanischen Systemen. Schließlich werden typische mechatronische Komponenten näher betrachtet.

### 2.5.2.1 Beschreibung

Die VDI/VDE 2422 [1994] definiert ein technisches System als ein kompaktes System, welches es dem Benutzer ermöglicht, einen technischen Prozess gezielt ablaufen zu lassen und zu steuern. Es besitzt eine klare Abgrenzung zu seiner Umwelt, die nur von Ein- und Ausgangsgrößen in Form von Stoff-, Energie- und Informations- bzw. Signalflüssen überschritten werden kann. Innerhalb dieser Grenzen kann man es in Teilsysteme (Komponenten) untergliedern, welche ebenfalls über Stoff-, Energie- und Signalflüsse verknüpft sind.

Mechatronische Systeme sind technische Systeme. Sie stellen eine Weiterentwicklung klassischer mechanischer Systeme in mehreren Stufen dar. In der ersten Stufe war die Funktionserfüllung durch rein mechanische Lösungsprinzipien mittels mechanischer Komponenten gegeben. Die dafür notwendige Energie wurde beispielsweise durch Muskelkraft bereitgestellt. Die nächste Stufe der Weiterentwicklung sind elektromechanische Systeme, die zusätzlich elektrische Lösungsprinzipien und Komponenten integriert haben, um die Mechanik zu unterstützen. Meist spiegelt sich dies in der Verwendung von elektrischer Energie, beispielsweise elektrischen Antrieben, zur Funktionserfüllung wieder. In der dritten Stufe wird das elektromechanische System durch die Elektronik ergänzt und erweitert. Analoge und digitale Signalkreisläufe steuern die Funktion. Heutige mechatronische Systeme sind die vierte Stufe dieser Entwicklung. Die integrierte Informationsverarbeitung wird von Mikroprozessoren und Software durchgeführt.

Mechatronische Systeme besitzen eine kennzeichnende Produktstruktur. Sie bestehen aus Mechanik (Grundstruktur), Aktoren, Sensoren und mindestens einem Mikroprozessor mit Software zur Informationsverarbeitung. Elektrik, Elektronik und Informatik ergänzen die mechanische Grundstruktur. Die uneingeschränkte Funktionalität des Gesamtsystems wird nur durch das Zusammenwirken sämtlicher Komponenten erreicht. Eine Erfüllung der Funktionalität ist durch die Einzelkomponenten nicht möglich. Dabei spielt der Mikroprozessor die zentrale Rolle [TOMIZUKA 2000]. Die Sensoren messen Zustandsgrößen des Systems und der Umwelt. Diese werden im Mikroprozessor mit Software und Funktionen der Digitalelektronik verarbeitet. Über Steuer- und Regelungslogiken werden die notwendigen Einwirkungen auf die Mechanik bestimmt und als Stellensignale an die Aktoren weitergegeben. Die Aktoren setzen nun diese Signale in gezielte Bewegungen um und beeinflussen so wiederum die Mechanik und damit die Zustandsgrößen. Nach SCHWEIZER [1989] nimmt ein typisches mechatroni-

sches System Signale auf, verarbeitet sie und gibt Signale weiter, die dann z.B. in Kräfte und Bewegungen umgesetzt werden (Abbildung 2-10).

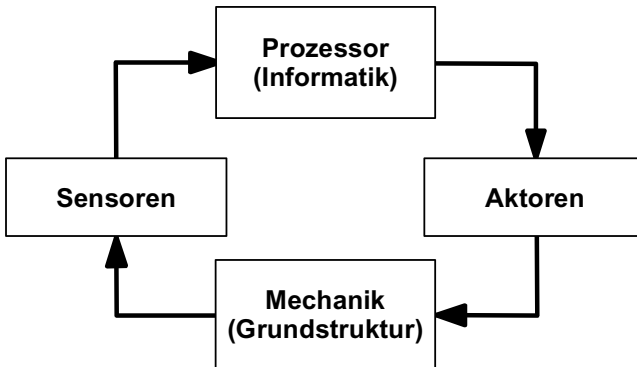


Abbildung 2-10: Grundschemata eines mechatronischen Systems

Die Komponenten sind, wie oben bereits erwähnt, durch Stoff-, Energie- und Signalflüsse untereinander verbunden. Ziel des Gesamtsystems ist es dabei, Stoff- und Energieflüsse in der Mechanik zu kontrollieren [GAUSEMEIER & LÜCKEL 2000, PAHL & BEITZ 1997]. Die Mechanik steht mit der Umwelt ebenfalls durch Stoff- und Energieflüsse in Kontakt. Zwischen ihr und den Sensoren und Aktoren fließen sowohl Energie zum Messen und Einwirken auf die Mechanik als auch Mess- und Steuerinformationen. Die Informationsverarbeitung besitzt Informationsflüsse zu den Aktoren und von den Sensoren (Prozessschnittstelle). Außerdem ist sie mit der Umwelt verbunden, um mit anderen Steuerungen (Kommunikationsschnittstelle) oder einem Benutzer (Benutzerschnittstelle) kommunizieren zu können. Abbildung 2-11 zeigt ein mechatronisches System mit seinen Flüssen.

Aus der allgemeinen Struktur eines mechatronischen Systems nach Abbildung 2-10 und Abbildung 2-11 lassen sich auch Systeme ableiten, die nicht alle typischen Komponenten umfassen. So sind etwa Systeme mit Sensoren und Software jedoch ohne Aktoren denkbar. Da die Nutzung mechatronischer Produktkomponenten im Montageprozess den Kern der vorliegenden Arbeit darstellt, ist es unerheblich, ob ein Produkt alle typischen mechatronischen Komponenten beinhaltet oder nur einen Teil. Aus diesem Grund sollen die betrachteten Systeme im

Folgenden als „Systeme bzw. Produkte mit mechatronischen Komponenten“ bezeichnet werden.

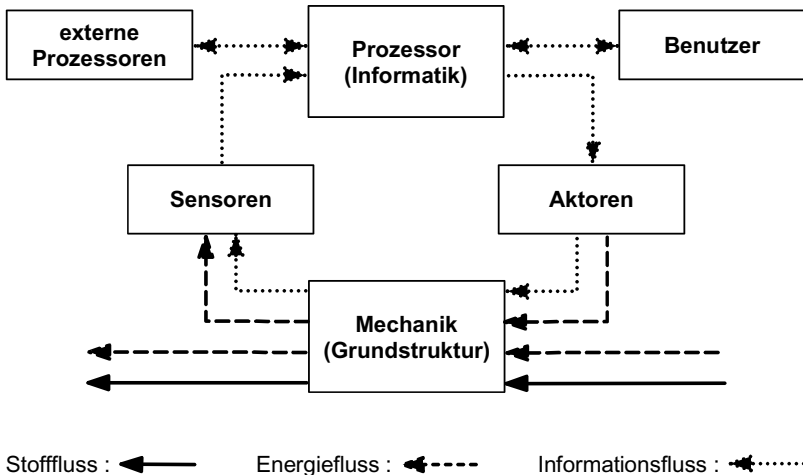


Abbildung 2-11: Mechatronisches System und seine Stoff-, Energie- und Informationsflüsse.

### 2.5.2.2 Eigenschaften mechatronischer Systeme

Durch die funktionelle Integration von Elektrik, Elektronik und Informatik in die Mechanik weisen Systeme mit mechatronischen Komponenten im Vergleich zu Systemen des klassischen Maschinenbaus veränderte Eigenschaften auf. Diese Eigenschaften können gegliedert werden in strukturelle bzw. geometrische und funktionelle Eigenschaften. ISERMANN [1998] unterteilt die funktionellen Eigenschaften weiterhin in Funktionsverbesserung und Funktionserweiterung (Abbildung 2-12).

Die *strukturellen bzw. geometrischen Eigenschaften* ergeben sich aus der Tatsache, dass die Teilfunktionen eines Systems mit mechatronischen Komponenten auf verschiedenen physikalischen Ebenen realisiert werden (Heterogenität). Diese Heterogenität führt zu einer größeren Anzahl von miteinander verkoppelten Elementen und damit zu einer größeren Komplexität der Produktstruktur. Trotz des komplexeren Aufbaus wird in diesen Systemen bei gleicher Anzahl an Funktionen eine Verringerung der mechanischen Bauelemente erreicht und die

## 2 Situationsanalyse

Anzahl der multifunktionalen Bauelemente nimmt zu. Eine Reduktion von Systemvolumen und Systemgewicht ist die Folge [KALLENBACH ET AL. 1997, REINHART ET AL. 2001, SCHERNIKAU 2001]. Allerdings gewinnen die notwendigen Montageprozesse aufgrund des engen Zusammenspiels der Einzelkomponenten ebenfalls an Komplexität und erfordern ein hohes Maß an Montagequalität.

strukturell / geometrisch	funktionell	
	Funktionsverbesserung	Funktionserweiterung
<ul style="list-style-type: none"> <li>- heterogener</li> <li>- komplexer</li> <li>- weniger mechanische Bauelemente</li> <li>- multifunktionale Bauelemente</li> <li>- kleiner</li> <li>- leichter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erhöhung funktionaler Grenzwerte (Genauigkeit, Beschleunigung, etc.)</li> <li>- Automatisierung von Funktionen</li> <li>- Benutzerfreundlichkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bestimmung nicht direkt messbarer Zustände</li> <li>- höhere Systemzuverlässigkeit</li> <li>- flexible Anpassung an Anforderungen</li> </ul>

Abbildung 2-12: Eigenschaften mechatronischer Systeme im Vergleich zu klassischen mechanischen Systemen

Die *funktionellen Eigenschaften* verändern sich gegenüber klassischen mechanischen Systemen vor allem dadurch, dass ursprünglich mechanische Lösungsprinzipien durch eine Verbindung von elektrischen, elektronischen und informationstechnischen Lösungen ergänzt oder ersetzt werden. Systemfunktionen können dabei entweder durch Hardware oder Software gelöst werden. Dadurch werden Systemfunktionen verbessert oder neue Funktionen generiert. Sie werden in hohem Maße durch nichtmaterielle Elemente wie Software bestimmt [HEIMANN ET AL. 1998]. SCHWEITZER [1989] spricht sogar von der Software als Maschinenelement. Damit eröffnen sich wesentlich flexiblere Gestaltungsmöglichkeiten für mechatronische Systeme.

Bei *Funktionsverbesserungen* werden oft aufwendige oder unzureichende mechanische Lösungen durch den Einsatz von Elektronik und Informatik unterstützt oder abgelöst. Dadurch werden die funktionellen Grenzwerte verbessert und der Betriebsbereich vergrößert. Beispielsweise kann eine hohe Positioniergenauigkeit nicht alleine durch mechanische Präzision, sondern geregelt durch einen Sollwert-Istwert-Vergleich mit anschließender Rückführung erreicht werden. Der

Einsatz von Elektronik und Informatik erlaubt auch einen höheren Grad der Automatisierung von Produktfunktionen wie etwa die Autofokussfunktion in Fotokameras. Gleichzeitig wird die entstehende Funktionskomplexität durch einfach zu bedienende Systemsteuerungen oder durch eine Automatisierung überschaubar und die Benutzerfreundlichkeit erhöht.

Die Mechatronik ermöglicht darüber hinaus eine *Erweiterung der Systeme mit Funktionen*, die ohne Mechatronik nicht lösbar wäre. Ein gezieltes Abfragen von Systemzuständen und das anschließende Verarbeiten dieser Messgrößen ermöglichen eine Bestimmung nicht direkt messbarer Größen im System. Mittels einer Regelung gelingt es, diese Größen gezielt zu beeinflussen. Beispiele hierfür sind zeitabhängige Variablen wie etwa Temperatur und Schlupf oder Parameter wie Steifigkeiten und Widerstände. Durch den Einsatz der Elektronik und Informatik lassen sich auch Überwachungsfunktionen mit Fehlerfrüherkennung und der sofortigen Reaktion mit Gegenmaßnahmen generieren. Gerade bei immer komplexer werdenden Strukturen gewährleisten sie eine hohe Systemzuverlässigkeit. Die flexible und schnelle Anpassung an die sich ändernden Anforderungen wird dadurch möglich, dass ein Teil der Systemfunktionen programmierbar und damit schnell und einfach zu ändern ist. Bei bereits vorkonfigurierten Systemeigenschaften kann dies durch die Verwendung unterschiedlicher Softwaremodule, welche die gewünschten Funktionen freischalten oder nicht gewünschte Funktionen sperren, erfolgen [ISERMANN 1998, KALLENBACH 2001].

Obwohl Systeme mit mechatronischen Komponenten eine ganze Reihe an Potentialen bieten, bergen diese auch Gefahren. Ein Problem, welches derartige Systeme oft mit sich bringen, ist das größere Betriebsrisiko gegenüber klassischen mechanischen Systemen trotz einer höheren Systemzuverlässigkeit. Beispielsweise müssen X-by-Wire-Systeme (siehe auch Kapitel 2.5.4) redundant mit mechanischen, hydraulischen oder elektrischen Backupssystemen ausgestattet sein [REINHART ET AL. 2001]. AUSLANDER [1996] beschreibt in einem Beispiel ein weiteres Problem mechatronischer Systeme. So konnte aufgrund von Softwarefehlern in der Steuerung des Gepäckhandling-Systems der internationale Flughafen von Denver erst mit fast eineinhalb Jahren Verspätung eröffnet werden, was einen Schaden von einer Milliarde Dollar verursachte.

### 2.5.3 Mechatronische Komponenten

#### 2.5.3.1 Begriffsdefinition

Wie in den vorangegangenen Kapiteln bereits erwähnt, kann man die meist komplexe Struktur eines mechatronischen Systems verallgemeinert als ein Zusammenspiel der Mechanik mit den Komponenten Aktor, Sensor und Prozessor bzw. Software darstellen. Die Mechanik bildet dabei die physikalische Tragstruktur. Ihre Aufgabe ist es, bestimmte Bewegungen zu erzeugen und den mechanischen Energiestrom zu übertragen. In diese Tragstruktur sind die übrigen Komponenten nicht nur physikalisch, sondern auch funktionell eingebettet. Da die Aktoren, Sensoren und Prozessoren mit Software dazu beitragen, aus der reinen Mechanik ein mechatronisches System zu generieren, werden sie im Weiteren als mechatronische Komponenten bezeichnet (Abbildung 2-13). Im Folgenden werden die einzelnen mechatronischen Komponenten beschrieben.

Mechatronische Komponenten sind Sensoren, Aktoren oder Prozessoren mit Software (Informatik), welche in eine mechanische Struktur integriert sind. Dabei ist es unerheblich, ob das resultierende System als mechatronisches System nach Kapitel 2.5.2.1 bezeichnet werden kann. Das bedeutet, dass nicht alle dieser Komponenten im betrachteten System vorhanden sein und zur Erfüllung der Funktionalität beitragen müssen.

*Abbildung 2-13: Definition mechatronischer Komponenten*

#### 2.5.3.2 Sensoren

Das Wort Sensor kommt von dem lateinischen Begriff „sensus“ (Gefühl, Empfindung) und bezeichnet einen technischen Fühler mit der Aufgabe der Informationsbeschaffung [ELBEL 1996]. Sensoren liefern wichtige messbare Informationen über den Prozess und stellen somit die Verbindung vom Prozess zur Informationsverarbeitung dar. Die Aufgabe von Sensoren in Systemen ist es, wesentliche, das System beschreibende, physikalische nichtelektrische Messgrößen zu erfassen und diese in elektrische Signale umzuformen. Die elektrischen



Signale stehen dabei mit den Messgrößen in einem bekannten, meist linearen Zusammenhang [BLANK 1996, TRÄNKLER & OBERMEIER 1998].

Abbildung 2-14 zeigt den grundsätzlichen Aufbau eines Sensors in mehreren Integrationsgraden. HEIMANN ET AL. [1998] beschreiben die Funktionsweise von Sensoren und den Signalverlauf in einem Sensor. Ebenfalls Beschreibungen von Sensoren und deren Funktionsweisen liefern BÜTTGENBACH [2001], ELBEL [1996], GAUSEMEIER & LÜCKEL [2000], ISERMANN [1999], RODDECK [1997] oder TRÄNKLER & OBERMEIER [1998].

Aufgrund der Komplexität des Anwendungsgebietes Sensorik, vor allem bedingt durch die Vielzahl der zu messenden Größen, werden Sensoren zur einheitlichen Beschreibung klassifiziert. Typische Merkmale sind dabei Messgrößen, Sensorprinzipien, Herstellungstechnologien, Signalformen und Kosten. Daneben gibt es eine ganze Reihe weiterer Merkmale. Für ausführlichere Beschreibungen sei auf die bereits erwähnte Literatur verwiesen.

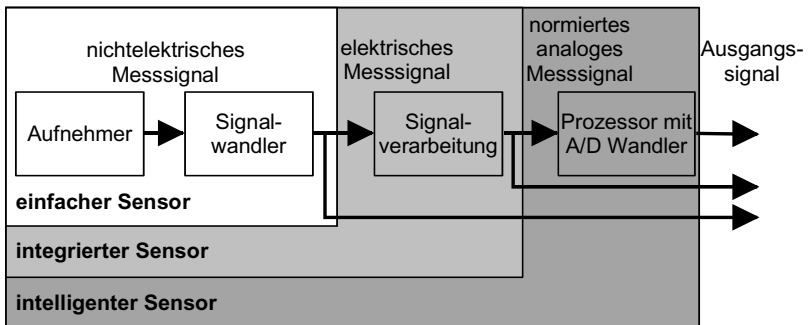


Abbildung 2-14: Grundschema eines Sensors

### 2.5.3.3 Aktoren

Der Begriff Aktor leitet sich vom lateinischen Wort „agitare“ für bewegen, treiben ab. Er bezeichnet eine Stelleinrichtung und hat sich gegenüber den Begriffen Stellsystem, Stellgerät, Stellglied oder Steller durchgesetzt [VDI/VDE 2174 1970]. Die Aufgabe von Aktoren ist es, leistungsarme Stellgrößen mittels Versorgungsenergie in physikalische Größen mit meist wesentlich höherem Leistungsniveau zu wandeln um Prozesse zu beeinflussen. Der Begriff

## 2 Situationsanalyse

Aktor schließt dabei alle Arten zur Erzeugung von Kräften und Bewegungen ein [ISERMANN 1999].

In mechatronischen Systemen befinden sich die Aktoren zwischen der Informationsverarbeitung und dem zu beeinflussenden Prozess. Sie kommen insbesondere als Aktoren mit elektrischem oder fluidischem Eingang und mechanischen Ausgangsgrößen wie Weg, Kraft oder Geschwindigkeit vor [ISERMANN 1998]. Inzwischen existieren aber auch Aktoren mit völlig anderen Wirkprinzipien wie etwa piezoelektrischen Effekten.

In Abbildung 2-15 ist der schematische Aufbau eines Aktors dargestellt. ISERMANN [1999] und GAUSEMEIER & LÜCKEL [2000] beschreiben die Funktionsweise von Aktoren. Weitere Beschreibungen zum Thema Aktoren liefern unter anderem BÜTTGENBACH [2001], HEIMANN ET AL. [1998], JANOCHA [1992], JANOCHA [1995] oder RODDECK [1997].

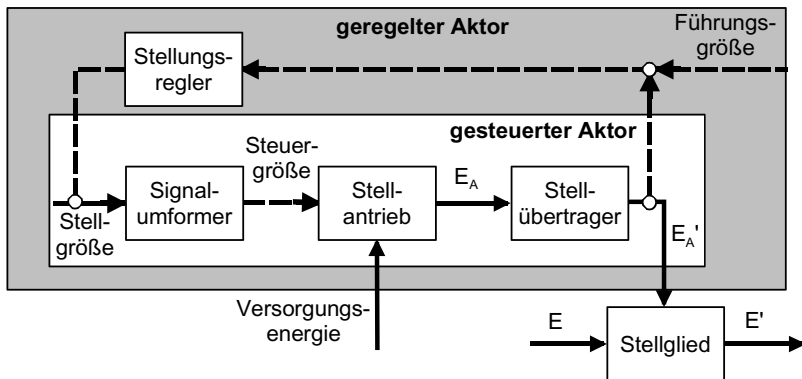


Abbildung 2-15: Wirkungskette eines Aktors

Eine Klassifizierung von Aktoren findet üblicherweise anhand der Wirkprinzipien statt. So gibt es elektromechanische, fluidische oder unkonventionelle (z.B. piezoelektrische oder thermobimetallische) Aktoren. Entscheidend bei der Auswahl von Aktoren sind dabei Anforderungen wie z.B. die vorhandene Versorgungsenergie, Größe der Stellkräfte oder die notwendigen Verstellbereiche [ISERMANN 1999].

### 2.5.3.4 Informatik

Die Informatik ist über die Schnittstellen Sensorik und Aktorik mit der Mechanik funktionell verbunden. Zur Informatik in mechatronischen Systemen zählen Software, Mikroprozessoren und Leitungen. Software meint dabei Programme, die als Steuerlogik im Produkt ablaufen. Diese Programme setzen voraus, dass Mikroprozessoren und Speicher ebenso vorhanden sind wie Datenleitungen. Die Mikroprozessoren haben die Aufgabe, die anfallenden Datenmengen zu verarbeiten, d.h. zu transportieren, zu verknüpfen, umzuformen und zu speichern [VDI/VDE 2242 1994]. Die Leitungen stellen den Datentransport innerhalb des gesamten Systems sicher. Dazu gibt es, je nach Anzahl der beteiligten Komponenten und nach Anwendungsfall, unterschiedliche Verbindungsarten. Bei nur zwei Teilnehmern liegt eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung vor, für mehrere Teilnehmer gibt es z.B. Sternverbindungen, Ringverbindungen oder Bussysteme. Weitere Informationen zur Informationsverarbeitung liefern die DIN 44302 [1987], GAUSEMEIER & LÜCKEL [2000], HEIMANN [1998], ISERMANN [1999] oder die VDI/VDE 2242 [1994].

### 2.5.4 Beispiele mechatronischer Systeme

Mechatronik kommt heute in fast allen Bereichen zum Einsatz, von Alltagsprodukten bis hin zu komplexen technischen Systemen (Abbildung 2-16). Bei all diesen Produkten wird die Funktion nicht mehr auf rein mechanische Weise, sondern durch ein synergetisches Zusammenwirken von Mechanik, Elektrik, Elektronik und Informatik erfüllt. Im Folgenden sollen stellvertretend einige Beispiele mechatronischer Anwendungen dargestellt werden.

Als Prototyp eines mechatronischen Systems wird in Forschung und Lehre oft der Industrieroboter bezeichnet. Industrieroboter sind aus einer Kombination von Teleoperatoren, d.h. vom Menschen direkt gesteuerten Handhabungsgeräten, und der Steuerung von numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen hervorgegangen [KREUZER ET AL. 1994]. Die detaillierte Beschreibung in Kapitel 2.4 unterstreicht den mechatronischen Charakter eines Industrieroboters, in dem Mechanik, Antriebs-, Steuerungs-, Regelungs- und Softwaretechnik eine synergetische Einheit bilden.

Ein weiteres Beispiel aus der Produktionstechnik ist die Werkzeugmaschine. RODDECK [1997] zeigt die Entwicklung von einem rein maschinenbaulichen Produkt über einen Zwischenzustand mit elektrischen Antrieben zu einer me-

## 2 Situationsanalyse

---

chatronischen Werkzeugmaschine mit stufenloser Drehzahl- und Lageregelung sowie Computersteuerung.

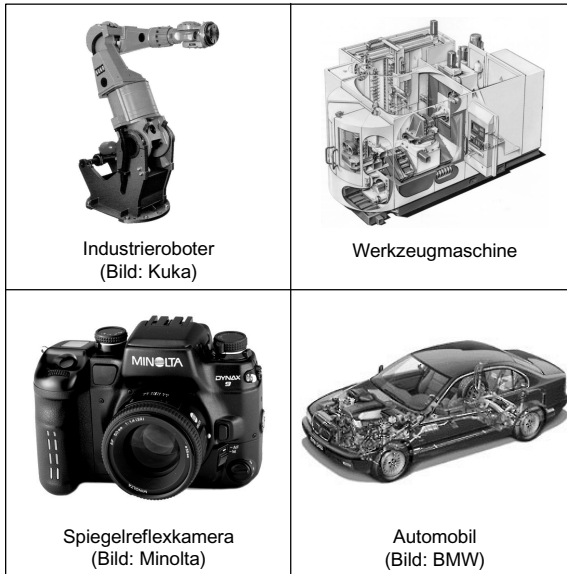


Abbildung 2-16: Beispiele mechatronischer Systeme

Ein bekanntes Alltagsprodukt, an dem die Entwicklung vom mechanischen zum mechatronischen Produkt sehr deutlich wird, ist die Spiegelreflexkamera (Abbildung 2-17). Vor 30-40 Jahren war eine Fotokamera ein rein feinmechanisch-optisches System mit begrenzten Möglichkeiten. Inzwischen sind neben den Linsen in dem mechanischen Gehäuse fast ausschließlich mechatronische Komponenten aus der Steuerungs- und Regelungstechnik, der Digitalelektronik und der Softwaretechnik zu finden, die durch ihr enges Zusammenwirken wesentlich komplexere Funktionen erfüllen können. Sensoren dienen etwa zur Ermittlung von Fokus, Objekthelligkeit und Filmempfindlichkeit. Diese Sensorsignale werden durch die Steuerungssoftware im integrierten Mikroprozessor, der weiterhin die Speicherung benutzerdefinierter Einstellungen und die Integration von Zusatzfunktionen ermöglicht, umgerechnet. Das Ergebnis wird daraufhin von den Aktoren, meist Elektromotoren und -magnete, z.B. für Betätigung von Autofokus, Verschluss und Blende oder den

Autofokus, Verschluss und Blende oder den automatischen Filmtransport umgesetzt.

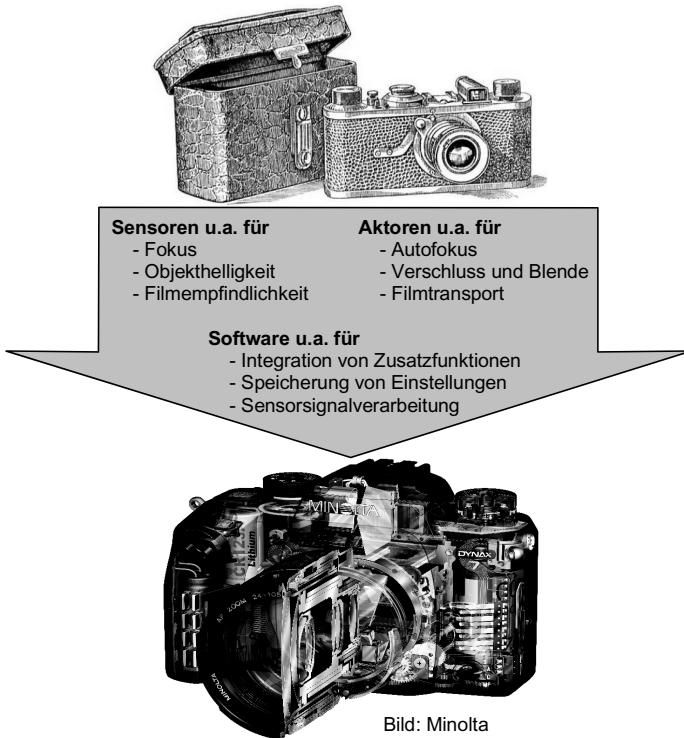


Abbildung 2-17: Entwicklung einer Spiegelreflexkamera vom rein mechanischen zum mechatronischen System.

REINHART ET AL. [2001] beschreibt ein weiteres mechatronisches System, die X-by-Wire-Technologie, die vornehmlich in Antriebssträngen bei Automobilen zum Einsatz kommt. Hier werden mechanische, hydraulische und pneumatische Komponenten in Lenkung, Bremssystem, Gas, Schaltung und Kupplung durch mechatronische Module ersetzt. Dies bewirkt z.B. ein selbsttätiges Eingreifen des Fahrzeugs in kritischen Situationen zur Erhöhung der Fahrsicherheit.

Die Mechatronik ermöglicht nicht nur die funktionale Verbesserung und Erweiterung, sondern auch die Neuentwicklung von Produkten, die es ohne den

Einsatz von Mechatronik nicht gäbe. AUSLANDER [1996] führt als Beispiel den Geldautomaten zum Abheben von Banknoten an.

### 2.6 Zusammenfassung

Die Flexibilisierung wird in der Montage immer wichtiger. Doch auch die Automatisierung gewinnt wieder mehr an Bedeutung. Oft steht den Automatisierungsbemühungen jedoch die Flexibilität entgegen. Die meisten Ansätze zur flexiblen automatisierten Montage beinhalten eine Modularisierung der Montageanlage. Eine Aufteilung in produkt- bzw. variantenneutrale und produkt- bzw. variantenspezifische Komponenten verringert die Umrüstzeiten und steigert die Wiederverwendbarkeit. Diese Methoden setzen jedoch voraus, dass zumindest eine gewisse Stückzahl der gleichen Variante montiert wird, ehe ein Umrüsten stattfindet.

Auch die Einbindung von flexiblen Qualitätssicherungseinrichtungen ist ein noch nicht gänzlich gelöstes Problem. Es existieren hier ebenso Ansätze einer Modularisierung des Überwachungs- bzw. Prüfsystems ähnlich wie bei den Anlagenkomponenten. Aber gerade bei Prüfeinrichtungen ist eine sehr starke Produkt- und Variantenabhängigkeit sichtbar. Dies führt dazu, dass Prüfungen meist nur am Ende des Montageprozesses durchgeführt werden und einen hohen Umrüstaufwand generieren.

Trotz verschiedener Versuche ist es bisher noch nicht gelungen, umfassende Lösungen für die automatisierte Montage bereitzustellen, die den Anforderungen der neuen Generation der mechatronischen Produkte gerecht werden. Es werden Strategien benötigt, die eine automatisierte Montage bei verschiedensten Varianten bis hin zu geringsten Losgrößen wirtschaftlich machen, die es erlauben, Prüf- und Kontrollprozesse einfach und flexibel in den Montageablauf zu integrieren und mit denen es möglich ist, komplexe Montageprozesse zu automatisieren.

### 3 Zielsetzung der Arbeit

Die Mechatronik gewinnt in der aktuellen Forschung immer mehr an Bedeutung. In SCHERNIKAU [2001, S. 25] sind die Anzahl der Veröffentlichungen im Bereich der Mechatronik im Zeitraum von 1983-1998 aufgeführt. Diese Zahlen zeigen eine vehemente Zunahme vor allem in den 90er Jahren. Die meisten Aktivitäten sind dabei im Bereich Produkt, Entwicklungsprozess oder Organisation zu finden. Trotz der veränderten Strukturen von mechatronischen Produkten gibt es dabei kaum Untersuchungen im Bereich der Fertigung und Montage.

Das Feld der Mechatronik bietet aber nicht nur für den Aufbau und die Funktionalität von Produkten, sondern auch für Strategien in der Produktion dieser Systeme eine ganze Reihe neuer Ansatzpunkte. Gerade der besondere Produktaufbau eröffnet hier neue Möglichkeiten für eine effiziente Montage. Ähnlich wie bei der Entwicklung mechatronischer Systeme, die durch eine auf die Eigenheiten der Mechatronik angepasste Vorgehensweise wesentlich effizienter ist, kann auch die Montage durch eine auf die Mechatronik abgestimmte Durchführung in ihrer Leistung und Wirtschaftlichkeit gesteigert werden.

Eine Strategie zur Steigerung der Effizienz in der Montage ist dabei ein Miteinbeziehen des Produktes in den eigenen Montageprozess. Dadurch kann die besondere Produktstruktur eines mechatronischen Systems vor allem für automatisierte Montageprozesse ausgenutzt werden. Diese Montagestrategie bietet gegenüber der klassischen Montage eine Reihe an technischen und wirtschaftlichen Vorteilen. Bei geeigneten Produkt- und Montagesystemvoraussetzungen ist damit neben einer Kostensenkung auch eine Steigerung des Automatisierungsgrades, der Flexibilität und der Montagequalität zu erreichen.

Die Nutzung von im Produkt oder Montageprozess bereits vorhandenen Informationen bzw. Signalen zur Datenerfassung wurde bisher kaum untersucht. Eine systematische Ableitung von Anwendungsmöglichkeiten ist nicht bekannt. Lediglich eine Nutzung sensorischer Eigenschaften von Aktoren zur Gewinnung von Prüfdaten wurde unter anderem im Sonderforschungsbereich 336 untersucht und vereinzelt umgesetzt (Kapitel 2.3.4). Die dort dargestellten Beispiele lassen bereits die Vorteile erkennen, die ein Zurückgreifen auf Produktkomponenten im automatisierten Montageprozess erzielt. So kann die Erfassung der Montagefehler auch während der laufenden Montage erfolgen. Eine direkte Erfassung der Messgröße am Ort des zu prüfenden Effektes ermöglicht eine Messung sonst

### 3 Zielsetzung der Arbeit

---

schwer erfassbarer Merkmale. Ebenso wird eine einfache Integration in die Montageumgebung durch einen geringen Aufwand an Prüfperipherie vereinfacht.

Trotzdem gibt es bis heute keine Untersuchungen über eine ganzheitliche Nutzung aller in einem Produkt vorkommenden Komponenten, die möglicherweise in der Lage sind, einen automatisierten Montageprozess aktiv zu unterstützen. Diese Komponenten müssen dem Robotersystem Daten über Produktzustände oder produktspezifische Informationen übermitteln und vom Robotersystem Befehle empfangen und umsetzen können. Sensoren, Aktoren und Produktsoftware eignen sich hierfür besonders. Ebenso gibt es keine Arbeiten darüber, neben der Prüfung auch in anderen Bereichen der Montage auf Produktkomponenten zurückzugreifen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, eine Strategie zu entwickeln, durch eine Nutzung der mechatronischen Komponenten die Effizienz in der automatisierten Montage entscheidend zu steigern. Der Kern dieser Strategie ist ein aktives Nutzen von Sensoren, Aktoren und Prozessoren mit Software, welche insbesondere mechatronische Produkte bereits integriert haben. Aber auch die Montage von Produkten, die nur einen Teil dieser Komponenten besitzen und somit nicht als mechatronisch gelten, profitiert von diesem Ansatz. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Automatisierung von Montageprozessen, auf der Steigerung der Anlagenflexibilität und auf der Gewährleistung einer hohen Montagequalität. Dazu werden Anforderungen an das Gesamtsystem und die Teilsysteme ermittelt, ein theoretisches Konzept erarbeitet und dieses anhand von Anwendungsszenarien praxisnah erläutert.

Die im Produkt vorhandenen Komponenten können durch die Robotersteuerung mittels einer geeigneten Schnittstelle angesprochen und dadurch aktiviert werden. Damit ist es ihnen möglich, das Robotersystem bei seinen Montageprozessen entscheidend zu unterstützen. Eine Schnittstelle für die Kommunikation zwischen Produkt und Robotersystem stellt im Grunde nichts anderes als einen Gerätetreiber dar. Für viele mechatronische Systeme werden während der Entwicklung bereits Treiber programmiert, sei es für den späteren Gebrauch (z.B. Computerperipherie) oder für Prozesse innerhalb der Produktion (z.B. Tests). Unter einem Treiber wird dabei eine Sammlung von Programmen verstanden, über die das Betriebssystem eines Rechners oder ein Anwendungsprogramm mit einem Peripheriegerät kommuniziert. Der Treiber übersetzt die Befehle des Betriebssystems bzw. Anwendungsprogramms in Kommandos für das jeweilige Gerät und umgekehrt die Zustandsmeldungen des Gerätes für das



Betriebssystem bzw. Anwendungsprogramm [ASTRA 2003]. Gerätetreiber genügen jedoch normalerweise nicht den Anforderungen einer automatisierten Montage. Dies liegt einerseits daran, dass die Computer, mit denen oder für die Treiber entwickelt werden, oftmals nicht kompatibel zu den Robotersteuerungen sind. Andererseits unterscheiden sich die Anforderungen an eine Schnittstelle für den herkömmlichen Gebrauch von den Anforderungen an eine Schnittstelle während der Montage. Somit liegt ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit auf der notwendigen Kommunikationsschnittstelle, welche eine einwandfreie Kommunikation zwischen Produkt und Robotersystem sicherstellt. Es werden Anforderungen, Funktionen und eine methodische Vorgehensweise zur Entwicklung der notwendigen Hard- und Software für die Schnittstelle dargestellt.



## 4 Nutzung mechatronischer Produktkomponenten im automatisierten Montageprozess

### 4.1 Überblick

Während in der Mechatronik anfangs nur das Ergebnis, also die damit zu erzielende Funktionalität eines mechatronischen Produktes, im Vordergrund stand, beschäftigt man sich inzwischen genauso intensiv mit den Abläufen und Zusammenhängen bei der Entwicklung und Produktion mechatronischer Systeme. Man hat erkannt, dass das Zusammenspiel von Mechanik, Elektrik, Elektronik und Informatik nicht nur für den Aufbau und die Funktionalität von Produkten (siehe Kapitel 2.5), sondern auch in der Montage dieser Systeme eine ganze Reihe neuer Ansatzpunkte bietet. Gerade der besondere Produktaufbau eröffnet hier neue Möglichkeiten.

Die Mechatronik stellt aber auch Anforderungen an die Montage. So ist beispielsweise eine stärkere Integration von bisher sequentiell nachgelagerten Arbeitsschritten, wie Kontroll- und Prüfprozessen, ebenso erforderlich wie eine zunehmende Anlagenflexibilität, um die vom Markt geforderte Variantenvielfalt effizient montieren zu können. Auch der Aufwand für eine Automatisierung insbesondere von konventionell nicht oder nur schwer zu automatisierenden Montageprozessen muss gesenkt werden.

In diesem Kapitel wird eine Montagestrategie erarbeitet, die es erlaubt, mechatronische Komponenten eines Produktes in die automatisierte Montage aktiv zu integrieren. Dazu werden zunächst die Anforderungen abgeleitet, die an ein System zur Montage von Produkten mit mechatronischen Komponenten gestellt werden (Kapitel 4.2). Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen wird daraufhin das Montagekonzept entwickelt (Kapitel 4.3.1) und die notwendige informationstechnische Kommunikation zwischen Produkt und Montagesystem erarbeitet (Kapitel 4.3.2). Daraus werden Anforderungen an Produkt, Prozess und Montagesystem abgeleitet, welche die entwickelte Montagestrategie mit sich bringt (Kapitel 4.3.3). Um die Potentiale dieser Strategie zu unterstreichen, werden mögliche Anwendungsszenarien einer Verwendung mechatronischer Produktkomponenten dargestellt (Kapitel 4.4) und anschließend bewertet (Kapitel 4.5). Zum Abschluss des Kapitels werden noch Konstruktionsregeln

erarbeitet, die für eine Anwendung der Montagestrategie beachtet werden müssen (Kapitel 4.6).

### 4.2 Anforderungen an das Montagesystem

Aufgrund der veränderten Voraussetzungen im Vergleich zur klassischen Montage gelten für ein System zur Montage von Produkten mit mechatronischen Komponenten oft zusätzliche Anforderungen vor allem in den Bereichen Flexibilität und Montagequalität (Abbildung 4-1). Diese Anforderungen gilt es weitestgehend zu erfüllen, um eine effiziente Montage zu gewährleisten.

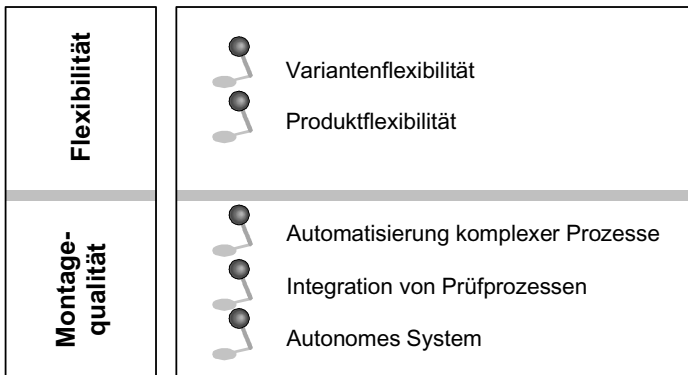


Abbildung 4-1: Spezielle Anforderungen an ein System zur Montage mechatronischer Produkte.

Der Industrieroboter hat sich nach MILBERG [1987] als Standardgerätetyp für eine flexible Montage herausgebildet und gilt demnach als die zentrale Automatisierungskomponente in Montagesystemen. Aus diesem Grund wird als Montagesystem im weiteren Verlauf der Arbeit eine Zelle angenommen, deren zentrale Einheit ein Standardindustrieroboter mit eigener Steuerung darstellt, und diese als Robotersystem bezeichnet.

Im Folgenden werden die gestellten Anforderungen beschrieben. Dabei wird auf grundsätzliche Anforderungen an Robotersysteme nicht näher eingegangen. Es sei hier auf Kapitel 2.4.1 und weiterführende Literatur verwiesen, z.B. JAUCH [1993] oder LINDERMAIER [1998].

Ebenso wird die erforderliche Funktions- bzw. Prozessflexibilität nicht weiter betrachtet, da sie durch den Einsatz eines Industrieroboters als weitgehend erfüllt angenommen wird.

### 4.2.1 Flexibilität

#### **Variantenflexibilität**

Da durch die steigenden Anforderungen der Kunden der Trend zur Individualisierung der Produkte stetig voranschreitet, entstehen immer mehr Varianten eines Produktes bei gleichzeitig sinkender Losgröße. Daher ist es unabdingbar, dass eine automatisierte Montage dieser Produkte eine entsprechende Flexibilität gegenüber Varianten aufweisen muss.

Diese Flexibilität muss sich dadurch auszeichnen, dass ein Variantenwechsel kein Umrüsten der Anlage nach sich zieht. Das selbständige Anpassen an eine neue Variante beinhaltet auch das Erkennen der zu montierenden Variante und das Einleiten der notwendigen Prozessschritte.

#### **Produktflexibilität**

Die immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen führen dazu, dass Produkte schneller am Markt sein müssen und ebenso schnell wieder verschwinden oder durch die nächste Generation ersetzt werden. In diesem Zuge müssen auch die Montageanlagen in immer kürzeren Zeitabständen erneuert oder entsprechend umgebaut werden.

Die Produktflexibilität bedingt möglichst viele universell einsetzbare Anlagenkomponenten. Ist dies bei manchen Komponenten nicht möglich, muss hier eine schnelle Anpassbarkeit ohne großen Aufwand an das neue Produkt gewährleistet sein. Die Produktflexibilität spielt gegenüber der Variantenflexibilität jedoch eine untergeordnete Rolle, da sie lediglich bei einem Produktwechsel zum Tragen kommt.

### 4.2.2 Montagequalität

Montagequalität soll im Rahmen der Arbeit nach der Definition in Kapitel 2.3.1 als der Grad der Erfüllung aller an die Montage gestellten Anforderungen zur Erreichung der geforderten Produktqualität definiert werden. Jeder Montagepro-

## 4 Nutzung mechatronischer Produktkomponenten

---

zess, der zu einer Verringerung der Produktqualität führt, schmälert somit die Montagequalität.

Die Montagequalität hängt von einer Vielzahl von Parametern ab. Da die Montage mechatronischer Produktkomponenten eine hohe Präzision bei Fügeprozessen erfordert, wird die Montagequalität von einigen speziellen Parametern besonders beeinflusst.

### **Automatisierung komplexer Prozesse**

Komplexere Produktstrukturen erfordern in der Regel aufwendigere Montageprozesse. Um jedoch der Kundenanforderung nach immer kostengünstigeren und trotzdem qualitativ hochwertigen Produkten gerecht zu werden, ist es notwendig, dass möglichst viele komplexe Montageprozesse oder Teilprozesse mit möglichst geringem technischem und wirtschaftlichem Aufwand automatisiert werden können. Eine Automatisierung gewährleistet gerade bei komplizierten Prozessen eine konstant hohe Montagequalität und reproduzierbare Prüfergebnisse und ermöglicht es darüber hinaus, Einsparpotentiale auszuschöpfen.

### **Integration von Prüfprozessen**

Die exakte Lage der elektronischen und mechanischen Bauelemente zueinander gewährleistet die Funktionalität von Baugruppen oder Produkten mit mechatronischen Komponenten. Durch den gleichzeitigen Einbau von Mechanik- und Elektronikkomponenten sind Funktionsprüfungen sowie die Kontrolle einzelner Prozesse bereits während der Montage notwendige Schritte. Nur durch eine exakte Lage kann eine präzise Funktionalität realisiert und deshalb nur durch ständige Kontrollen eine hohe Qualität erreicht werden. Dies erfordert eine stärkere Integration von bisher sequentiell nachgelagerten Prüfprozessen in den eigentlichen Montageprozess. Es ist nicht mehr ausreichend, lediglich eine abschließende Funktionsprüfung des Produktes durchzuführen, wie es oft in der klassischen Montage der Fall ist.

### **Autonomes System**

DILLMANN & HUCK [1991] definieren ein autonomes System als ein System, welches die Fähigkeit hat, eine ihm gestellte Aufgabe auch unter Einwirkung nicht explizit vorgesehener Ereignisse und Umweltzustände erfolgreich durchzuführen. Nach PRUST [2000] zeichnet sich eine autonome Produktionszelle durch die Fähigkeit aus, nach der Übernahme einer Zielbeschreibung, z.B. eines

Fertigteils, Bearbeitungsabläufe weitestgehend selbständig zu planen und durchzuführen.

Aufgrund einer Vielfalt von Varianten und auftretenden Prozessen sowie komplexen Produktstrukturen und hohen Anforderungen an die Präzision von Fügeprozessen sind Robotersysteme für die Montage von Produkten mit mechatronischen Komponenten meist einer hohen Störanfälligkeit ausgesetzt. Das Robotersystem muss über Möglichkeiten der Prozessbeobachtung verfügen und eine möglichst schnelle und selbstständige Reaktion auf sich ändernde Zustände bzw. eine Behebung von Störungen erlauben. Dies bedeutet, dass das System auf Montage- und Fertigungstoleranzen aus vorgelagerten Prozessen, auf nicht funktionierende Bauteile oder Baugruppen oder auf nicht korrekt durchgeführte Montageprozesse reagieren und selbständig Gegenmaßnahmen einleiten muss. Die Forderung nach Autonomie stellt nicht nur eine Qualitätsanforderung, sondern auch eine Flexibilitätsanforderung dar. Sie ermöglicht eine Störungsflexibilität des Systems gegenüber verschiedenen Fehlern, die während der Montage auftreten können.

### **4.3 Integration von Produktkomponenten in ein Robotersystem**

#### **4.3.1 Zusammenschluss von Produkt und Robotersystem**

Zur Durchführung von automatisierten Füge-, Justier- und Kontrollprozessen gerade bei variantenreichen Produkten und komplexen Prozessen werden Montagesysteme mit zusätzlichen Sensoren, zusätzlichen Antrieben und speziellen Softwarekomponenten ausgerüstet. Spätestens die Integration dieser Komponenten führt bei den Montagesystemen zu den in Kapitel 2.5 beschriebenen mechatronischen Strukturen. Da heutzutage Produkte zumindest einen Teil dieser Komponenten integriert haben, liegt es nahe, diese Produktkomponenten zur Unterstützung eines automatisierten Montageprozesses zu verwenden. Eine derartige Montagestrategie findet bisher jedoch kaum Anwendung. Lediglich die Verwendung von Aktoren als Sensoren, wie sie in Kapitel 2.3.4 bereits beschrieben wurde, ähnelt dieser Vorgehensweise.

Die Nutzung mechatronischer Produktkomponenten zur Unterstützung des automatisierten Montageprozesses stellt einen Lösungsansatz zur wirtschaftlichen

## 4 Nutzung mechatronischer Produktkomponenten

Montage dieser Produkte dar. Die Strategie ist auf einem ähnlichen Aufbau von Robotersystem und Produkt begründet und kann durch ein Vereinen beider Systeme realisiert werden. Der Aufwand zur Integration von zusätzlichen Peripheriekomponenten in das Robotersystem wird somit reduziert.

Das zu montierende Produkt wird dazu während der Montage informationstechnisch über eine Kommunikationsschnittstelle mit der Steuerung des Robotersystems verbunden. Aus Produkt und Robotersystem entsteht ein neues mechatronisches Gesamtsystem. Die Teilsysteme Produkt und Robotersystem besitzen zum Teil gemeinsame Sensoren, Aktoren und Softwarefunktionen (Abbildung 4-2). Durch den nun möglichen Datenaustausch kann das Robotersystem auf die Produktsensoren, -aktoren und -software zurückzugreifen und somit die vorhandenen mechatronischen Komponenten des Produktes aktiv in den Montageprozess mit einbeziehen.

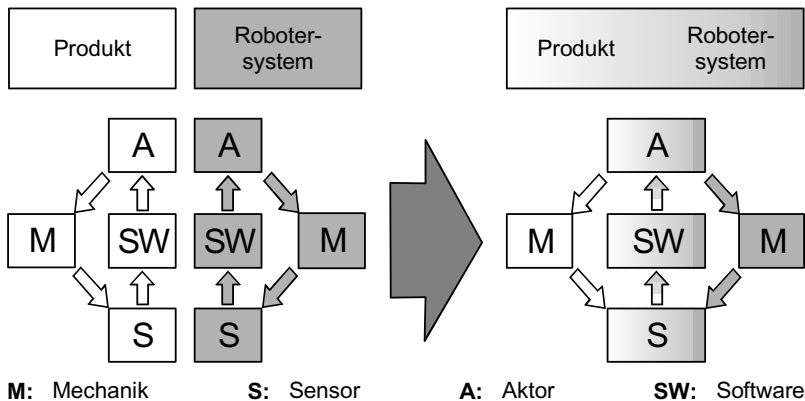


Abbildung 4-2: Zusammenschluss von Produkt und Robotersystem

Der Vollständigkeit halber sei hier noch einmal darauf hingewiesen, dass das Produkt nicht zwingender Weise alle mechatronischen Komponenten, also Sensoren, Aktoren und Software, besitzen muss. Der vorgestellte Ansatz ist auch umsetzbar, wenn lediglich eine oder zwei Arten dieser mechatronischen Komponenten im Produkt integriert sind.

Für die erforderliche Kommunikation von Produkt und Robotersystem wird die vorhandene informationstechnische Infrastruktur des Produktes genutzt und die



fehlenden Hardware- und Softwarekomponenten durch das Robotersystem gestellt. Diese Komponenten werden im Weiteren als Kommunikationsschnittstelle bezeichnet und stellen das informationstechnische Bindeglied zwischen Produkt und Robotersystem dar. Allgemeine Aspekte zu Schnittstellen wurden bereits in Kapitel 2.4.3 näher beschrieben. Dem grundsätzlichen Aufbau von Hard- und Softwareschnittstellen für die Nutzung mechatronischer Produktkomponenten zur Unterstützung des Montageprozesses ist Kapitel 5 gewidmet.

### 4.3.2 Kommunikationskreis

Durch die stattfindende Kommunikation ist das Robotersystem nicht nur in der Lage, das Produkt mechanisch (Energiefluss) zu beeinflussen, sondern auch, mit diesem über die Schnittstelle prozessrelevante Daten auszutauschen (Informationsfluss). Der Informationsfluss kann in beide Richtungen erfolgen, der Energiefluss hingegen läuft nur vom Robotersystem zum Produkt, da das Produkt während des Montageprozesses energetisch eine passive Rolle einnimmt. Somit entsteht ein Kreislauf zwischen den beiden Teilsystemen Produkt und Robotersystem. Diesen Kreislauf, im Folgenden Kommunikationskreis genannt, zeigt Abbildung 4-3. Die Pfeile stellen die Richtungen der verschiedenen Flüsse dar. Im Weiteren sollen unter Kommunikationskreis nur die Informations- und Energieflüsse verstanden werden, die unmittelbar mit dem betroffenen Montageprozess zusammenhängen.

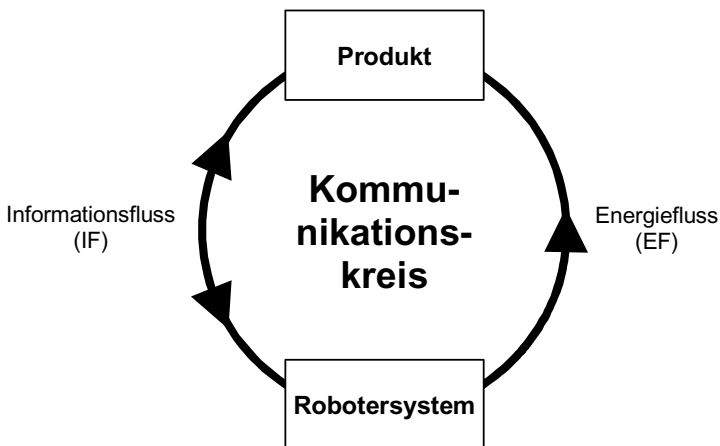


Abbildung 4-3: Kommunikationskreis zwischen Robotersystem und Produkt

Der Kommunikationskreis kann in verschiedenen Variationen auftreten, je nachdem, welche Produktkomponenten vom Robotersystem genutzt werden sollen. Das Wissen über die Art des Kommunikationskreises ist eine entscheidende Grundvoraussetzung für die Entwicklung der Schnittstelle. Auf diesem Wissen basierend muss die Schnittstelle an die zu leistende Aufgabe angepasst werden, da sich der notwendige Aufbau je nach der Art des auftretenden Kommunikationskreises ändert. So ist beispielsweise zur reinen Ansteuerung eines Produktaktors im Gegensatz zur Nutzung der Produktsensoren eine vereinfachte Softwareschnittstelle ausreichend, da nur ein Signalfluss in lediglich eine Richtung stattfindet.

### 4.3.2.1 Herleitung möglicher Kommunikationskreise

Basierend auf dem Grundschemata eines mechatronischen Systems und seinen auftretenden Flüssen nach Abbildung 2-11 werden die verschiedenen Variationen des Kommunikationskreises nun methodisch aufgearbeitet.

#### Auftretende Kommunikationsflüsse

Da ein mechatronisches System nach Kapitel 2.5 aus den vier Grundelementen Mechanik, Sensor, Prozessor mit Software und Aktor besteht, können theoretisch vier mal vier unterschiedliche Flüsse zwischen Produkt und Robotersystem und ebenso viele zwischen Robotersystem und Produkt auftreten. Diese 32 Möglichkeiten sind in Abbildung 4-4 dargestellt.

Die Hälfte davon kann nach dem Schaubild des mechatronischen Systems in Abbildung 2-11 definitionsgemäß ausgenommen werden. So sind beispielsweise keine Flüsse zwischen Mechanik und Software möglich. Die unzulässigen Kombinationen von Kommunikationspartnern sind in Abbildung 4-4 weiß dargestellt.

Von den restlichen 16 möglichen Flüssen treten weitere 10 in dem vorliegenden Konzept nicht auf (in Abbildung 4-4 grau dargestellt). Entweder sind sie für die Unterstützung der Montage durch Produktkomponenten nicht notwendig, oder sie sind nicht sinnvoll realisierbar. So können etwa Sensoren bzw. Aktoren aufgrund ihrer Kopplung an die eigene Systemsoftware bzw. -mechanik grundsätzlich keine Flüsse über die Systemgrenzen hinweg weitergeben.

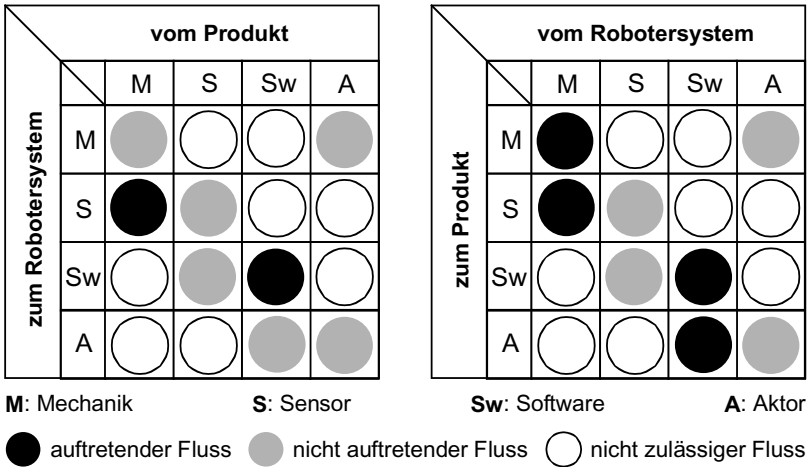


Abbildung 4-4: Flüsse von Produkt zu Robotersystem (links) bzw. von Robotersystem zu Produkt (rechts)

#### Auftretende Kommunikationskreise

Im Folgenden werden nun die in Abbildung 4-4 schwarz markierten Flüsse, die während einer Kommunikation zwischen Produkt und Robotersystem auftreten können, systematisch zu sinnvollen Kommunikationskreisen schematisch kombiniert. Dabei können sowohl offene als auch geschlossene Kommunikationskreise entstehen. Jedem dieser Kommunikationskreise ist die Eigenschaft gegeben, dass immer einer der Flüsse von der Software des Robotersystems zur Produktsoftware oder zum Produktaktor stattfinden muss. Dies ist darin begründet, dass das Produkt im Gegensatz zum Robotersystem bei der Kommunikation ein passives System darstellt, da von ihm unaufgefordert keine Impulse ausgehen. Das Robotersystem muss diesem zu Beginn den Befehl geben, aktiv in den Montageprozess einzugreifen.

- Offene Kommunikationskreise

Bei einem offenen Kreislauf fließen die auftretenden Flüsse zwischen den Kommunikationspartnern lediglich in eine Richtung. Aufgrund der oben dargestellten Eigenschaft, dass immer ein Fluss von der Software des Robotersystems ausgehen muss, sind insgesamt zwei unterschiedliche offene schematische Kommunikationskreise sinnvoll (Abbildung 4-5 Nr. 1 und Nr. 2).

## 4 Nutzung mechatronischer Produktkomponenten

- Geschlossene Kommunikationskreise

Bei einem geschlossenen Kreislauf finden Flüsse in beide Richtungen statt. Dabei erfolgt neben der Kommunikation der Software des Robotersystems mit dem Produktaktor oder der Produktsoftware ein Rückfluss entweder von Produkt- zu Robotersystemsoftware oder von Produktmechanik zum Sensor des Robotersystems. Ergänzend zu diesen vier Kreisläufen kann ein Mechanik-Mechanik Fluss und ein Mechanik-Sensor Fluss von Robotersystem zu Produkt stattfinden. Dies geht jedoch nur, wenn eine Software-Software Kommunikation von Produkt zu Robotersystem als Rückfluss vorhanden ist. Grund dafür ist, dass beides eine Beeinflussung der Produktsensorinformationen auslöst, welche von der Software des Produktes an das Robotersystem übermittelt werden. Dies führt zu sechs geschlossenen schematischen Kreisläufen.

Die verschiedenen schematischen Kommunikationskreise sind zusammengefasst in Abbildung 4-5 dargestellt.

offener Kreislauf					
Nr.	Produkt	Roboter-system	Nr.	Produkt	Roboter-system
1	Software	Software	2	Aktor	Software
geschlossener Kreislauf					
Nr.	Produkt	Roboter-system	Nr.	Produkt	Roboter-system
3	Software	Software	4	Software	Software
	Mechanik	Mechanik		Sensor	Mechanik
5	Software	Software	6	Aktor	Software
	Software	Software		Software	Software
7	Software	Software	8	Aktor	Software
	Mechanik	Sensor		Mechanik	Sensor

Abbildung 4-5: Übersicht der schematischen Kommunikationskreise

## 4.3 Integration von Produktkomponenten in ein Robotersystem

Im Folgenden werden die erarbeiteten Kommunikationskreise strukturiert und näher beschrieben. Die Unterteilung erfolgt anhand der hauptsächlich genutzten Komponente, da dies für den im Rahmen der Arbeit entwickelten Ansatz die entscheidende Information darstellt. Dies führt dazu, dass trotz des gleichen Kommunikationskreisschemas unterschiedliche Varianten davon entstehen.

In den folgenden Abbildungen sind die Komponenten der Systeme hervorgehoben, die von der jeweiligen Kommunikation beeinflusst werden. Die Nummer am Ende der Bildbeschriftung verweist auf das jeweilige zugrunde liegende Schema in Abbildung 4-5.

### 4.3.2.2 Kommunikationskreis bei Nutzung der Produktsoftware

Die Produktsoftware wird oft in Kombination mit Sensoren oder Aktoren dazu genutzt, eine Kommunikation zwischen Robotersystem und Produkt zu ermöglichen. Sie nimmt Befehle entgegen, setzt produktintern den notwendigen Signalfluss in Gang und gibt die gewünschten Informationen an das Robotersystem zurück. Diese Informationen werden zuvor durch die Produktsoftware aufbereitet, damit eine informationstechnische Übertragung möglich ist.

Neben der Unterstützung für Sensor- und Aktornutzung kann die Produktsoftware auch als eigenständige Komponente vom Robotersystem in den Montageprozess mit einbezogen werden (Abbildung 4-6). Ist dies der Fall, so entsteht ein Kommunikationskreis aus einem reinen Informationsfluss zwischen den Softwarebausteinen des Produktes und des Robotersystems.

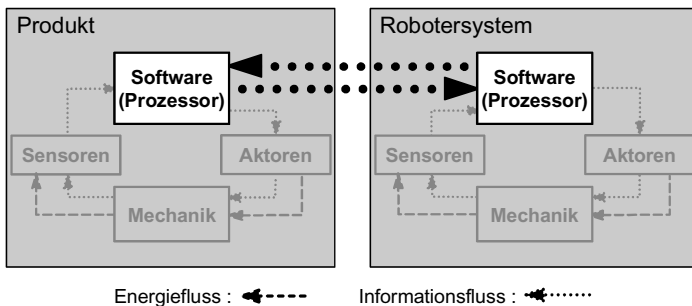


Abbildung 4-6: Kommunikationskreis bei einer eigenständigen Nutzung der Produktsoftware (Nr. 5)

## 4 Nutzung mechatronischer Produktkomponenten

Das Produkt kann mit dem Robotersystem auf diese Weise wichtige Informationen austauschen. Dies ist notwendig, wenn sich Produkte beispielsweise selbst identifizieren oder dem Robotersystem variantenabhängige Daten zur Verfügung stellen. Neben der reinen Informationsübermittlung kann eine geeignete Produktsoftware auch Algorithmen ausführen, die für den Montageprozess von Nutzen sind, z.B. Kompensationsrechnungen. Dazu können die Produktsensoren mit einbezogen werden um Zustandsinformationen des Produktes zu erhalten, die für eine Berechnung benötigt werden.

### 4.3.2.3 Kommunikationskreis bei Nutzung der Produktsensorik

Eine Nutzung der Produktsensorik erfordert immer einen beidseitigen Informationsfluss zwischen der Software des Robotersystems und der Produktsoftware, da der Produktsensor zuerst angesprochen werden muss und dann die Sensorsignale zurück übermittelt werden. Demnach kommen hier nur die geschlossenen Kommunikationskreise Nr. 3, 4 und 5 nach Abbildung 4-5 in Frage.

Bei einer Nutzung der Produktsensorik zur Entscheidungsfindung werden zuvor angefragte Informationen über Produktzustände vom Produkt an das Robotersystem zurückgesendet. Dies sind beispielsweise reine Werte von Sensor A bzw. B oder bereits von der Produktsoftware aufbereitete Werte, die sich aus mehreren Sensorwerten ergeben. Die Sensorwerte können für ja/nein-Entscheidungen dienen, z.B. ob ein Bauteil funktionstauglich oder vorhanden ist. Hier ist der Kommunikationskreis nur durch einen Kreisfluss zwischen den Softwarekomponenten der beiden Teilsysteme beschrieben, allerdings unter Einbeziehen der Produktsensoren (Abbildung 4-7).

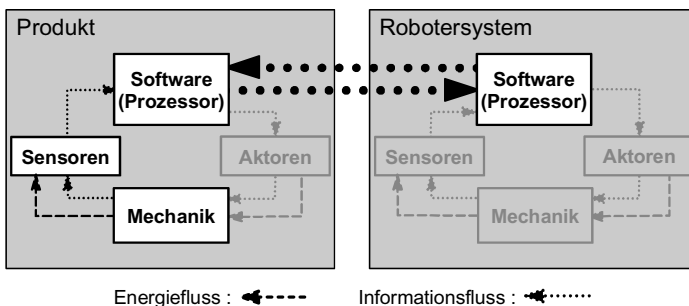


Abbildung 4-7: Kommunikationskreis beim Abfragen von Produktzuständen (Nr. 5)

### 4.3 Integration von Produktkomponenten in ein Robotersystem

Werden vom Produktsensor nicht Informationen über Produktzustände sondern über Zustände des Robotersystems aufgenommen und von der Software an das Robotersystem zurückgesendet, wird der oben gezeigte Kommunikationskreis durch einen Informationsfluss von Robotermechanik zu Produktsensorik ergänzt (Abbildung 4-8). Je nach Produktsensor wird hier entweder eine Entscheidung getroffen, z.B. ob ein Bauteil im Greifer des Roboters vorhanden ist, oder die Bewegung des Roboters gesteuert bzw. geregelt. Dabei muss der Produktsensor die Bewegung der Robotermechanik nachverfolgen und diese Informationen zur Steuerung oder Regelung über die Produktsoftware an das Robotersystem zurückgeben.

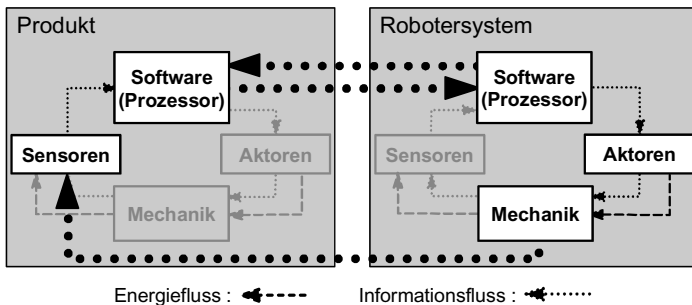


Abbildung 4-8: Kommunikationskreis bei einem Abfragen von Robotersystemzuständen (Nr. 4)

Bei einer Nutzung der Produktsensorik durch das Robotersystem als rein regelnder oder steuernder Faktor besteht der Kommunikationskreis aus einem Signalfluss zwischen den Steuerungen über die Schnittstelle und aus einem diese Signale beeinflussenden Energiefluss zwischen der Mechanik des Robotersystems und des Produktes (Abbildung 4-9).

Da die durch das Robotersystem hervorgerufene Bewegung der Produktmechanik eine unmittelbare Auswirkung auf die übertragenen Signale der Produktsensoren hat, entsteht ein Kreislauf mit einer Software-Software- und einer Mechanik-Mechanik-Schnittstelle. Eine laufende Signalrückgabe genau dieser beeinflussten Werte ermöglicht einen steuernden oder regelnden Eingriff vom Produkt auf die Bewegungen des Robotersystems während des Montageprozesses.

## 4 Nutzung mechatronischer Produktkomponenten

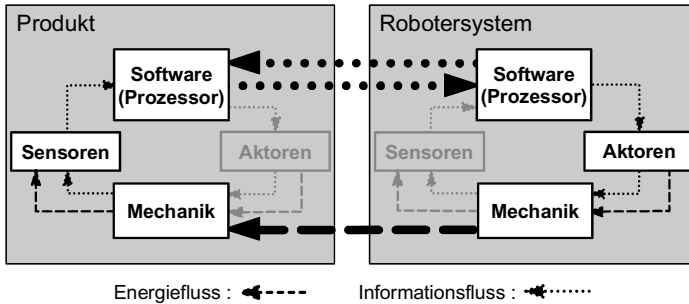


Abbildung 4-9: Kommunikationskreis bei einer Nutzung der Produktsensorik zur Bewegungsregelung oder -steuerung des Robotersystems (Nr. 3)

### 4.3.2.4 Kommunikationskreis bei Nutzung der Produktaktorik

Da die Produktaktoren im herkömmlichen Gebrauch keine Informationen liefern, können bei ihrem aktiven Miteinbeziehen in den Montageprozess sowohl offene als auch geschlossene Kommunikationskreise auftreten.

So kann ein Steuerbefehl vom Robotersystem zur Produktsoftware gesandt werden, um einen Produktaktor anzusprechen, ohne dass der durch die Bewegung des Aktors entstehende Energiefluss überwacht und als Informationsfluss an das Robotersystem zurückgegeben wird. Da es hierbei nicht zu einem Kreisfluss kommt, kann die Bewegung des Produktes vom Robotersystem nicht geregelt werden (Abbildung 4-10).

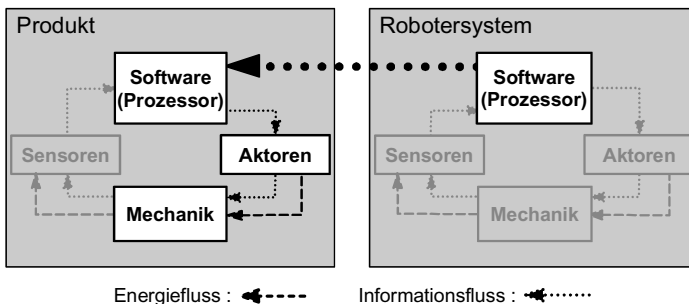


Abbildung 4-10: Offener Kommunikationskreis bei einem Anprechen der Produktaktorik über die Produktsoftware (Nr. 1)



### 4.3 Integration von Produktkomponenten in ein Robotersystem

Ein weiterer offener Kreislauf entsteht bei einem direkten Ansprechen des Produktaktors durch die Robotersteuerung (Abbildung 4-11). Die definierte Bewegung des Produktaktors wird von der Robotersteuerung beispielsweise über die Dauer oder über die Größe des Spannungssignals bestimmt.

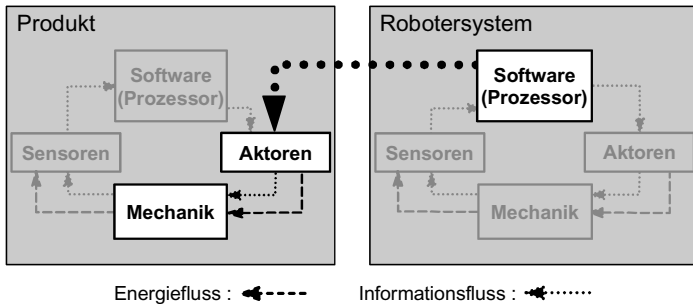


Abbildung 4-11: Offener Kommunikationskreis bei einem direkten Ansprechen der Produktaktorik durch die Robotersteuerung (Nr. 2)

Eine Schließung dieser beiden Kommunikationskreise kann unter Zuhilfenahme von Sensoren erfolgen. Dabei können sowohl die Sensoren des Produktes als auch des Robotersystems in Anspruch genommen werden. Bei der nun folgenden Darstellung der Kommunikationskreise wird lediglich auf die Schließung des Kreises aus Abbildung 4-11 detailliert eingegangen. Die geschlossenen Kreisläufe, welche auf Abbildung 4-10 beruhen (Nr. 5 und Nr. 7), können aus diesen durch ein Miteinbeziehen der Produktsoftware hergeleitet werden.

Besitzt das Produkt einen Sensor, der die korrekte Ausführung der Bewegung durch den Aktor überwacht und kontrolliert, wird diese Information durch die Produktsoftware an das Robotersystem zurückgesendet und damit ein Kreislauf geschaffen (Abbildung 4-12).

## 4 Nutzung mechatronischer Produktkomponenten

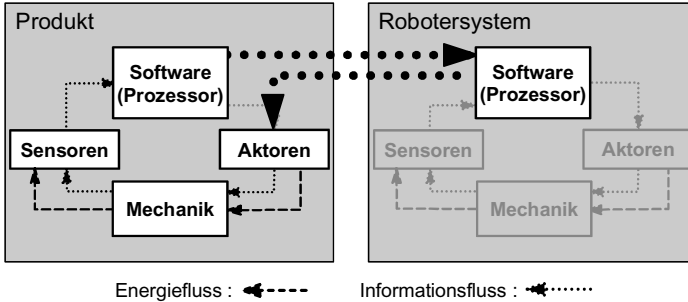


Abbildung 4-12: Geschlossener Kommunikationskreis bei Signalrückführung durch Produktsensoren (Nr. 6)

Die vom Robotersystem angestoßene Bewegung der Produktmechanik kann ebenfalls durch Sensoren des Robotersystems überwacht und kontrolliert werden (Abbildung 4-13).

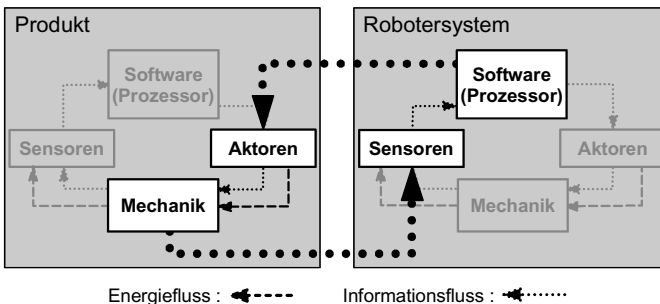


Abbildung 4-13: Geschlossener Kommunikationskreis bei Signalrückführung durch Sensoren des Robotersystems (Nr. 8)

Auch hier wird der Energiefluss im Produkt in einen Informationsfluss gewandelt, an die Sensoren und von dort an die Steuerung des Robotersystems zurückgegeben. Durch die Messung der Bewegung der Produktmechanik mittels Sensoren entsteht wiederum ein geschlossener Kreislauf. Erfolgt die Signalarückgabe der sich ändernden Werte laufend während der Bewegung, kann diese überwacht und somit durch das Robotersystem geregelt werden.

### 4.3.2.5 Kommunikationskreis bei Nutzung der Produktaktorik als Sensor

Wie in Kapitel 2.3.4 bereits beschrieben, können Aktoren bei geeigneten Voraussetzungen als Sensoren dienen. Hier nehmen die Kommunikationskreise aufgrund der Doppelfunktion der Aktoren eine Sonderrolle ein. Nutzt das Robotersystem sensorische Eigenschaften der Aktoren, ist ein Rückfluss der Messwerte als Größe des Motorstroms in Form eines Informationsflusses vorhanden. Es gilt, wie bei der Nutzung der Produktsensorik, dass nur geschlossene Kommunikationskreise auftreten.

Voraussetzung für eine sensorische Nutzung der Produktaktoren ist es, diese gleichzeitig auch als Aktoren zu verwenden. Als Basis dienen wieder die offenen Kommunikationskreise aus Abbildung 4-10 und Abbildung 4-11. Diese können nun geschlossen werden, indem der Produktaktor auch die Rolle des Sensors übernimmt. Beispielhaft dafür sei Abbildung 4-14 dargestellt. Eine Kommunikation unter Miteinbeziehen der Produktsensorik sowohl beim Hin- als auch beim Rückfluss ist ebenso denkbar.

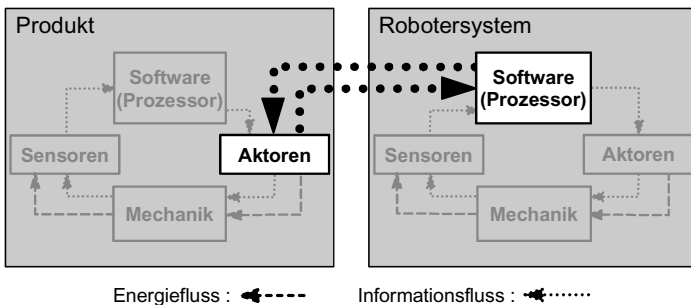


Abbildung 4-14: Geschlossener Kommunikationskreis bei Signalrückführung durch Produktaktoren (basierend auf Nr. 6)

Die Besonderheit in diesem Falle ist, dass ein Fluss von Produktaktor zu Robotersystemsoftware nach Definition in Kapitel 4.3.2.1 nicht zulässig ist. Da der Aktor ausnahmsweise als Sensor auftritt, kann die Verarbeitung der sensorischen Informationen nicht in der Produktssoftware stattfinden und muss in ein Erweiterungsmodul der Robotersystemsoftware verlagert werden. Somit übernimmt die Software des Robotersystems in diesem Fall die Funktion der

## 4 Nutzung mechatronischer Produktkomponenten

---

Produktsoftware. Der Produktaktor kommuniziert in seiner Funktion als Sensor mit der Software des Robotersystems. Damit kann diesem Kommunikationskreis Abbildung 4-12 zugrunde gelegt werden.

### 4.3.3 Anforderungen an die einzelnen Teilsysteme

Die Umsetzung einer automatisierten Montage unter Nutzung mechatronischer Produktkomponenten zieht verschiedene Anforderungen nach sich. Diese Anforderungen betreffen das zu montierende Produkt, den Montageprozess und verschiedene Systemkomponenten. Im Folgenden sollen diese Anforderungen näher beschrieben werden (Abbildung 4-15).




<b>Produkt</b>	 <ul style="list-style-type: none"><li>Integration mechatronischer Komponenten</li><li>Funktionsbereitschaft der Komponenten</li><li>Kommunikationsfähigkeit</li></ul>
<b>Prozess</b>	 <ul style="list-style-type: none"><li>Änderung der Messgrößen</li><li>Genauigkeit</li></ul>
<b>Systemkomponenten</b>	 <ul style="list-style-type: none"><li>Kommunikationsfähige Steuerung</li><li>Automatische energie- und informations-technische Kopplung</li></ul>

Abbildung 4-15: Anforderungen für die Nutzung von Produktkomponenten

Auch hier wird auf eine Darstellung der grundsätzlichen Anforderungen, die eine automatisierte Montage bedingt, verzichtet und auf weiterführende Literatur verwiesen (siehe Kapitel 4.2).

#### 4.3.3.1 Anforderungen an das Produkt

Unter dem Teilsystem Produkt ist der Zustand zu verstehen, in dem sich das Produkt zum Zeitpunkt des Zugriffs auf die mechatronischen Produktkomponenten durch das Robotersystem befindet. Dies ist normalerweise nicht der endgültige

ge Zustand des Produktes, sondern ein vom Montageablauf abhängiger Zwischenzustand.

### **Integration mechatronischer Komponenten**

Die augenscheinlichste Anforderung an das zu montierende Produkt ist die Integration mechatronischer Komponenten. Das Produkt muss nicht zwangsläufig ein mechatronisches System darstellen, d.h. neben der Mechanik auch Sensoren, Aktoren und Software enthalten. Jedoch müssen die mechatronischen Komponenten (s. Kapitel 2.2.3) vorhanden sein, die für den Montageprozess genutzt werden sollen.

### **Funktionsbereitschaft der zu verwendenden Komponenten**

Bevor mechatronische Produktkomponenten in den automatisierten Montageprozess aktiv mit einbezogen werden können, müssen sie funktionsbereit sein. Das heißt, Sensoren müssen bereits Signale liefern, Aktoren müssen die erforderlichen Bewegungen ausführen können und die verwendete Software muss im System installiert und aufrufbar sein. Dabei ist es nicht unbedingt erforderlich, dass die Komponenten bereits montiert sind oder sich an der für die spätere Produktfunktionalität richtigen Position befinden. Es muss jedoch eine Nutzung dieser Komponenten zur Unterstützung des Montageprozesses möglich und praktisch umsetzbar sein. Auch die Energieversorgung der Komponenten muss noch nicht durch das Produkt erfolgen, wenn diese etwa durch das Robotersystem für die Dauer des Montageprozesses übernommen werden kann.

Diese Anforderung kann unter Umständen eine Änderung des Montagevorranggraphen nach sich ziehen und muss somit bereits in der Konstruktion und Montageplanung berücksichtigt werden.

### **Kommunikationsfähigkeit**

Zur Übertragung von Informationen und Steuersignalen zwischen Robotersystem und Produkt muss eine einwandfreie Kommunikation dieser beiden Systeme gewährleistet sein. Dies beinhaltet die Fähigkeit, einen Kontakt zum Robotersystem herzustellen. Ebenso muss das Produkt sowohl eine Verarbeitung der jeweiligen Daten durch eine Software als auch die Weitergabe entsprechend aufbereiteter Daten an das Robotersystem durchführen können.

### 4.3.3.2 Anforderungen an den Montageprozess

Die Anforderungen werden an den Teil des Montageprozesses gestellt, der mit Hilfe der Unterstützung von mechatronischen Produktkomponenten durchgeführt wird.

#### Änderung der zu messenden Zustandsgrößen

Der Montageprozess muss zu einer Änderung der von der Robotersteuerung abgefragten Zustandsgrößen im Produkt führen. Die vom Robotersystem angesprochenen Produktkomponenten müssen aufgrund ihrer Funktion und ihrer Position im Produkt in der Lage sein, den automatisierten Montageprozess zu unterstützen. Beispielsweise müssen die Zustandsgrößen im Produkt, die während der Montage beeinflusst werden, von den Produktsensoren direkt oder über Umwege gemessen werden können. Den angesteuerten Produktaktoren muss es möglich sein, die notwendigen mechanischen Produktbauteile in der erforderlichen Art und Weise zu bewegen. Nur so kann die Steuerung des Robotersystems entsprechende Reaktionen, deren Art und Ausprägung abhängig von der Änderung der Zustandsgrößen sind, erzeugen.

#### Genauigkeit

Die von der Robotersteuerung genutzten Informationen über Zustände im Produkt und ihre Änderungen erlauben nur eine von den Produktkomponenten abhängige Genauigkeit. Der Montageprozess muss mit dieser Genauigkeit fehlerfrei und prozesssicher durchführbar sein.

### 4.3.3.3 Anforderungen an die Systemkomponenten

Systemkomponenten sind alle zum Robotersystem gehörigen und für den Montageprozess notwendigen Komponenten.

#### Kommunikationsfähige Steuerung

Das Robotersystem muss eine kommunikationsfähige Steuerung besitzen. Das heißt, die Steuerung muss zum einen die Möglichkeit bieten, Geräte über entsprechende Schnittstellen hardwaretechnisch zu kontaktieren. Diese Hardwareschnittstellen müssen durch die Steuerung innerhalb von Programmen angesprochen werden können. Zum anderen muss eine Softwareschnittstelle existieren, die ankommende Daten auslesen und für die beteiligten Kommunikationspartner lesbar übersetzen kann.

### **Automatisierte energie- und informationstechnische Kopplung**

Um den automatisierten Montageprozess nicht zu unterbrechen, muss die Kontaktierung des Produktes mit dem Robotersystem automatisiert erfolgen. Dies gilt sowohl für die physikalische Verbindung als auch für die softwaretechnische Eröffnung und Beendigung der Signalübertragung. Dabei ist es wichtig, dass die Kontaktierung während des Betriebes des Robotersystems beliebig oft hergestellt und wieder getrennt werden kann, ohne den Betrieb zu beeinflussen.

## **4.4 Anwendungsszenarien**

Im Folgenden soll auf mögliche Szenarien einer Nutzung mechatronischer Produktkomponenten für den Montageprozess eingegangen und diese anhand einiger geeigneter Beispiele erläutert werden. Dabei erfolgt eine Einteilung in die Nutzung der Produktsensorik, der Produktaktorik, der Produktsoftware und Kombinationen aus diesen Bereichen.

### **4.4.1 Nutzung der Produktsensoren**

Die Produktsensoren bieten dem Robotersystem die Möglichkeit, auf zusätzliche Sensorik zur erfolgreichen Durchführung von Montage-, Justier- und Kontrollprozessen zurückzugreifen. Somit können Zustandsinformationen oder Funktionalitäten im Produkt direkt am Ort des Geschehens erfasst und vom Robotersystem abgefragt werden. Dabei misst der Sensor während der Montage eine physikalische Größe, die anschließend an das Robotersystem übertragen wird. Diese Größe beeinflusst die weiteren Schritte des Robotersystems. Es ist dadurch in der Lage, sofort auf vorhersehbare und unvorhersehbare Störeinflüsse selbständig zu reagieren. Um den gewünschten Ist-Wert eines Produktzustandes zu erhalten, kann der Sensor gezielt zum richtigen Zeitpunkt vom Robotersystem aufgefordert werden, den Messvorgang durchzuführen. Eine zweite Möglichkeit besteht darin, dass der Sensor ununterbrochen Messwerte an das Robotersystem überträgt. Das Robotersystem übernimmt nur den Messwert zum gewünschten Zeitpunkt.

Die Sensorik des Produktes kann vom Robotersystem auf zweierlei Art und Weise genutzt werden. Zum einen ist sie in der Lage, durch die Lieferung von speziell abgefragten Messwerten Entscheidungen herbeizuführen und zum ande-

## 4 Nutzung mechatronischer Produktkomponenten

ren durch eine unmittelbare Beeinflussung der Bewegungsabläufe des Robotersystems in den Montageprozess mit einzugreifen.

### 4.4.1.1 Entscheidungsfindung

Entscheidungen erfordern die einmalige Information über eine aktuelle Größe als Zustandsaufnahme zum richtigen Zeitpunkt. Dies sagt jedoch nichts über die Dauer des Messvorganges zur Informationsbeschaffung aus. Der gemessene Ist-Wert wird daraufhin mit einem vorgegebenen Sollwert verglichen und anhand der Differenz der beiden Werte wird eine festgelegte Entscheidung getroffen.

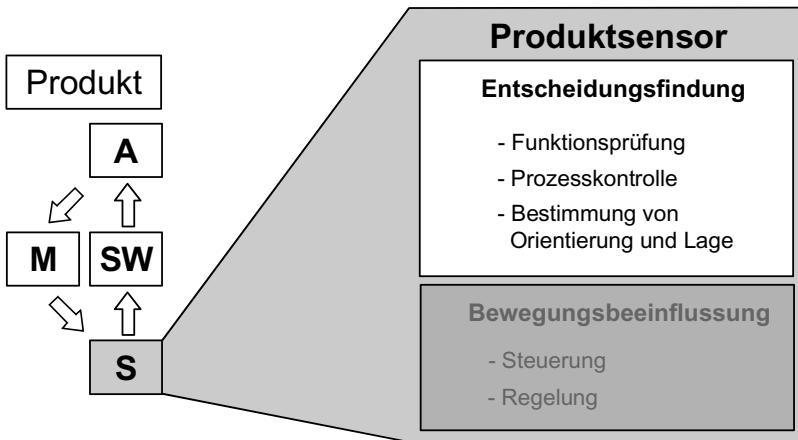


Abbildung 4-16: Nutzung der Produktsensorik durch das Robotersystem zur Entscheidungsfindung

Die Entscheidung kann unabhängig oder abhängig von der Bewegung des Robotersystems sein. Unabhängige Entscheidungen beziehen sich lediglich auf Zustände des Produktes (z.B. reiner Messwert). Abhängige Entscheidungen schließen aktuelle Zustände des Robotersystems mit ein (z.B. Messwert in Abhängigkeit der Stellung des Roboters). Eine Entscheidungsfindung durch Produktsensoren kann Bestandteil einer Funktionsprüfung, einer Prozesskontrolle und einer Bestimmung von Orientierung und Lage eines Bauteils oder einer Baugruppe sein (Abbildung 4-16).



### **Funktionsprüfung**

Ist die Funktionalität nicht gegeben, kann dies an fehlerhaften Teilen, nicht korrekter Montage oder auch am Fehlen von Bauteilen liegen. Ein Ansprechen der Produktsensoren durch das Robotersystem ermöglicht anhand der Art der Rückmeldung von den Sensoren eine einfache Überprüfung der Vollständigkeit oder Funktionsfähigkeit der Sensoren selbst.

Durch eine bestimmte Bewegung der Produktmechanik können mittels der sich ändernden Sensorwerte Rückschlüsse auf das Funktionieren oder Vorhandensein verschiedener Bauteile bzw. Baugruppen gezogen werden. Die definierte Bewegung der Produktmechanik wird dabei durch das Robotersystem durchgeführt. In diesem Fall muss nicht immer der absolute Sensorwert entscheidend sein. Die Differenz von Anfangs- und Endwert in Abhängigkeit von der Bewegung des Robotersystems kann hier ebenso eine Information über die Funktionalität geben wie der Verlauf der Sensorwerte über der Zeit. Dazu ist auch das Wissen über den ordnungsgemäßen Produktaufbau und den korrekten Verlauf der Sensorwerte über der Zeit notwendig. Weichen die Sensorwerte von den erwarteten Werten ab, so liegt dies an fehlenden oder fehlerhaften Teilen.

### **Prozesskontrolle**

Eine weitere Einsatzmöglichkeit für Produktsensoren zur Entscheidungsfindung ist die Prozesskontrolle. Bereits während oder nach einem Montageprozess ist es möglich, die korrekte Durchführung des Prozesses anhand gelieferter Zustandsinformationen der Produktsensoren zu kontrollieren. Ein Beispiel dafür kann eine Funktionsprüfung von betroffenen Bauteilen oder Baugruppen sein. Ebenso ist das Erkennen einer Änderung der durch den Produktsensor gemessenen Zustandsinformationen entweder bei korrektem oder unkorrektem Montageergebnis als Funktionskontrolle nutzbar. Beispielsweise kann die auftretende Auslenkung der Produktmechanik durch die Schwerkraft des montierten Bauteils über einen Sensor ermittelt und somit der Prozess überprüft werden.

### **Bestimmung von Orientierung und Lage**

Auch die Orientierung oder Lage eines Basisbauteils oder einer Baugruppe vor der Montage kann durch Produktsensoren erfasst werden. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass die Sensoren, die sich in der zu montierenden Baugruppe befinden, bereits vor der Montage energetisch und informationstechnisch durch das Robotersystem angesprochen werden können. Ist dies der Fall, kann durch eine fest definierte Bewegung des Robotersystems die Produktmechanik bewegt und

die Ausprägung durch die Sensoren gemessen werden. Da die Bewegung des Robotersystems, die Ausprägung der Auslenkung, die Geometrie der Baugruppe und die Position der Sensoren bekannt sind, ist es möglich, die Lage der Baugruppe bzw. auf ihre Orientierung relativ zum Robotersystem zu bestimmen. Hier liegt eine abhängige Entscheidung vor.

### 4.4.1.2 Bewegungsbeeinflussung

Produktsensoren sind in der Lage, durch die gelieferten Informationen über Produktzustände die Bewegungen des Robotersystems unmittelbar zu beeinflussen und so in den Montageprozess einzugreifen. Die von den Produktsensoren gewonnenen Informationen stellen die Basis für die Reaktion der Aktoren des Robotersystems dar. Diese wiederum beeinflussen mit Hilfe der Robotermechanik den Prozess, was zu einer Änderung der Sensorwerte und dadurch zu einer erneuten Bewegung der Aktoren führt. Da ein Robotersystem in der Regel als Handhabungseinrichtung fungiert, ändert es die Position und Orientierung von Bauteilen, Baugruppen oder dem Produkt selbst. Eine sensorische Beeinflussung dieser Bewegung hat daher den Zweck einer Positionierung bzw. Orientierung, einer Justierung oder einer fest durch das Produkt definierten Bewegung. Diese Beeinflussung kann gesteuert oder geregelt erfolgen (Abbildung 4-17).

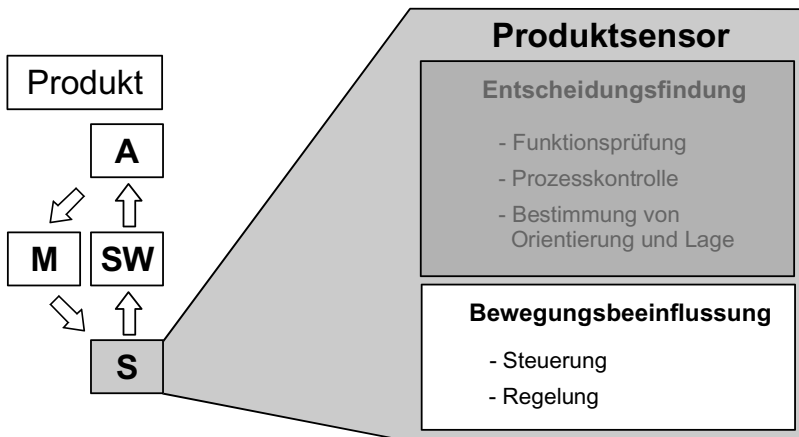


Abbildung 4-17: Nutzung der Produktsensorik durch das Robotersystem zur Bewegungsbeeinflussung

Steuerungen und Regelungen können einen Prozess anhand eines Vorgabewertes, der sog. Führungsgröße, beeinflussen. Bei einer Steuerung erfolgt dies über eine reine Vorgabe von Sollwerten als Führungsgrößen. Es findet keine Rückführung des augenblicklichen Zustandes des Prozesses in die Wirkungskette statt (offener Wirkungsweg). Somit kann auf Störgrößen nicht reagiert werden. Im Gegensatz zur Steuerung wird bei einer Regelung die Abweichung (Regeldifferenz) zwischen der Führungsgröße (Sollwert) und der Regelgröße (Istwert) erfasst und in den Regelkreis zurückgeführt (geschlossener Wirkungskreis). Damit kann der Regelkreis Störgrößen erkennen und kompensieren. Detailliertere Informationen zur Steuerungs- und Regelungstechnik sind z.B. in der DIN 19226-1 [1994], oder in SCHILLING [1997] zu finden.

Am Beispiel der Positionierung von zu montierenden Komponenten relativ zum Basisbauteil soll kurz eine Steuerung und Regelung des Robotersystems durch Produktsensoren dargestellt werden. Um dabei die Annäherung an den Sollwert zu erreichen, muss die Lageänderung der zu positionierenden Produktkomponente durch einen oder mehrere Produktsensoren gemessen werden können. Abbildung 4-18 und Abbildung 4-19 zeigen die Blockschaltbilder einer Steuerung und einer Regelung eines Robotersystems durch Produktsensoren.

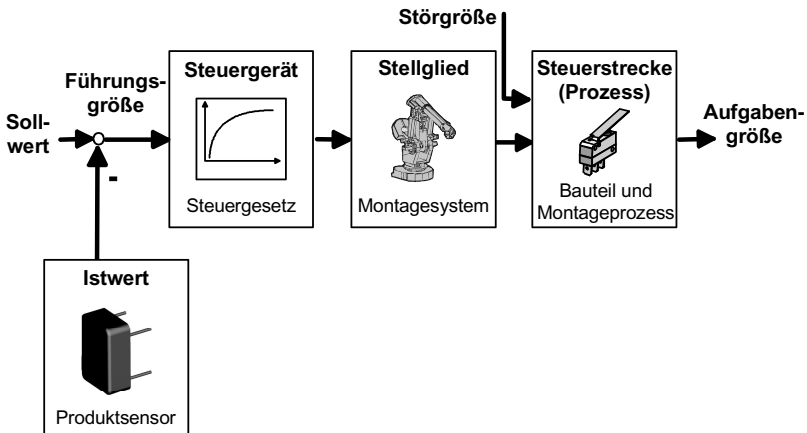


Abbildung 4-18: Produktsensorik zur Steuerung des Robotersystems

Da eine Erfassung der Bauteillage in der Regel nur relativ zur Sensorlage möglich ist, wird die Führungsgröße für eine Steuerung aus der Differenz zwischen

## 4 Nutzung mechatronischer Produktkomponenten

relativem Lage-Sollwert und relativem Lage-Istwert gebildet. Dabei muss der relative Sollwert bekannt sein. Der Istwert wird vom Produktsensor ermittelt. Bei einer Regelung ist die Führungsgröße nur der Sollwert, da der Ist-Wert als Rückführgröße wieder in den Wirkkreislauf eingespeist und aus Soll- und Istwert die für die Regelung entscheidende Regeldifferenz gebildet wird.

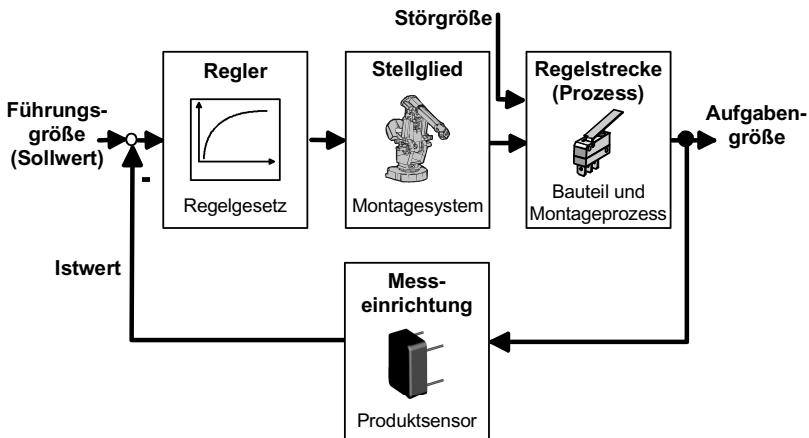


Abbildung 4-19: Produktsensorik zur Regelung des Robotersystems

Die Führungsgröße dient als Eingangsgröße für Steuer- und Regelglied. Dort wird die Führungsgröße in einen bestimmten mathematischen Zusammenhang mit dem zurückzulegenden Weg des Bauteils von seiner Ist-Position zu der gewünschten Soll-Position gebracht. Dieser Zusammenhang geht als Eingangsgröße in das Stellglied ein. Das Stellglied ist hier das Robotersystem. Innerhalb des Robotersystems laufen die internen Lageregelungen ab, die von dieser Steuerung oder Regelung unangetastet bleiben. Daher wird das gesamte Robotersystem als Stellglied betrachtet und nicht nur die Aktoren des Systems.

Das Stellglied beeinflusst die Strecke, also das zu positionierende Bauteil. Bei einer Steuerung der Bewegung des Robotersystems muss nach der einmaligen Vorgabe der Führungsgröße die Endlage des Bauteils erreicht sein, da keine weitere Überprüfung stattfindet. Bei einer Regelung hingegen erfolgt die Positionierung unter der Rückführung von Messwerten der Produktsensoren.

Die dargestellte Steuerung oder Regelung der Bewegung des Robotersystems durch Produktsensoren kann nicht nur für eine Positionierung eines neu zu montierenden Bauteils eingesetzt werden. In der Montage vorkommende Justierprozesse, die durch vorgelagerte und nicht oder nur schwer zu beeinflussende Montagetoleranzen notwendig sind, stellen einen ähnlichen Anwendungsfall dar.

Eine weitere Anwendung einer Regelung durch Produktsensoren ist die exakte Auslenkung der Produktmechanik durch das Robotersystem etwa zum Zweck einer Funktionsprüfung. Aufgrund der übermittelten Messwerte der Produktsensoren ist das Robotersystem in der Lage, die Bewegung der Produktmechanik zu verfolgen. Durch eine entsprechende Regelung kann damit verhindert werden, dass das Produkt aufgrund falscher oder zu großer Auslenkungen Schaden erleidet und damit der Nacharbeit zugeführt oder ausgesondert werden muss.

Neben einer reinen Steuerung oder Regelung der Bewegung des Robotersystems durch Produktsensoren kann auch eine Kombination aus beiden realisiert werden. Beispielsweise kann eine Grobpositionierung durch eine gesteuerte und die anschließende Feinpositionierung durch eine geregelte Bewegung umgesetzt werden. Dies hat den Vorteil, dass ein langer Positionierweg durch die anfängliche Steuerung schneller zurückgelegt wird. Die darauf folgende Regelung gewährleistet eine exakte Positionierung des Bauteils.

### 4.4.2 Nutzung der Produktaktoren

Durch das Einbeziehen der Produktaktoren in den Montageprozess kann nicht nur die sensorische Fähigkeit der Aktoren vom Robotersystem genutzt werden. Aktoren können auch als zusätzlicher Antrieb für das Robotersystem dienen. Angesteuert von der Software des Robotersystems kann die Mechanik des Produktes, welche mit dem Aktor verbunden ist, in beliebigen Phasen des Montageprozesses bewegt werden, soweit es die Mechanik und die verwendeten Antriebe zulassen. Dies führt dazu, dass sowohl der eigentliche Montageprozess als auch die Handhabung und Positionierung der Bauteile erleichtert oder erst ermöglicht werden. Abbildung 4-20 zeigt zusammengefasst die Anwendungspotentiale der Produktaktoren im Montageprozess.

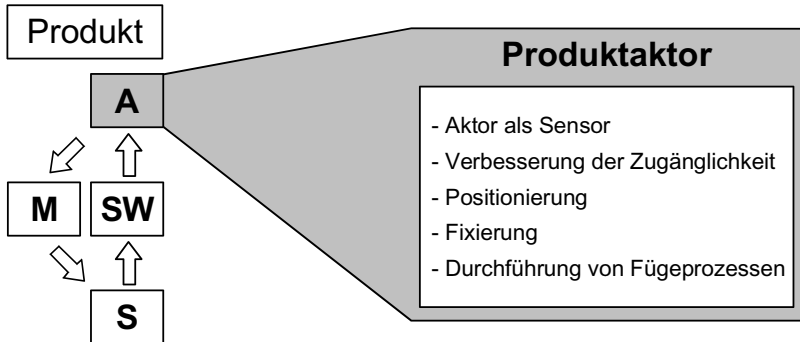


Abbildung 4-20: Nutzung der Produktaktuatorik durch das Robotersystem

### Aktor als Sensor

Wie bereits in Kapitel 2.3.4 näher beschrieben wurde, bieten Aktoren die Möglichkeit, durch die Auswertung von Umfang oder zeitlichem Verlauf der Energieaufnahme eines Aktors, auf den Prozesszustand und seine Änderung zu schließen. Die gemessene Energieaufnahme der Aktoren im Produkt kann dann als sensorisches Signal vom Robotersystem verwendet werden. Die Potentiale, welche sich hieraus ergeben, wurden bereits in Kapitel 4.4.1 erläutert.

Als kurzes Beispiel sei erneut die Montage eines Autoschiebedaches aus Kapitel 2.3.4.2 nach REITER [1998] aufgeführt. Im Anschluss an die Montage des elektrischen Autoschiebedaches wird die Schließzeit des Daches über die Auswertung des Motorstromes in einer separaten Prüfstation ermittelt. Werden die Ansteuerung des Dachmotors und die Überprüfung des Motorstromes bereits durch das Robotersystem durchgeführt, kann gegebenenfalls schon während der Montage durch das Produkt selbst in den Montageablauf eingegriffen werden. Auf ein schwergängiges Verfahren des Daches reagiert das Robotersystem mit einer gesteuerten oder geregelten Justierbewegung und auf zu lange Schließzeiten und damit auf eine nicht korrekte Funktionserfüllung mit einer Entscheidung.

### Verbesserung der Zugänglichkeit

Bei einem Scheitern von automatisierten Montagevorgängen ist oftmals die fehlende Zugänglichkeit für das Robotersystem zur Fügestelle der Grund. Durch ein Ansteuern der Produktaktoren während des Montageprozesses kann das Robotersystem die Mechanik des Produktes derart bewegen, dass Bauteile oder

Baugruppen, welche die Zugänglichkeit verhindern, von der Fügestelle entfernt werden können.

### **Positionierung und Fixierung**

Oft müssen ein oder mehrere Bauteile gleichzeitig in eine bestimmte Lage gebracht und in dieser gehalten werden, damit sie mit einem Fügeteil, etwa einer Schraube, an das Basisbauteil montiert werden können. Dazu wird in der Regel eine „zweite“ oder gar „dritte Hand“ benötigt. Ein automatisches Robotersystem muss sich dann damit behelfen, dass in dem Werkzeug ein oder mehrere, manchmal sogar zueinander bewegbare, Greifer und ein Fügeautomat integriert und zueinander abgestimmt sind oder dass die Bauteile nacheinander einzeln gefügt werden müssen. Ist man in der Lage, Produktaktoren zur Positionierung und Fixierung ein oder mehrerer Bauteile oder Baugruppen aktiv in den Montageprozess mit einzubeziehen, stehen dem Robotersystem damit weitere Werkzeuge zur Verfügung.

Bei der Positionierung durch Produktaktoren wird der übliche Vorgang, ein zu fügendes Bauteil an seinen Fügeort zu bringen, umgekehrt. Die Produktaktoren besitzen aufgrund ihrer Lage im Basisbauteil keinen direkten Einfluss auf die Bewegung des Fügebauteils. Jedoch sind sie in der Lage, den Fügeort zu bewegen. Durch ein Ansteuern der Produktaktoren vom Robotersystem wird der Fügeort bewegt und relativ zum Fügebauteil positioniert. So kann eine Gewindebohrung in einem mit dem Produktaktor gekoppelten beweglichen Schlitten relativ zu der darin zu montierenden Schraube positioniert werden.

Bei der Fixierung werden Bauteile durch Produktaktoren und der mit ihnen verbundenen Mechanik in einer bestimmten Lage vorübergehend gehalten, beispielsweise geklemmt, um den Montageprozess durchführen zu können.

### **Durchführung von Fügeprozessen**

Neben Positionierung und Fixierung können in geeigneten Fällen sogar Fügeprozesse vom Produkt selbst ausgeführt werden. Voraussetzung dafür ist, dass das Produkt den Verlauf der notwendigen Fügebewegung mittels seiner Aktoren und Mechanik an der entsprechenden Fügestelle durchführen kann.

Als einfaches Beispiel sei das Einpressen eines Bolzens aufgeführt. Wird der Bolzen durch das Robotersystem richtig an der Fügestelle positioniert, kann durch ein Ansteuern der Produktaktoren die Produktmechanik derartig in Bewegung gesetzt werden, dass sie den Bolzen einpresst.

### 4.4.3 Nutzung der Produktsoftware

Die Produktsoftware stellt die informationstechnische Schnittstelle des Produktes dar. Daher werden die Informationsflüsse zwischen Produkt und Robotersystem unter Einbeziehen der Produktsoftware ausgetauscht. Eine Ausnahme kann die Nutzung von Aktoren als Sensoren sein, wenn die Informationsflüsse vom Produktaktor direkt zur Robotersystemsoftware fließen.

Ein Austausch von Informationsflüssen zwischen Produkt und Robotersystem kann durch zweierlei Ursachen begründet sein (Abbildung 4-21).

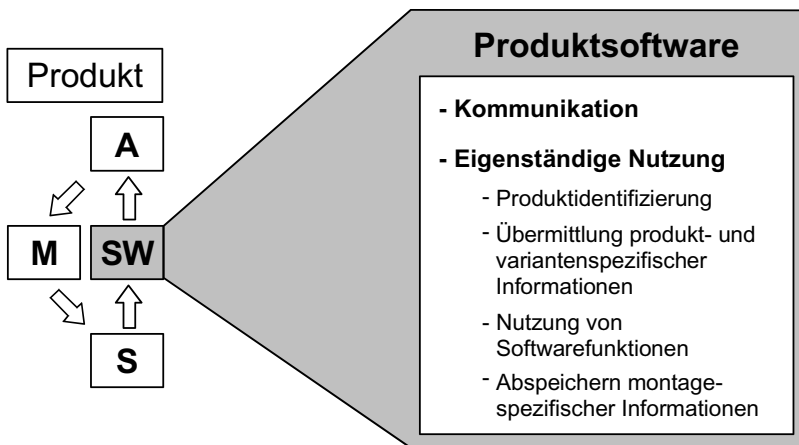


Abbildung 4-21: Nutzung der Produktsoftware durch das Robotersystem

Zum einen wird die Produktsoftware von der Robotersystemsteuerung benötigt, um eine Kommunikation mit dem Produkt und damit mit den Produktsensoren und Aktoren herzustellen. Zum anderen ist das Robotersystem damit in der Lage, die Produktsoftware als eigenständige Komponente zu nutzen und auf deren Funktionen zurückzugreifen.

#### Kommunikation

Beim Zurückgreifen auf Produktsensoren oder Produktaktoren durch das Robotersystem spielt meist die Produktsoftware eine entscheidende Rolle. Sie wird benötigt, um die informationstechnische Kopplung von Produkt und Robotersystem umzusetzen.



Dabei nimmt sie Befehle vom Robotersystem entgegen und setzt produktintern den notwendigen Informationsfluss in Gang. Die von den Produktkomponenten zurückgelieferten Signale werden in der Produktsoftware derart aufbereitet und verrechnet, dass eine informationstechnische Übertragung an das Robotersystem möglich ist. Anschließend gibt sie die gewünschten Informationen an das Robotersystem zurück.

### **Eigenständige Nutzung**

Bei einer eigenständigen Nutzung der Produktsoftware ist diese nicht Mittler, um Sensoren oder Aktoren nutzen zu können, sondern stellt die eigenen Funktionen und Fähigkeiten dem Robotersystem zur Verfügung.

Oftmals beinhaltet die Produktsoftware wichtige technische oder informative Daten, die dem Robotersystem für die Durchführung des Montageprozesses hilfreich sind. Beispielsweise kann sich das Produkt durch die Übermittlung der in der Software hinterlegten Versions- oder Seriennummer selbst identifizieren. Der notwendige Montageablauf kann daraufhin variantenspezifisch vom Robotersystem ausgeführt werden. Es ist keine festgelegte und dem Robotersystem bekannte Reihenfolge der Produktvarianten notwendig.

Zusätzlich zur reinen Identifizierung können auch Anforderungen an die Montageprozesse übertragen werden, wie maximal zulässige Fügekkräfte, Art des Prozesses oder Anzahl durchzuführender Operationen. Steigt die Anzahl der Varianten, so ist auch eine Übermittlung des gesamten Montageablaufes oder Teilen davon durch das Produkt an das Robotersystem zu überlegen. Erfolgt diese

Übermittlung in einer programmiersprachenunabhängigen Form, die in die jeweilige roboterspezifische Sprache übersetzt werden kann, kann die automatisierte Montage auf jedem beliebigen Robotersystem durchgeführt werden.

Neben der reinen Informationsübermittlung ist eine geeignete Produktsoftware auch in der Lage, eigene Funktionen auszuführen, die für den Montageprozess von Nutzen sind und die Ergebnisse dem Robotersystem zur Verfügung zu stellen. Als Beispiel sei die Berechnung von Algorithmen wie z.B. Rechnungen zur Kompensation von Schwingungen oder von temperaturbedingten Materialausdehnungen genannt. Voraussetzung hierfür ist das Vorhandensein der für die Ausführung der Algorithmen notwendigen Eingangsgrößen. Feststehende Größen können in der Software hinterlegt, variable Größen etwa von Produktsensoren geliefert werden (siehe Kapitel 4.4.1). Weitere Beispiele sind der Echtzeit-

abgriff von Sensordaten oder das Verdichten verschiedener Daten zu den für das Robotersystem notwendigen Informationen.

Ist die Produktsoftware in der Lage, die vom Robotersystem extern zugeführten Informationen abzuspeichern, kann das Produkt selbst einen Laufzettel, also ein Art Report-File, mit sich tragen, in welchem an jeder Station die einzelnen Montageprozesse dokumentiert werden. Dieser Laufzettel ist automatisch durch das Robotersystem beschreibbar und vom Werkstückträger unabhängig. Damit kann während der Montage der Werkstückträger absichtlich oder unabsichtlich ohne Folgen für die Dokumentation ausgetauscht werden. Weiterhin ist eine Anbindung aller Montagestationen an eine Dokumentationsdatenbank nicht notwendig. Am Ende der Produktmontage muss der Laufzettel lediglich vom Produkt in eine Datenbank geschrieben werden, um die Dokumentation vor möglichen Kundenmanipulationen beim Eintreten eines Schadensfalles zu schützen.

Neben der Speicherung der Dokumentation in der Produktsoftware selbst kann beispielsweise die dort hinterlegte Seriennummer als Identifikation für ein Report-File in einer Datenbank dienen. Anhand der ausgelesenen Nummer können dann Informationen dem Produkt eindeutig zugeordnet und an der jeweiligen Stelle der Datenbank hinterlegt werden.

### 4.4.4 Nutzung von Produktfunktionalitäten

Die im Produkt integrierten mechatronischen Komponenten bieten nicht nur als Einzelbauteil die Möglichkeit, in den Montageprozess aktiv mit einbezogen zu werden. Auch die Funktion eines Zusammenspiels dieser Komponenten birgt eine ganze Reihe von Einsatzmöglichkeiten. Die funktionale Integration der mechatronischen Produktkomponenten gewährleistet die ordnungsgemäßen Produktfunktionen. Diese Integration bzw. die damit abgebildeten Funktionen können ebenso zur Unterstützung des Montageprozesses herangezogen werden.

Produktsensoren messen z.B. Produkt- bzw. Bauteilzustände wie Lage oder Temperatur. Diese Daten werden in der Produktsoftware gegebenenfalls mit anderen Daten wie Bauteilmaßen oder Kinematikmodellen des Produktes verrechnet. Das Ergebnis dient dann entweder dazu, einen Produktaktor nach den Vorgaben des Robotersystems zu bewegen oder es wird direkt an das Robotersystem als Zustandsinformation, z.B. als fehlerkompensierte Positionsangabe, weitergegeben. So ist etwa eine produktinterne Lageregelung eines beweglichen Schlittens in der Lage, dem Robotersystem die Position des Schlittens genau zu

übermitteln oder diesen auf Befehl des Robotersystems exakt an die für den Montageprozess notwendige Position zu fahren. Vorhandene Lagetoleranzen des verschiebbaren Schlittens können damit kompensiert werden.

### **4.5 Bewertung der Nutzung mechatronischer Produktkomponenten**

Nachdem die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Montagestrategie an Anwendungsszenarien gespiegelt wurde, soll diese nun bewertet werden. Dazu wird die Montagestrategie auf die Erfüllung der in Kapitel 4.2 aufgestellten Anforderungen hin untersucht. Darüber hinaus werden zusätzliche Vorteile herausgearbeitet.

#### **Varianten- und Produktflexibilität**

Die Flexibilität des Robotersystems hinsichtlich einer Anpassung an Varianten- oder Produktänderung wird durch die vorgestellte Montagestrategie erhöht. Zum einen bringen die Produkte selbst eine Reihe der notwendigen Peripheriekomponenten mit. Gerade bei schwierigen Montageprozessen, die einen großen Umsetzungsaufwand erfordern und bei denen eine komplexe Informationsbeschaffung während des Prozesses notwendig ist, reduziert dies den Aufwand sowohl für die Ausrüstung eines variantenflexiblen Robotersystems als auch für die Umrüstung eines Robotersystems auf ein neues Produkt erheblich.

Auch notwendige Prüfprozesse, soweit sie mit Produktkomponenten durchgeführt werden können, sind varianten- und gegebenenfalls auch produktunabhängig. Dadurch können spezialisierte Mess- und Prüfeinrichtungen reduziert und somit Zeit und Kosten gespart werden.

Die Möglichkeiten einer eigenen Identifizierung der Produkte beim Robotersystem und einer Übertragung von varianten- oder sogar produktspezifischen für den Montageprozess wichtigen Informationen an das Robotersystem steigern die Flexibilität des Systems bezüglich Varianten oder Produkten. Dabei können sowohl die Reihenfolge der ankommenden Produkte oder Varianten durch das Robotersystem festgestellt als auch eigenständig die notwendigen Montageprozesse durchgeführt werden. Des Weiteren wird dadurch die Flexibilität des Systems gegenüber einzelnen Prozessen gesteigert. Durch die Übermittlung von produkt- oder variantenspezifischen Daten können nicht nur festgelegte Montageprozesse produkt- oder variantenbezogen durchgeführt werden, sondern dem System ist es auch möglich, einen prinzipiellen Montageablauf durch vom Pro-

## 4 Nutzung mechatronischer Produktkomponenten

---

dukt gelieferte Prozessparameter, z.B. maximal zulässige Fügekräfte, individuell anzupassen.

### **Automatisierung komplexer Prozesse**

Die integrierten Sensoren und Aktoren in den einzelnen Produkten ermöglichen es, dass die während einer automatisierten Montage notwendigen Informationen direkt am Ort des Geschehens erfasst und dem Robotersystem mitgeteilt werden können. Dadurch können einige Grenzen einer herkömmlichen Automatisierung überwunden werden. Die Umsetzung von Montageprozessen, deren Automatisierung vor allem an mangelnden Informationen über aktuelle Zustände des Produktes scheitert, kann durch den aktiven Einsatz von Produktkomponenten gelöst werden. Auch die Möglichkeit einer Steuerung oder Regelung des Robotersystems mittels Produktkomponenten vereinfacht die Automatisierbarkeit vor allem von komplizierten Montageprozessen.

Montagenähe Qualitätsregelkreise in Robotersystemen haben einen direkten Einfluss auf Produkt- und Montagequalität. Diese Qualitätsregelkreise setzen eine genaue Kenntnis von Istzuständen im Produkt voraus, die durch die Produktsensoren ohne großen Aufwand geliefert werden. Zum Beispiel wird der Aufwand einer Durchführung von automatisierten aktiven Justierprozessen zur Erreichung einer hohen Montagegenauigkeit verringert. Diese Justierprozesse sind notwendig, wenn entweder Fertigungstoleranzen und Fügeprozesse eine genauere Montage nicht zulassen oder der Montageaufwand dafür unwirtschaftlich ist. Mit einer Vereinfachung der Justierprozesse kann der Montageaufwand von vorgelagerten Montageschritten reduziert werden.

### **Integration von Prüfprozessen**

Durch die Möglichkeit des Zurückgreifens auf die sensorischen Produkteigenschaften wird die Integration von Prüfprozessen in den Montageablauf erleichtert. Das Robotersystem erhält während der Montage von den Produktkomponenten Zustandsinformationen aus dem Produkt. Mit Hilfe dieser Informationen kann es neben den eigentlichen Montageaufgaben auch Prüfaufgaben ohne zusätzliche Prüfperipherie übernehmen. Vor allem Funktionsprüfungen von Bauteilen oder Baugruppen, Prüfungen von einzelnen Produktfunktionen oder eine Überprüfung von durchgeführten Montageprozessen sind nicht nur einfach umzusetzen, sondern können auch unter realen Betriebsbedingungen stattfinden. Die Qualitätsdatengewinnung durch Produktsensoren bereits während des Mon-

## 4.5 Bewertung der Nutzung mechatronischer Produktkomponenten

tageprozesses ermöglicht dabei eine schnellere Rückführung dieser Daten in den Prozess und eine sofortige Reaktion durch das Robotersystem.

### Autonomes System

Nach WENDT [1992] bewirkt die Regelung eines Robotersystems eine erhöhte Autonomie des Systems. Durch die aktive Nutzung bestimmter Produktkomponenten in der automatisierten Montage gelingt es demnach, ein autonomes Produkt-Roboter-System zu schaffen. Mit der Lieferung aktueller Produktzustände durch das Produkt selbst entsteht während des Montageprozesses eine autonome Einheit aus Robotersystem und Produkt, die flexibel auf Variantenschwankungen, Montagetoleranzen aus vorgelagerten Prozessen, nicht funktionierende Bauteile und Baugruppen oder nicht korrekt durchgeführte Montageprozesse reagieren und selbständig Gegenmaßnahmen einleiten kann. Damit ist das Robotersystem in der Lage, sofort auf vorhersehbare und nicht vorhersehbare Störeinflüsse selbständig zu reagieren. Abbildung 4-22 fasst die Bewertung der Merkmale zusammen.

Anforderung	Grad der Erfüllung		
	gut	mittel	schlecht
Variantenflexibilität	✓		
Produktflexibilität		✓	
Integration von Prüfprozessen	✓		
Autonomes System		✓	
Automatisierung komplexer Prozesse	✓		

Abbildung 4-22: Bewertung des Ansatzes bezüglich der Anforderungen

### Weitere Vorteile der Strategie

Neben der Erfüllung der genannten Anforderungen bewirkt der Wegfall von zusätzlichen Sensoren und Aktoren einen geringeren Hardwareaufwand am Robotersystem und eine Verringerung des Kalibrieraufwandes. Somit werden Peripherie-, Implementierungs- und Kalibrierungskosten gesenkt. Gerade die informationstechnische Implementierung von Sensoren wirft aufgrund unzureichender Standardisierung bei Sensorschnittstellen Probleme auf und die notwen-

dige Messtechnik stellt einen nicht unerheblichen Kostenfaktor dar. Durch Nutzung von Produktsensoren erfolgt eine Umrechnung der Sensordaten oftmals in der Produktsoftware. Somit kann die Übergabe der Daten durch analoge, binäre oder digitale Signale unproblematisch erfolgen und die Messtechnik vereinfacht werden.

### 4.6 Hinweise zur Produktkonstruktion

Der funktionale Aufbau eines Produktes ist entscheidend für die Produktfunktionalität. Das richtige Zusammenspiel der einzelnen Komponenten stellt sicher, dass alle funktionalen Anforderungen, die an das Produkt gestellt werden, schließlich auch erfüllt sind. Der geometrische Aufbau des Produktes hingegen hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Montage. Durch eine montagegerechte Produktkonstruktion können Rationalisierungspotentiale in der Montage ausgeschöpft und damit die Montagekosten gesenkt werden. Montagegerechte Produktgestaltung bedeutet dabei, dass ein Produkt hinsichtlich seiner Montagemethode (manuell/automatisiert) optimiert sein muss. BARTHELMEß [1987] und REINHART & ZÄH [2002] führen dazu gestalterische Grundsätze zur montagegerechten Produkt- und Bauteilgestaltung und Hinweise zur Erleichterung der Handhabbarkeit auf.

Bei einer aktiven Nutzung mechatronischer Produktkomponenten im automatisierten Montageprozess wird die Wirtschaftlichkeit der Montage sowohl durch den geometrischen als auch durch den funktionalen Aufbau beeinflusst. Hier ist nicht nur eine montagegerechte Produktgestaltung wichtig. Aufgrund des aktiven Mitwirkens der Produkt- und Bauteilfunktionalitäten am Montageprozess ist ebenfalls eine darauf abgestimmte funktionale Produktkonstruktion notwendig. Für die automatisierungs- bzw. montagegerechte Produkt- und Bauteilgestaltung führen z.B. KONOLD & REGER [1997] oder ROSS [2002] Richtlinien und Methoden auf. Diese sind für die vorgestellte Montagestrategie ebenfalls gültig. Aus diesem Grunde soll hier nicht weiter darauf eingegangen werden.

Die Besonderheiten der Produktkonstruktion liegen vielmehr in dem funktionalen montagegerechten Aufbau. Im Folgenden werden daher Regeln definiert, welche bereits in der Produktkonstruktion zu berücksichtigen sind. Diese Regeln betreffen zum einen die Schnittstelle zwischen Produkt und Robotersystem. Die Schnittstelle stellt ein entscheidendes Kriterium für die Nutzung der Produktkomponenten im Montageprozess dar und muss bereits in der Konstruktions-

phase entsprechend berücksichtigt werden. Zum anderen betreffen die Regeln das Produkt insofern, dass gewisse Eigenschaften von Bauteilen und Baugruppen Voraussetzung für eine Nutzung der Produktkomponenten sind.

Konstruktionsrichtlinien für die Schnittstellengestaltung:

- Schnittstellen vorsehen

Die für eine Nutzung vorgesehene Komponente muss sowohl geometrisch als auch funktionell die Möglichkeit bieten, von außen angesprochen zu werden. Es muss eine entsprechende Schnittstelle am Produkt oder am Bauteil vorhanden sein, die vom Robotersystem automatisiert genutzt werden kann.

- Automatisierte Verbindung unterstützen

Die Schnittstelle muss automatisiert kontaktierbar und wieder lösbar sein. Dafür sind geeignete geometrische Voraussetzungen zu schaffen. Dabei ist die Schnittstellenkontaktierung als Fügeprozess zu sehen, für den die bekannten Regeln für automatisiert herstellbare und wieder lösbare Verbindungen gelten (z.B. Einführschrägen für Stecker, keine Schnappverbindungen).

- Automatisierte Handhabbarkeit der Schnittstellenkomponenten unterstützen

Die Schnittstellenkomponenten, das heißt die dafür zu verbindenden Bauteile, müssen vom Robotersystem entsprechen handhabbar sein. Auch hier gelten wiederum die Regeln zur automatisierungsgerechten Produktkonstruktion.

- Gestaltung von variantenneutralen Schnittstellen

Sollen mehrere Produkte oder Varianten auf einer Anlage montiert werden, so ist darauf zu achten, dass die Schnittstellen für die zu montierenden Produkte geometrisch gleich sind. Ist dies nicht möglich, sind entsprechende Adapter vorzusehen.

Konstruktionsrichtlinien für die Produktgestaltung:

- Zugänglichkeit der genutzten Komponenten vorsehen

Die Zugänglichkeit zur genutzten Komponente durch das Robotersystem muss z.B. durch Aussparungen in umgebenden Baugruppen solange ermöglicht werden, bis ihre Funktion für den Montageprozess nicht mehr von Nutzen ist.

## 4 Nutzung mechatronischer Produktkomponenten

---

- Möglichkeiten zur Erkennung einer Produktzustandsänderung schaffen

Die Integration der genutzten Komponenten im Basisbauteil muss so vorgesehen werden, dass zu unterstützende Montageprozesse eine gewünschte und von diesen feststellbare Änderung des Produktzustandes verursachen.

- Abschirmungen der genutzten Komponenten vorsehen

Konstruktive Abschirmungen von Störeinflüssen auf die Funktion der Produktkomponenten während der Montage (z.B. Lichtschutz bei Sensoren oder Schmutzfänger) müssen berücksichtigt werden. Diese sind für die eigentliche Produktfunktion nicht unbedingt notwendig, ermöglichen aber die Nutzung der Komponenten im Montageprozess.

- Möglichkeit zur rechtzeitigen Implementierung der Software schaffen

Bei der Konstruktion des Produktes muss darauf geachtet werden, dass es möglich ist, die Produktsoftware oder einen Teil davon bereits in einem frühen Stadium der Montage auf das Produkt aufzuspielen. Dies ist für eine Nutzung der Software notwendig.

- Montageinformationen in der Software hinterlegen

Bei der Erstellung der Produktsoftware ist darauf zu achten, dass nicht nur Funktionen für den späteren Betrieb, sondern auch alle notwendigen Informationen für den Montageprozess enthalten sind (z.B. Variantenbezeichnung oder zulässige Fügekräfte)

- Integration von zusätzlichen Produktkomponenten

Es sind ggf. zusätzliche Bau- oder Programmteile im Produkt vorzusehen, die für die Produktfunktionen nicht notwendig sind, den Montageprozess aber unterstützen und vom Robotersystem abgefragt werden können. Dies betrifft vor allem Softwarekomponenten. Zum einen ist die Software auf den Montageprozess anzupassen (z.B. Integration von Montageprozessinformationen) oder sogar ein zusätzlicher Prozessor mit den jeweiligen Informationen im Produkt zu integrieren.



### 4.7 Zusammenfassung

Die Nutzung der Synergien aus Mechanik, Elektrik, Elektronik und Informatik in mechatronischen Produkten führt zu einer veränderten Produktstruktur und erfordert darauf angepasste Produktionsstrategien. Die Mechatronik eröffnet hier nicht nur neue Möglichkeiten zur Generierung und Erweiterung von Produktfunktionalitäten, sondern bietet auch Chancen für eine effiziente und wirtschaftliche Automatisierung der Montage. Diese Chancen sind jedoch mit einigen Anforderungen verbunden um mechatronischen Produkten gerecht werden zu können. Vor allem eine hohe Anlagenflexibilität und Montagequalität bei gleichzeitig sinkenden Montagekosten gilt es zu realisieren.

Der vorgestellte Lösungsansatz zur wirtschaftlichen Montage von Produkten mit mechatronischen Komponenten beinhaltet eine Nutzung dieser mechatronischen Produktkomponenten zur Unterstützung des automatisierten Montageprozesses. Erfolgt dabei neben der mechanischen und energetischen zusätzlich eine informationstechnische Kopplung des Produktes mit dem Robotersystem bereits während der Montage, ist eine intelligente Nutzung der im Produkt integrierten Sensoren, Aktoren oder Softwarebausteine zur Unterstützung des Montageprozesses möglich.

Entscheidend bei dem entwickelten Montagekonzept ist der Aufbau eines Informationsflusses zwischen Produkt und Robotersystem. Da dieser Informationsfluss in beiden Richtungen erfolgen kann, entsteht ein Kommunikationskreis zwischen den beiden Teilsystemen Produkt und Robotersystem, der je nach verwendeter Produktkomponente unterschiedliche Ausprägungen hat. Den korrekten Datenaustausch gewährleistet eine Kommunikationsschnittstelle.

Oft ist die Nutzung mechatronischer Produktkomponenten für den automatisierten Montageprozess abhängig von Voraussetzungen und Produktstrukturen. Die Komponenten müssen geometrisch und funktionell derart in die Produkte integriert sein, dass ihre Nutzung zur Unterstützung des Montageprozesses theoretisch möglich und praktisch umsetzbar ist. Dabei gilt es, nicht nur technische, sondern auch wirtschaftliche Aspekte zu beachten. Daher wurden in diesem Kapitel auch Regeln erarbeitet, die bei der Produktkonstruktion beachtet werden müssen.

Anhand von theoretischen Anwendungsszenarien wurden die Möglichkeiten und Potentiale einer Nutzung mechatronischer Produktkomponenten bei der automatisierten Montage aufgezeigt. Dabei wurde sowohl auf die Nutzung von Produktsensoren, Produktaktoren und Produktsoftware als auch auf eine kombinierte

## 4 Nutzung mechatronischer Produktkomponenten

Nutzung verschiedener Komponenten und auf eine Nutzung bereits existierender Produktfunktionen eingegangen (Abbildung 4-23).

Die in diesem Kapitel aufgeführten Anwendungspotentiale zeigen, dass sowohl die Flexibilität der Anlage als auch die Montagequalität gesteigert und damit zusätzliche Kostenpotentiale ausgeschöpft werden können. Eine Selbstidentifizierung und ein Mitbringen von spezifischer Peripherie durch das Produkt steigern die Varianten- und Produktflexibilität. Ebenso können sowohl Umsetzungen von schwer automatisierbaren Montageprozessen als auch in den Montageprozess integrierte Prüf- und Kontrollprozesse einfach und effizient durchgeführt werden. Durch die damit entstehende Autonomie des Systems kann dann auf vorhersehbare oder unvorhersehbare Störungen durch das Robotersystem reagiert werden.

<b>Sensoren</b>	Entscheidungsfindung	Funktionsprüfung
		Prozesskontrolle
		Bestimmung von Orientierung und Lage
	Bewegungsbeeinflussung	Steuerung
		Regelung
<b>Aktoren</b>	Aktor als Sensor	
	Verbesserung der Zugänglichkeit	
	Positionierung	
	Fixierung	
	Durchführung von Fügeprozessen	
<b>Software</b>	Kommunikation	
	eigenständige Nutzung	Produktidentifizierung
		Übermittlung produkt- und variantenspezifischer Informationen
		Algorithmenberechnung
		Speicherung montagespezifischer Informationen

Abbildung 4-23: Zusammenfassende Darstellung der Anwendungspotentiale

## 5 Kommunikationsschnittstelle

### 5.1 Überblick

Wie bereits in Kapitel 4.3.1 erwähnt, stellt die Kommunikationsschnittstelle als informationstechnische Kopplung zwischen Produkt und Robotersystem eine entscheidende Komponente bei der Nutzung von Produktkomponenten durch das Robotersystem dar. Die Kommunikationsschnittstelle dient dabei als Mittler (Abbildung 5-1). Kommunikation bedeutet hier, dass die Robotersteuerung Signale an das Produkt sendet und Signale vom Produkt empfängt. Die Signale besitzen eine Semantik und stellen somit Befehle und Daten dar.

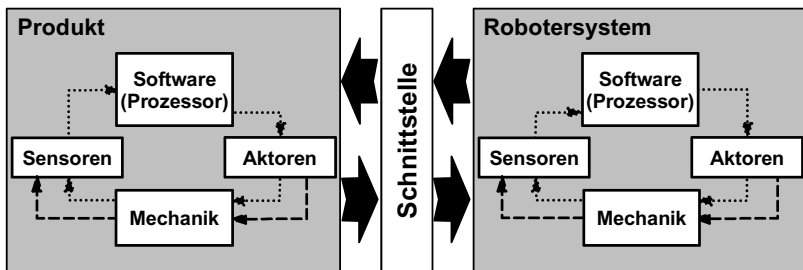


Abbildung 5-1: Kommunikation von Produkt und Robotersystem

Im folgenden Kapitel soll eine informationstechnische Kopplung zwischen Produkt und Robotersystem während des Montageprozesses erarbeitet werden. Ziel ist es, eine allgemeingültige, für die automatisierte Montage unter Nutzung mechatronischer Produktkomponenten taugliche Kommunikationsschnittstelle zu entwickeln. Dabei dienen als Basis die in Kapitel 2.4.3 erarbeiteten Informationen über Kommunikationsschnittstellen.

Zunächst werden sowohl die funktionalen Anforderungen, die an die Schnittstelle gestellt werden, als auch die Anforderungen, die sich aus dem Gesamtsystem ergeben (siehe Kapitel 4.2), erarbeitet. Darauf aufbauend erfolgt die Entwicklung eines Konzeptes der Schnittstelle. Dieses Konzept wird aufgeteilt in einen Hardwareteil und einen Softwareteil. Schließlich erfolgen ein Ausblick und eine Zusammenfassung.

### 5.2 Anforderungen an die Kommunikationsschnittstelle

An eine Kommunikationsschnittstelle zur Nutzung von Produktkomponenten durch ein Robotersystem wird eine Reihe an Anforderungen gestellt. Dies sind Anforderungen an die Funktionen der Schnittstelle, an die Flexibilität und an die Programmierung.

#### 5.2.1 Funktion

Grundsätzlich muss die Schnittstelle gewisse funktionale Anforderungen erfüllen, um einen sicheren Zugriff der Steuerung des Robotersystems auf die Produktkomponenten zu gewährleisten. Je nach Anwendungsfall ist es nicht immer erforderlich, alle aufgeführten Anforderungen zu erfüllen.

Die funktionalen Anforderungen zeigen dabei eine gewisse Abhängigkeit voneinander. Ähnlich dem ISORM sind „Schichten vorhanden“, die in einer strengen Hierarchie zueinander stehen. Bevor die Voraussetzungen in den äußeren Schichten nicht gegeben sind, können die Anforderungen in den inneren Schichten nicht erfüllt werden. Die Anforderung der äußersten Schicht ist die Gewährleistung des informationstechnischen Kontaktes. Davon abhängig sind die Ereigniserkennung- und -behandlung, die Fehlererkennung und -behandlung und das Senden und Empfangen von Signalen. Das Aufbereiten von Signalen kann nur stattfinden, wenn der informationstechnische Kontakt gewährleistet ist, eine Fehlererkennung und -behandlung vorhanden ist und die Signale empfangen worden sind.

Abbildung 5-2 zeigt zusammengefasst alle funktionalen Anforderungen an die Kommunikationsschnittstelle. Die Abhängigkeit der Anforderungen ist durch die Hierarchie von außen nach innen dargestellt. Im Folgenden sind die Anforderungen näher beschrieben, die auf einer Nutzung von Produktkomponenten im automatisierten Montageprozess begründet sind.

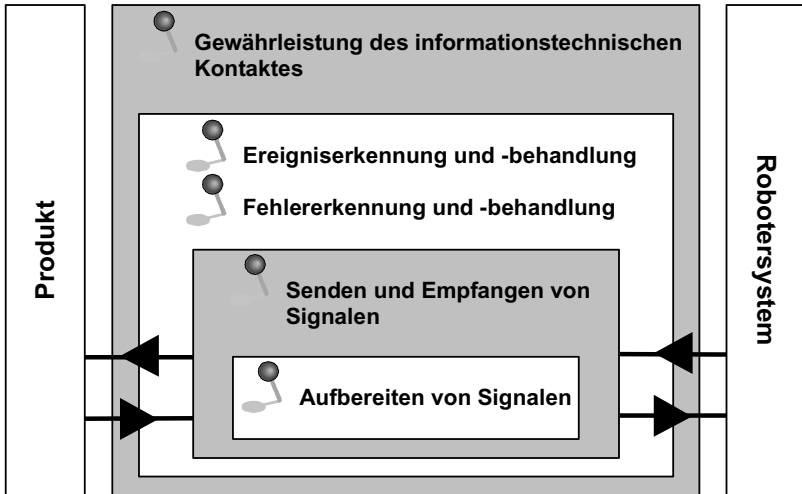


Abbildung 5-2: Funktionale Anforderungen an die Kommunikationsschnittstelle

### **Gewährleisten des informationstechnischen Kontaktes**

Die grundsätzliche Anforderung an die Schnittstelle ist es, die Kommunikation zwischen der Steuerung des Robotersystems und einem bestimmten Produkt zu ermöglichen. Das heißt, sie muss den informationstechnischen Kontakt auf Anweisung des Robotersystems herstellen, ihn aufrechterhalten und ihn wieder lösen. Dies betrifft zum einen die physikalische Verbindung zwischen Produkt und Robotersystem zur Übertragung von Signalen. Zum anderen betrifft es den Signalaustausch zwischen den beiden Partnern, wie z.B. das Ansprechen der richtigen Signalein- und -ausgänge.

### **Ereigniserkennung und Ereignisbehandlung**

Während der Montage und der damit verbundenen Kommunikation zwischen Produkt und Robotersystem treten Ereignisse auf. Ereignisse sind bestimmte erwünschte und zuvor definierte Zustände im Programmablauf, auf die andere Softwarebausteine warten und reagieren können. Der Zeitpunkt ihres Auftretens kann dabei überraschend sein. Die Kommunikationsschnittstelle muss zu jeder Zeit diese Ereignisse erkennen und auf sie reagieren können. So muss beispiels-

weise die Schnittstelle das Robotersystem unverzüglich informieren, wenn ein gewünschter Sensorwert im Produkt erreicht oder überschritten wird.

### **Fehlererkennung und Fehlerbehandlung**

Während der Kommunikation können nicht nur Ereignisse, sondern auch Fehler auftreten. Im Gegensatz zu Ereignissen treten Fehler unbeabsichtigt und damit unerwartet auf. Sie können sowohl in der Datenübertragung zwischen Produkt und Schnittstelle bzw. zwischen Robotersystem und Schnittstelle als auch innerhalb der Schnittstelle im Programmablauf entstehen. Da Fehler normalerweise eine sofortige Reaktion des Robotersystems auslösen sollen, müssen diese von der Kommunikationsschnittstelle schnell und sicher erkannt und anschließend behandelt werden. Die Fehlerbehandlung ist eine fest definierte Reaktion und hängt von der Art des Fehlers ab.

Die Kommunikationsschnittstelle als solche funktioniert auch ohne Fehlererkennung und -behandlung. Da es aber für die automatisierte Montage unbedingt notwendig ist, auf die zahlreichen Fehlerquellen reagieren zu können, wird die Fehlererkennung und -behandlung hier als eine funktionale Anforderung genannt.

### **Senden und Empfangen von Signalen**

Wie in Abbildung 5-1 dargestellt, muss die Kommunikationsschnittstelle Signale sowohl von der Steuerung des Robotersystems als auch vom Produkt empfangen und ebenso Signale an beide senden, wenn der informationstechnische Kontakt einmal hergestellt ist. Diese Signale können dabei Metadaten (z.B. Variante, Versionsnummer oder Programmteile), Steuerbefehle (z.B. „bewege Produktaktor“) oder auch physikalische Werte enthalten. Dabei ist zu unterscheiden, ob die Kommunikation über die Produktsoftware oder direkt mit der Produktkomponente, also ohne Umweg über die Produktsoftware, stattfindet. Um mit einem Produkt über Software kommunizieren zu können, ist es notwendig, mit diesem digitale Signale auszutauschen. Werte und Daten vom und zum Produkt werden binär codiert. Dafür eventuell notwendige D/A- und A/D-Wandler müssen für die Software transparent sein. Bei der direkten Kommunikation mit Produktkomponenten, vorzugsweise mit Aktoren, findet der Datenaustausch in der Regel analog statt. Robotersteuerungen besitzen meist die Funktion, analoge Daten einlesen und ausgeben zu können und haben die notwendigen Wandler dafür integriert. Ist dies nicht der Fall, muss diese Funktion von der Schnittstelle übernommen werden.

### Aufbereitung von Signalen

Nicht nur das Senden und Empfangen von Signalen stellt eine Anforderung an die Schnittstelle dar, sondern auch das Aufbereiten der Daten.

Eine Aufgabe der Aufbereitung ist die Decodierung der vom Produkt kommenden und die Codierung der zum Produkt gesendeten Daten. Eine Decodierung ist immer dann notwendig, wenn die in die Schnittstelle eingehenden Werte aus Gründen der Übertragungssicherheit codiert sind. Die Codierung der Signale kann etwa aus Sicherungsmechanismen wie Prüfziffern zur Überprüfung der Vollständigkeit bestehen, welche zur Weiterverarbeitung des eigentlichen Wertes entfernt werden müssen. Werden Daten vom Robotersystem an das Produkt gesendet, hat eine Codierung zu erfolgen, falls das Produkt diese erwartet.

Die zweite Aufgabe der Signalaufbereitung besteht in einer Vorverarbeitung der Daten, welche nach der Decodierung bzw. vor der Codierung erfolgt. Dabei werden die eingehenden Signale entsprechend der für den Montageprozess notwendigen Informationen verrechnet. Erst diese vorverarbeiteten Signale werden als Ergebnis an den jeweiligen Partner gesendet. Dabei muss das Ergebnis in seiner Semantik der Erwartung des Empfängers entsprechen. Insbesondere müssen physikalische Größen in der Einheit weitergegeben werden, in der sie benötigt werden.

Eine Art der Vorverarbeitung ist die Umrechnung der Daten, wenn sie nicht der erwarteten physikalischen Größe entsprechen. Wird beispielsweise eine Sensorgröße als ein Spannungssignal und nicht als Temperaturwert übertragen, muss das Signal vorher verarbeitet werden um die gewünschte Größe zu erhalten.

Eine weitere Art der Vorverarbeitung ist die Verrechnung einer oder mehrerer gesendeter Daten zu einem von der Robotersteuerung gewünschten Wert. Beispiele dafür sind:

- Eingehende Relativwerte der Sensoren in Absolutwerte umrechnen.
- Statistische Funktionen wie den Durchschnitt einer Messreihe bilden.
- Anhand festgelegter Algorithmen Berechnungen wie etwa Kompensationsrechnungen durchführen.
- Mehrere Daten aus verschiedenen Teilaufgaben zu einem Ergebnis zusammenfassen.

### 5.2.2 Flexibilität

Neben der Erfüllung der funktionalen Anforderungen muss die Schnittstelle als Teil des Gesamtsystems auch dazu beitragen, die Anforderungen zu erfüllen, die an das Robotersystem gestellt werden (siehe Kapitel 4.2).

Im Besonderen ist hier eine möglichst gute Varianten- und Produktflexibilität gefordert. Dies unterstreicht darüber hinaus auch das Bestreben, dass die Roboterbewegungsprogramme unabhängig von der Schnittstelle entwickelt werden können. Dadurch muss sich der Programmierer nicht mit Details zur Implementierung der Kommunikation zwischen Robotersystem und Produkt beschäftigen.

### 5.2.3 Programmierung

Um die mit dem Umfang von Programmen sprunghaft zunehmende Komplexität zu bewältigen und überflüssige Programmierarbeiten sowie daraus resultierende Fehlerquellen zu vermeiden, ist es wichtig, eine verständliche, sich an den Produktfunktionen orientierende Schnittstelle zu schaffen. Deshalb werden zuvor einige Anforderungen an die Programmierung gestellt. Diese Anforderungen sollen nicht nur für eine Überschaubarkeit der Schnittstelle, sondern auch für eine gewisse Produkt- und Variantenflexibilität im Aufbau sorgen. Dadurch kann der Roboter auf die gleiche Art und Weise mit beliebigen Produkten kommunizieren. Die Forderung nach einer verständlichen Dokumentierung der Schnittstelle wird dabei vorausgesetzt.

An dieser Stelle soll der Hinweis gegeben werden, dass die tatsächliche Umsetzung der Programmierung davon abhängt, welchen Funktionsumfang und welches Betriebssystem die Robotersteuerung bietet. In der Regel müssen aufgrund der für diesen Zweck oft eingeschränkten Programmiermöglichkeiten der Robotersteuerungen Kompromisse zwischen der Übersichtlichkeit und Funktionalität der Schnittstelle und dem dafür zu betreibenden Aufwand eingegangen werden.

### Einfache Handhabung

Wichtig für eine produktionstaugliche Anwendung ist eine einfache Handhabung der Schnittstelle. Um dies zu gewährleisten, müssen programmiertechnische Details vor dem Benutzer der Schnittstelle verborgen werden. Nur die Bausteine der Schnittstelle sollen für ihn sichtbar sein, die für eine Anbindung des vorliegenden Produktes und für eine Umsetzung des Roboterprogramms notwendig



sind. Das bedeutet, dass der Benutzer nur die Unterprogramme verwenden kann, welche die für die Anwendung notwendigen Funktionen abbilden.

### **Möglichkeit zur einfachen Erweiterung**

Wenn es bei einem Produkt- oder Variantenwechsel notwendig sein sollte, die Funktionen der Schnittstelle zu erweitern, muss es ohne großen Programmieraufwand bewerkstelligt werden können, weitere Unterprogramme hinzuzufügen. Dafür ist ein Programmaufbau aus möglichst unabhängigen Modulen hilfreich. Weiterhin müssen die zu programmierenden Funktionen mit entsprechender Weitsicht umgesetzt werden. Das heißt, es sollten von Beginn an Funktionen vorgesehen werden, die vielleicht erst später benötigt werden könnten. Dazu kann ein Unterprogramm, welches eine Funktion beschreibt, von vornherein in zwei oder mehr Teil-Unterprogramme aufgeteilt werden, falls diese eine eigene zukünftige Funktion beschreiben könnten.

### **Aufgabengerechte Zuordnung von Unterprogrammen**

Um den Einsatz der Unterprogramme effizient zu gestalten, sollte in der Schnittstelle ein Unterprogramm genau eine Funktion, die im Rahmen einer konkreten Problemlösung ausgeführt werden muss, abbilden. Jedoch kann es mehrere Unterprogramme geben, welche die gleiche Funktion mit anderen Ein- und Ausgangswerten erfüllen.

### **Sinnvolle Benennung der Unterprogramme**

Die Benennung eines Unterprogramms muss sich nach dessen Aufgabe richten und dieser eindeutig zuordenbar sein. Durch eine einheitliche Nomenklatur ist eine Übersichtlichkeit auch noch zu späteren Zeitpunkten sichergestellt.

### **Definierte Übergabe von Daten**

Um eine übersichtliche Unterteilung der Schnittstelle in allgemeine Funktionen bzw. Unterprogramme zu ermöglichen, ist es wichtig, auch die Übergabe der Daten, welche zwischen den einzelnen Unterprogrammen stattfinden muss, definiert und funktionsorientiert vorzusehen. Dies bedeutet, dass z.B. die Daten, die übergeben werden, und die dazugehörigen Rückgabewerte festgelegte Variablentypen und eine festgelegte Reihenfolge besitzen müssen, und zwar unabhängig vom Produkt. Damit ist in jedem Unterprogramm eindeutig definiert, welche Daten in welcher Form dort auftreten.

### 5.3 Konzeption der Kommunikationsschnittstelle

Basierend auf den oben aufgestellten Anforderungen wird ein Konzept einer Kommunikationsschnittstelle zur Nutzung mechatronischer Produktkomponenten im Montageprozess erarbeitet. Um dabei die Anforderung bezüglich einer Varianten- und Produktflexibilität des Gesamtsystems zu erfüllen, muss auch die Kommunikationsschnittstelle möglichst produktneutral gestaltet sein.

#### 5.3.1 Randbedingungen

Da die Robotersteuerungen derzeit fast ausschließlich auf die extrem rechenintensive Bewegungssteuerung des Roboters ausgerichtet sind, bieten sie keine oder nur sehr eingeschränkte Funktionen für eine Integration komplexer Aufgaben [KUGLER & WENK 1999]. Dies schlägt sich in einer eingeschränkten oder nicht vorhandenen Multitasking-Fähigkeit und in einer geringen Kommunikationsgeschwindigkeit durch die Bevorzugung der Roboterberechnungen vor anderen Programmen nieder. Bei einem System zur automatisierten Montage können jedoch oftmals folgende Randbedingungen zur Vereinfachung für die zu entwickelnde Schnittstelle gegenüber Schnittstellen in einem Multitasking-Betriebssystem vorausgesetzt werden:

- Lediglich ein Roboter nutzt die Schnittstelle zur selben Zeit um mit genau einem Produkt zu kommunizieren.
- Die Aufrufe erfolgen größtenteils synchron, das heißt der Roboter arbeitet erst dann weiter, wenn er ein Ergebnis erhält.
- Es wird niemals mehr als ein Wert zur gleichen Zeit abgefragt. Ein schnelles aber sequentielles Abfragen mehrerer Werte hintereinander ist davon nicht betroffen.

Die Randbedingungen sind dabei unabhängig von dem zu montierenden Produkt und den dazu auszuführenden Tätigkeiten.

Diese Vereinfachungen ermöglichen es, eine Kommunikation zwischen Produkt und Robotersystem, trotz der dafür nicht ausgelegten Robotersteuerungen, mit vertretbarem Aufwand umzusetzen.

### 5.3.2 ISO/OSI-Schichten der Schnittstelle

Vor allem die Anforderungen an die Programmierung der Schnittstelle (siehe Kapitel 5.2.3) können durch einen streng hierarchischen Aufbau erreicht werden. Aus diesem Grund orientiert sich das entwickelte Konzept der Schnittstelle am ISO/OSI-Referenzmodell (ISORM). Entsprechend dem ISORM (siehe Kapitel 2.4.3.3) wird die Kommunikationsschnittstelle funktional zerlegt und in entsprechenden Schichten angeordnet. Der ISO/OSI Standard wurde vorwiegend für die Kommunikation in Computernetzwerken entwickelt und schreibt unter anderem vor, dass alle beteiligten Parteien sämtliche Funktionen und Schichten des Standards unterstützen und verwenden müssen. Da laut oben getroffener Annahme im vorliegenden Fall stets genau eine Steuerung mit genau einem Produkt kommuniziert, handelt es sich nach DIN 44302 [1987] um eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung. Nach WENK [2002] und DIN V 66311 [1987] können bei Punkt-zu-Punkt-Verbindungen die Schichten 3 bis 6 des ISORM vernachlässigt werden (Abbildung 5-3).

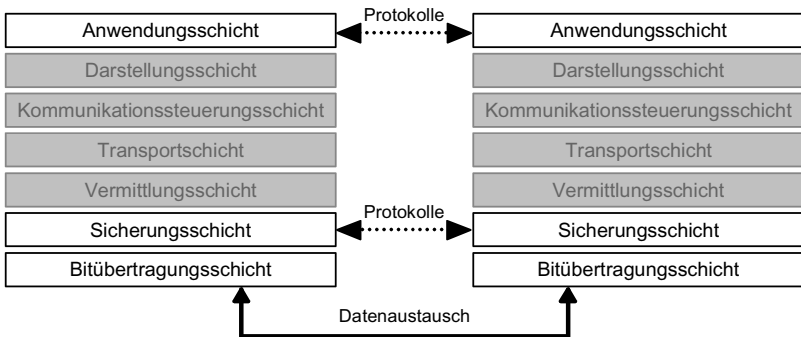


Abbildung 5-3: Notwendige ISORM-Schichten für eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung

Bei der Kommunikation zwischen Produkt und Robotersystem liegt nach den oben getroffenen Vereinbarungen zu jeder Zeit eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung vor. Wegen einer möglichst varianten- und produktneutralen Schnittstelle muss aber die Möglichkeit gegeben sein, trotzdem mit mehreren Partnern zu kommunizieren, da entweder wechselnde Varianten oder gar wechselnde Produkte angesprochen werden müssen. Dabei hält bis zur Beendigung der Verbindung durch das Robotersystem immer nur ein und derselbe Partner die Verbindung.

## 5 Kommunikationsschnittstelle

Aufgrund möglicher unterschiedlicher Datencodierungen bei unterschiedlichen Produkten oder Varianten muss in Ergänzung zu Abbildung 5-3 deshalb die Darstellungsschicht eingefügt werden. Hier werden die vom Produkt kommenden Daten so übersetzt, dass die Anwendungsschicht in der Robotersteuerung damit arbeiten kann.

Ein weiterer Sonderfall bei dieser Schnittstelle ist, dass von den Schichten nur der Teil umgesetzt werden muss, der sich auf der Seite der Robotersteuerung befindet. Die Produktseite ist im Normalfall vorgegeben. Eine notwendige Kommunikation innerhalb der Montage zwischen Produkt und Robotersystem kann bereits in der Produktplanung und bei der Umsetzung der Produktsoftware besondere Berücksichtigung finden und es können entsprechende Voraussetzungen geschaffen werden. Darauf wird hier jedoch nicht weiter eingegangen.

Somit ist es auch in diesem Fall nicht notwendig, den gesamten ISO/OSI Standard umzusetzen. Das Schichtenmodell wird aber konzeptuell übernommen und die Kommunikationsschnittstelle danach entwickelt. Dies gilt insbesondere für die von ISO/OSI verlangte strenge Hierarchie der Schichten (siehe Kapitel 2.4.3.3). Im Folgenden wird die Kommunikationsschnittstelle in einen Hardware- und einen Softwareteil zerlegt und den jeweiligen Schichten des ISORM zugeordnet (Abbildung 5-4).

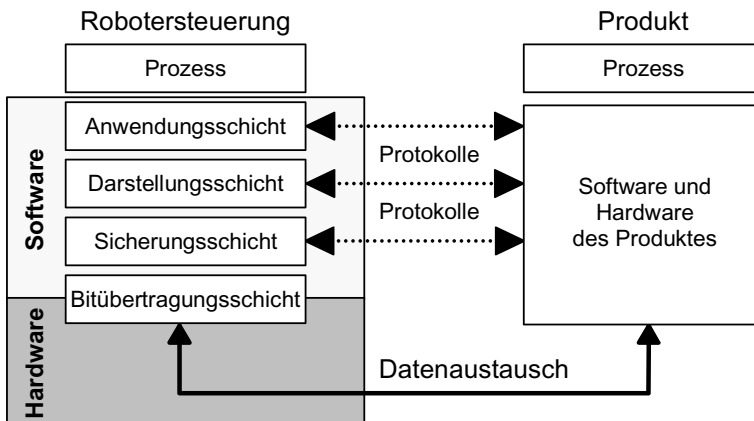


Abbildung 5-4: Reduziertes ISO-Referenzmodell einer produkt- und varianten-neutralen Kommunikationsschnittstelle zwischen Produkt und Robotersystem

### 5.3.3 Hardwareteil der Schnittstelle

Eine Hardwareschnittstelle wird beschrieben durch die Eigenschaft der Übertragungsstrecke (Kabel, Stecker, etc.) und durch die Art und Bedeutung der auf den Leitungen übertragenen Signale [SCHÜRMAN 2003]. Hauptaufgabe der zu entwickelnden Hardwareschnittstelle ist die Schaffung der physikalischen Voraussetzungen zur Datenübertragung zwischen Produkt und Robotersystem. Sie muss alle physikalischen Komponenten umfassen, die für eine einwandfreie Datenübertragung notwendig sind. Dies sind Komponenten zum Datentransport, Schnittstellen zur Anbindung an Produkt und an Robotersystem und notwendige Zusatzkomponenten.

Der Datentransport kann sowohl über Kabel (z.B. Koaxialkabel) als auch über drahtlose Verbindungen (z.B. Funk) realisiert werden. Damit ein Transport möglich ist, müssen die Robotersteuerung und das Produkt die Hardware-Schnittstelle unterstützen. Die Anbindung an Robotersystem und Produkt kann seriell beispielsweise über eine RS232 Schnittstelle oder parallel, z.B. über I/Os, erfolgen. Auch andere Standards wie USB, FireWire oder BlueTooth sind denkbar, werden von den Steuerungen der Robotersysteme jedoch nicht immer unterstützt. Grundsätzlich werden die zu verwendenden Standards vom Robotersystem auf der einen Seite und vom Produkt auf der anderen Seite vorgegeben. Damit eine gewisse Produktflexibilität gegeben ist, kann die Schnittstelle zum Produkt z.B. durch Adapter angepasst werden.

Neben Datentransport und Anbindung sind oft Zusatzkomponenten notwendig. Da die Signalverarbeitung in Robotersteuerungen stets digital erfolgt [SCHMID 1989], können diese Zusatzkomponenten z.B. A/D- bzw. D/A-Wandler oder auch Signalverstärker sein, falls diese noch nicht durch Produkt oder Robotersystemsteuerung zur Verfügung gestellt werden. Weiterhin müssen Zusatzkomponenten die physikalische Herstellung und Trennung der Verbindung realisieren, wenn diese nicht durch das Robotersystem selbst umgesetzt werden. Ebenso stellen sie die Versorgung des Produktes mit Strom, Luft, Öl oder anderen für eine Nutzung notwendigen Medien sicher.

### 5.3.4 Softwareteil der Schnittstelle

Im Folgenden wird auf den funktionalen Aufbau der Schnittstelle eingegangen. Dieser besteht aus einer Device-Komponente, einer Funktions-Komponente,

## 5 Kommunikationsschnittstelle

---

einem Server, einem Datastore, einer Ereignis- und einer Fehlerbehandlung (Abbildung 5-5).

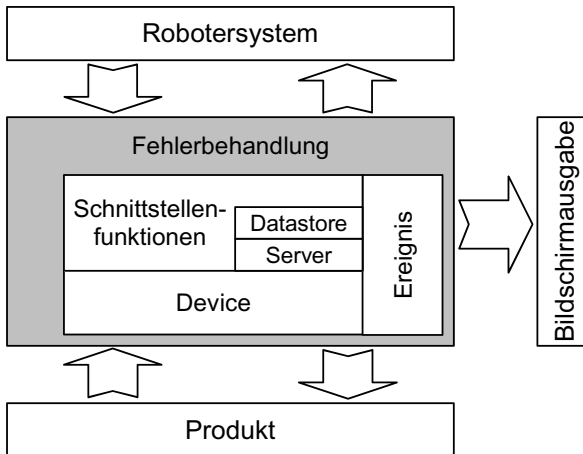


Abbildung 5-5: Aufbau des Software-Teils der Kommunikationsschnittstelle

Um die geforderte Flexibilität zu erreichen, besitzt die Schnittstelle einen modularen Aufbau. Jedes Modul wird durch eine Funktion dargestellt. Die einzelnen die Funktionen abbildenden Unterprogramme besitzen einen produktunabhängigen Aufbau (festgelegte Namensgebung, Funktion, Datenübergabe, etc.). Der Inhalt hingegen kann bei allen Unterprogrammen produktabhängig sein. Bei verschiedenen Varianten betreffen die notwendigen Änderungen in der Regel nur eine begrenzte Anzahl von Unterprogrammen.

Die *Device-Komponente* ist abhängig von dem zu kontaktierenden Produkt. Darin enthalten sind alle varianten- und produktspezifischen Informationen und hardwarenahen Programmabläufe. Dies sind beispielsweise allgemeine Gerätetests, spezielle Steuerbefehle, um vom Produkt definierte Daten anzufordern, und Algorithmen, um diese zu lesen und weiterzuverarbeiten. Nach außen hin, also für die anderen Schnittstellenkomponenten, sind nur definierte und unveränderbare Unterprogramme sichtbar. Die gewünschten Daten werden in Variablen weitergegeben, deren Typ und Reihenfolge der Übergabe unveränderbar sind. Somit ist der Rest der Schnittstelle von der Art des kontaktierten Gerätes unabhängig.

Auf der Device-Komponente sitzt die *Funktions-Komponente* der Schnittstelle. Hier sind alle Funktionen zusammengefasst, welche die Schnittstelle zur Erreichung ihrer Aufgabe besitzen muss. Sie bildet die Schnittstelle zum Roboterprogramm bzw. zum Anwender. Neben den notwendigen Funktionen können ein Server und ein Datastore integriert werden. Diese sind notwendig um aktuelle Zustandsinformationen abzuspeichern und auf diese zu einem späteren Zeitpunkt zugreifen zu können.

Der *Server* kommuniziert über die Device-Komponente mit dem Produkt. Erhält er eine Verbindung, so beginnt er, ständig Daten vom Produkt einzulesen und diese decodiert abzuspeichern.

Im *Datastore* können beliebige Datensätze mit einer festlegbaren Historie abgespeichert werden. Wenn der Speicher voll ist, werden die ältesten Datensätze gelöscht, um Platz zu schaffen für neue Daten. Zusätzlich können hier spezielle Datensätze, etwa die Prüfwerte eines Funktionstests oder erreichte Grenzwerte, bis zu ihrem Zurücksetzen durch einen Reset-Befehl gespeichert werden. Diese Daten können dann zur Dokumentation über die Steuerung des Robotersystems beispielsweise an den Zellenrechner weitergegeben werden. Ein Auslesen erfolgt nur von ganzen Datensätzen, um zu verhindern, unvollständige Werte zu bekommen.

Mit diesen Komponenten verbunden ist die *Ereignis-Komponente*. Ereignisse können in allen Programmteilen der Schnittstelle auftreten und werden in der Ereignis-Komponente in einer Variablen gespeichert. Die Programmteile, für die ein bestimmtes Ereignis wichtig ist, werden bei seinem Eintreten informiert. Weiterhin können die abgespeicherten Ereigniszustände jederzeit von allen Programmteilen abgerufen werden. Die Ereignis-Komponente ist auch die Schnittstelle zur *Bildschirmausgabe*, da sich die Visualisierung nur beim Eintreten eines Ereignisses, z.B. einer Wertänderung, ändert.

Die beschriebenen Komponenten werden von einer *Fehlerbehandlungs-Komponente* umgeben, die dafür sorgt, dass ein Fehler in allen Programmteilen sofort erkannt und darauf entsprechend reagiert werden kann. Die erste Art von Fehlern, sog. Ausnahmen oder Exceptions, sind Fehler, mit deren theoretischem Auftreten gerechnet wird. Diese Fehler werden von der Kommunikationsschnittstelle identifiziert und in definierter Form an das Robotersystem gemeldet. Dort ist im Steuerprogramm die entsprechende Reaktion darauf bestimmt. Die zweite Art sind Fehler, mit denen nicht gerechnet wird, so genannte fatale Fehler oder

auch Errors. Dies können beispielsweise Programmierfehler oder Fehler aufgrund außerordentlicher Einflüsse wie etwa Stromausfall oder Festplatten-crash sein. Als Reaktion sind lediglich ein Programm- bzw. Prozessabbruch möglich und der Versuch, Roboter, Steuerung und Peripherie in einen stabilen, wenn möglich zuvor festgelegten Zustand zu bringen. Auch manche Exceptions müssen als Errors behandelt werden. Dies gilt immer dann, wenn mit dem Fehler zwar gerechnet wird, er aber in der Kommunikationsschnittstelle nicht identifiziert wurde und damit auch nicht wie eine Exception behandelt werden kann. Als Beispiel sei hier der Fehler „Division durch 0“ genannt, welcher bei einem Abfangen im Programmablauf als eine Exception, bei einer Nichtberücksichtigung als ein Error auftritt.

Dieser funktionale Aufbau der Schnittstelle gewährleistet die Erfüllung der in Kapitel 5.2 aufgestellten Anforderungen. Er kann nun den notwendigen Schichten des ISORM (Abbildung 5-4) zugeordnet werden.

Die Device-Komponente umfasst die Bitübertragungsschicht, die Sicherungsschicht und die Darstellungsschicht. Diese Schichten sind aufgrund ihrer Nähe zum Produkt stark produktabhängig. In ihnen finden sich die Eigenschaften und Funktionen des Produktes wieder. Da die Device-Komponente nicht direkt mit der Robotersteuerung und damit dem Anwendungsprogramm kommuniziert, ist sie anwendungsunabhängig.

Die Schnittstellenfunktionen bilden zusammen mit Server und Datastore die Anwendungsschicht. Hier ist hinterlegt, was die Schnittstelle leisten muss. Diese Komponente ist stark anwendungsabhängig. Die Ausführung der dafür notwendigen produktnahen Funktionen findet in den unteren Schichten statt. Dadurch besitzt diese Schnittstellenkomponente eine Varianten- und in gewissen Grenzen auch eine Produktunabhängigkeit. Die Produktunabhängigkeit ist nicht mehr gegeben, wenn neue Funktionen bedingt durch die neue Anwendung in die Schnittstelle integriert werden müssen.

Die Fehlerbehandlung findet sich sowohl in der Sicherungsschicht bei Kommunikationsstörungen als auch in der Anwendungsschicht bei Fehlern, die den Montageprozess betreffen, wieder.

Die Ereignis-Komponente muss aufgrund ihrer Aufgabe, Ereignisse innerhalb der einzelnen Unterprogramme weiterzugeben, in allen Schichten vertreten sein.



## 5.4 Zusammenfassung

In dem vorangegangenen Kapitel wurde auf die Besonderheiten einer Kommunikationsschnittstelle zwischen Produkt und Robotersystem eingegangen, wenn diese bei einer Nutzung von Produktkomponenten im automatisierten Montageprozess Anwendung finden soll.

Dazu wurden zunächst Anforderungen an Aufbau und Funktion, die eine Anwendung im Montageprozess mit sich bringt, aufgestellt (Abbildung 5-6). Aus diesen Anforderungen hat sich ergeben, dass eine Struktur, ähnlich dem ISO/OSI-Referenzmodell (ISORM) mit seiner strengen Hierarchie, sinnvoll ist.









<b>Schicht</b> <b>Anforderung</b>	Bitübertragungsschicht	Sicherungsschicht	Darstellungsschicht	Anwendungsschicht
Herstellen des informationstech. Kontaktes				
Senden und Empfangen der Signale				
Aufbereitung der Signale				
Ereigniserkennung und -behandlung				
Fehlererkennung und -behandlung				

Abbildung 5-6: Erfüllung der Anforderungen durch die einzelnen Schichten des ISORM

Die Schnittstelle wurde in ihren funktionalen Aufbau zerlegt und die einzelnen Funktionskomponenten näher beschrieben. Um die Komplexität der Schnittstelle zu ordnen, wurde diese zuerst in einen Hardware- und einen Softwareteil

untergliedert. Der Hardwareteil ist für den physikalischen Verbindungsauf- und -abbau zuständig und muss alle dafür benötigten Komponenten bereitstellen. Der Softwareteil stellt sich als weit komplexer dar. Er besitzt eine Device-Komponente, eine Funktions-Komponente, eine Ereignis-Komponente und eine Fehlerbehandlung. Die Abbildung dieser Funktionen in der Schnittstelle wurde durch eine Erarbeitung des funktionalen Aufbaus und durch eine anschließende Zuordnung zu den notwendigen Schichten des ISORM erreicht.

Somit konnte sichergestellt werden, dass die aufgestellten Anforderungen durch die entwickelte Schnittstelle erfüllt wurden.

## 6 Auswirkung auf die Montagesystemplanung

### 6.1 Überblick

In der Literatur ist eine Vielzahl von Vorgehensweisen zur Montagesystemplanung zu finden. So beschreiben etwa REFA [1990] oder die VDI 2221 [1993] eine allgemeingültige Systematik zur Planung von Systemen. Ebenso existieren eine Reihe von Vorgehensweisen zur Planung von Systemen für die Montage [BULLINGER 1995, KONOLD & REGER 1997]. Diese Methoden beinhalten alleamt ein systematisches Vorgehen und eine Zielorientierung.

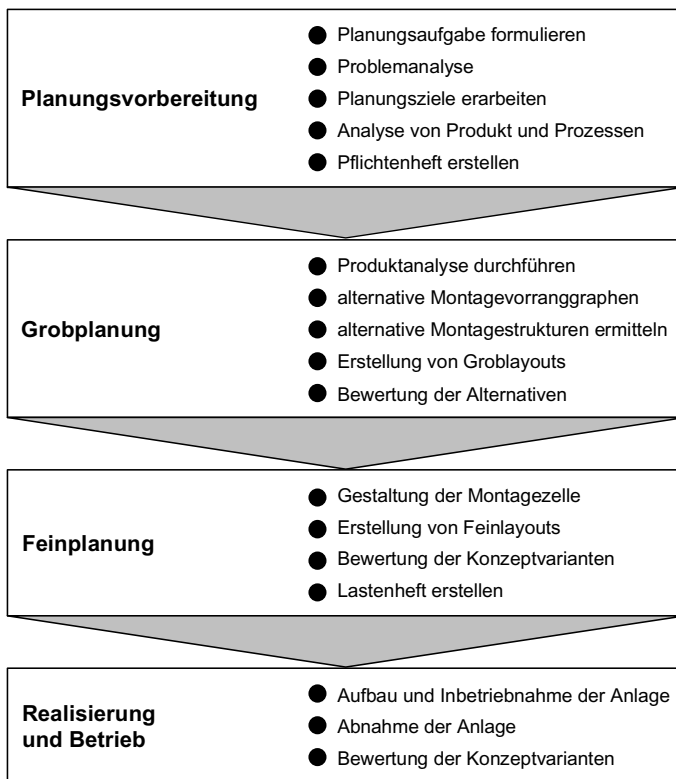


Abbildung 6-1: Vorgehensweise zur Planung von Montagesystemen nach REINHART & ZÄH [2002]

Abbildung 6-1 zeigt eine zusammenfassende Darstellung der Vorgehensweise nach REINHART & ZÄH [2002], welche auf der Planungsmethode von BULLINGER [1995] beruht.

Um die Nutzung mechatronischer Produktkomponenten bei der automatisierten Montage zu ermöglichen, müssen die Montagesysteme speziell darauf ausgelegt werden. Dies erfordert eine entsprechende Anpassung der Planungssystematik. Eine derartige Anpassung findet sich in der Literatur jedoch nur bezüglich anderer Eigenschaften wie etwa der Stückzahlflexibilität [REINHART ET AL. 1999].

In diesem Kapitel wird eine Vorgehensweise zur Planung von Montagesystemen erarbeitet, welche ein besonderes Augenmerk auf der Nutzung mechatronischer Produktkomponenten zur Unterstützung des Montageprozesses legt. Diese Systematik basiert auf der in Abbildung 6-1 dargestellten Vorgehensweise. Diese wird in den Phasen der Planungsvorbereitung (Kapitel 6.2.1) und der Grob- und Feinplanung (Kapitel 6.2.3) ergänzt und darüber hinaus die Phase der Kommunikationsplanung (Kapitel 6.2.2) eingeführt.

### 6.2 Planungsvorgehen

Die einzelnen Planungsschritte werden im Hinblick auf die spezielle Eigenschaft des Montagesystems erweitert und entsprechend angepasst. Weiterhin ist es notwendig, den zusätzlichen Planungsschritt der Kommunikationsplanung einzuführen. Eine Planung von Energie- und Informationsflüssen zwischen Produkt und Robotersystem während der Montage wird in den bisherigen Vorgehensweisen nicht berücksichtigt.

Die Nutzung mechatronischer Produktkomponenten zur Unterstützung des automatisierten Montageprozesses hat vor allem in den ersten Phasen der Planung einen Einfluss auf die Vorgehensweise. Daher werden im Folgenden die Planungsvorbereitung, die Kommunikationsplanung, die Grob- und die Feinplanung weiter detailliert. In den Phasen Realisierung und Betrieb hingegen ändert sich gegenüber der herkömmlichen Vorgehensweise nichts. Aus diesem Grunde wird darauf nicht weiter eingegangen.

In den einzelnen Planungsphasen werden im Folgenden nur die notwendigen Änderungen und Ergänzungen beschrieben. Diese sind in Abbildung 6-2 zusammengefasst dargestellt.

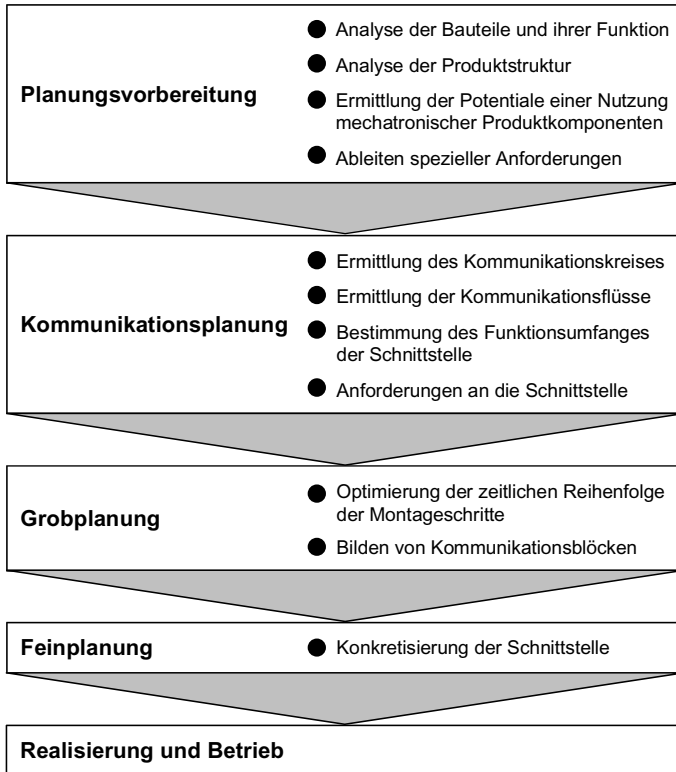


Abbildung 6-2: Anpassung der Montagesystemplanung

### 6.2.1 Planungsvorbereitung

In der Planungsvorbereitung werden die Planungsgrundlagen und -ziele erarbeitet. Dazu werden Analysen zum Produkt, zu den Prozessen, zur Produktion und zu den erwarteten Stückzahlen durchgeführt.

Zur Anpassung an den vorliegenden Fall sind in zusätzlichen Arbeitsschritten, aufbauend auf der Produkt- und Prozessanalyse, die Potentiale einer Nutzung mechatronischer Produktkomponenten zu ermitteln.

Dazu werden im ersten Schritt im Rahmen der Produktanalyse die einzelnen Bauteile des Produktes hinsichtlich ihrer Eignung untersucht, ob sie zur Unterstützung des Montageprozesses genutzt werden zu können. Sie müssen in der

## **6 Auswirkung auf die Montagesystemplanung**

---

Lage sein, während des Montageprozesses auf Befehl Bewegungen auszuführen oder Informationen zu generieren und diese, gegebenenfalls mit Hilfe weiterer Komponenten, an das Robotersystem zu übertragen. Neben der Funktion der einzelnen Komponenten werden auch vorgesehene Produktfunktionen untersucht. Diese generieren sich aus dem Zusammenspiel meist mehrerer Komponenten, die alle die Erfüllung der Funktion unterstützen.

Ist die Analyse der Produktkomponenten und -funktionen abgeschlossen, wird in einem zweiten zusätzlichen Schritt die Integration der Bauteile in die Produktstruktur untersucht. Das Zurückgreifen auf Informationen der Produktkomponenten durch das Robotersystem setzt voraus, dass diese Informationen aufgrund der Anordnung der Komponenten aufgenommen werden können. Dies hängt entscheidend von der geeigneten Integration in die Produktstruktur ab.

Durch diese beiden zusätzlichen Analyseschritte können daraufhin die Potentiale ermittelt werden, welche das Produkt im Hinblick auf eine Nutzung mechatronischer Komponenten bietet. Es ist zu erarbeiten, welche Komponenten zu welcher Zeit des Montageprozesses welche Daten liefern bzw. welche Bewegungen ausführen können. Es wird bestimmt, welche Montageprozesse dadurch zu unterstützen sind. Als Werkzeug dazu können die in Kapitel 4.4 aufgestellten Anwendungsszenarien herangezogen werden.

Sind die Potentiale ermittelt und stehen Art und Umfang einer Nutzung der Produktkomponenten fest, werden daraus spezielle Anforderungen abgeleitet und im Pflichtenheft verankert.

### **6.2.2 Kommunikationsplanung**

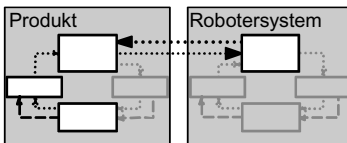
Aufgrund der Besonderheit der Kommunikation von Produkt und Robotersystem muss die allgemeine Vorgehensweise zur Montageplanung durch die Phase der Kommunikationsplanung erweitert werden. In dieser Phase werden alle Schritte geplant, welche die Kommunikation zwischen Produkt und Montagesystem betreffen. Zuerst erfolgen die Ermittlung des Kommunikationskreises und der die jeweiligen Systemgrenzen überschreitenden Kommunikationsflüsse. Daraus leiten sich der Funktionsumfang der Schnittstelle und die für den jeweiligen Montagefall zutreffenden Anforderungen an diese ab (Abbildung 6-3).

Wurden in der Planungsvorbereitung Potentiale zur aktiven Nutzung mechatronischer Produktkomponenten erkannt, muss zu Beginn der Kommunikationspla-

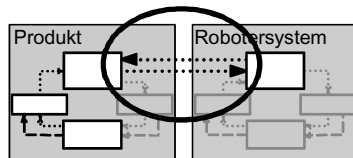
nung die Analyse der Kommunikation durchgeführt werden. Basierend auf der Produktstruktur und den zu nutzenden Produktkomponenten sind nach Kapitel 4.3.2 die entsprechenden allgemeinen Kommunikationskreise zu identifizieren, zu analysieren und auf die Produktstruktur zu übertragen. Dabei muss festgelegt werden, bei welchem Montageschritt welcher Kommunikationskreis zum Einsatz kommt.

Von den identifizierten Kommunikationskreisen werden diejenigen Kommunikationsflüsse bestimmt, welche über die Systemgrenzen hinaus auftreten und damit einen Austausch zwischen den Teilsystemen bewirken. Diese müssen später durch die Schnittstelle gewährleistet werden. Dabei sind Art, Richtung und unmittelbar beteiligte Komponenten festzulegen. Die Art kann nach Kapitel 4.3.2 ein Informationsfluss oder ein Energiefluss sein. Die Richtung ist entweder von Robotersystem zu Produkt oder von Produkt zu Robotersystem. Als unmittelbar beteiligt sind die Komponenten der beiden Teilsysteme zu verstehen, welche den Fluss nach außen übermitteln bzw. empfangen.

### 1. Notwendige Kommunikationskreise ermitteln



### 2. Kommunikationsflüsse zwischen den Systemen bestimmen



### 3. Funktionsumfang der Schnittstelle ableiten



### 4. Anforderungen an die Schnittstelle detaillieren

Abbildung 6-3: Kommunikationsplanung

Sind Kommunikationskreise und systemübergreifende Kommunikationsflüsse bestimmt, muss der Funktionsumfang der Schnittstelle entwickelt werden. Mit Hilfe der in der Planungsvorbereitung durchgeführten Prozess- und Produktanalyse und den auftretenden Kommunikationskreisen werden die einzelnen Funktionen, welche die Schnittstelle abdecken muss, erarbeitet. Das Ergebnis ist der funktionale Aufbau der Schnittstelle.

Als letzten Schritt können nun, da Kommunikationsflüsse und funktionaler Aufbau der Schnittstelle bekannt sind, die Anforderungen spezifiziert werden. Als Grundlage dienen die allgemeinen Anforderungen aus Kapitel 5.2, welche auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasst und weiter detailliert werden müssen.

### 6.2.3 Grob- und Feinplanung

In der Grobplanungsphase werden Montageablauf und Montagesystemstruktur entwickelt und ein Konzept des Montagesystems in Form eines Groblayouts aufgestellt. Bei der Entwicklung alternativer Montageabläufe wird der montageorientierte Produktaufbau hinsichtlich seiner logisch zeitlichen Ablaufstruktur dargestellt, um mögliche montagetechnische Freiheitsgrade des Produktes zu erkennen [BULLINGER 1995]. Als Werkzeug wird in der Regel der Montagevorranggraph verwendet. Im Montagevorranggraph wird der Produktaufbau mit Blick auf den zeitlich-logischen Montageablauf erfasst.

Eine sinnvolle Nutzung von Produktkomponenten durch das Montagesystem schränkt die Reihenfolge der Montageprozesse ein. Produktkomponenten oder Produktfunktionen, auf die zurückgegriffen werden soll, müssen in ihrer Funktion zum Zeitpunkt der Nutzung auch bereitstehen. Der Montageablauf muss also dahingehend optimiert sein, dass die Produktkomponenten bereits die Informationen liefern können, die benötigt werden. Dies setzt eine Änderung der Reihenfolge voraus, mit der Bauteile oder Baugruppen montiert werden müssen. Dadurch kann sich der Montageablauf bei einer Nutzung von Produktkomponenten signifikant gegenüber einer herkömmlichen Montage ändern. Davon ist neben den Bauteilen auch die Software des Produktes betroffen. Das Aufspielen der Softwarekomponenten kann als ein Montageschritt betrachtet werden, der in der zeitlichen Abfolge spätestens dann zu erfolgen hat, wenn Softwarefunktionen genutzt werden müssen.

Die Auswertung der Montagevorranggraphen erfolgt hinsichtlich verschiedener, kombinierbarer Kriterien. Ziel ist es, Teilverrichtungen mit gleichartigen Anfor-



derungen zu sinnvollen Einheiten zusammenzufassen. So werden oft Vormontagen oder automatisierte und manuelle Bereiche gebildet. Ziel ist es, möglichst viele der Teilverrichtungen in größere Blöcke zusammenzufassen, um diese z.B. später durch die Einplanung entsprechender Puffer entkoppeln zu können. Zudem lassen sich die so entstehenden Teilsysteme in den folgenden Planungsschritten leichter handhaben

Erfolgt eine Kommunikation zwischen Produkt und Robotersystem, muss der Versuch unternommen werden, unter Berücksichtigung der Vorrangbeziehungen Kommunikationsblöcke zu bilden. In diesen sind die Montageschritte zusammengefasst, welche eine Kontaktierung von Produkt und Robotersystem benötigen. Dies hat zur Folge, dass mehrere Montageschritte durchgeführt werden können, ohne die Kontaktierung lösen zu müssen. Dadurch wird eine Erhöhung der Taktzeit aufgrund mehrmaligen Schließens und Lösens des Kontaktes verhindert. Für jede Kontaktierung an räumlich weit voneinander getrennten Montagestationen muss eine eigene Hardwareschnittstelle auf der Robotersystemseite vorgesehen werden. Eine Zusammenfassung dieser Montageschritte verringert den Aufwand für Planung und Umsetzung.

In der Feinplanung des Montagesystems erfolgt nicht nur die Konkretisierung der Montageabläufe, des Anlagenlayouts, der Betriebsmittel und der Logistik, sondern auch eine weitere Detaillierung des Schnittstellenkonzepts. Es werden die einzelnen Kommunikationsflüsse weiter detailliert und die Hardware-Schnittstelle in ihrer geometrischen Ausprägung festgelegt. Für die Software-Schnittstelle wird die Programmstruktur erarbeitet und die genaue Umsetzung der einzelnen Softwarefunktionen geplant.

### **6.3 Zusammenfassung**

Eine vorgesehene Nutzung mechatronischer Produktkomponenten durch das Robotersystem beeinflusst die Montagesystemplanung. Aus diesem Grund muss die herkömmliche Vorgehensweise erweitert werden.

In der Phase der Planungsvorbereitung muss als Ergänzung das Potential einer Nutzung der Komponenten, welches das zu montierende Produkt bietet, ermittelt werden. Daraus ergeben sich zusätzliche Anforderungen an das Montagesystem.

Vor der Grobplanung wird die Phase der Kommunikationsplanung eingeführt. Hier werden Kommunikationskreise und -flüsse bestimmt, der funktionale Auf-

## **6 Auswirkung auf die Montagesystemplanung**

---

bau der Schnittstelle erarbeitet und anwendungsspezifische Anforderungen an die Schnittstelle abgeleitet.

In der Grobplanung wird vor allem die Ermittlung alternativer Montagevorranggraphen beeinflusst. Es muss sichergestellt werden, dass alle zu nutzenden Komponenten aufgrund ihres Status im Montageablauf auch genutzt werden können. Dies erfordert eine rechtzeitige Montage dieser Bauteile oder -gruppen. Außerdem ist der Montageablauf derart zu gestalten, dass Kommunikationsblöcke entstehen. In diesen Blöcken sind die Prozesse zusammengefasst, die eine Kontaktierung von Produkt mit Robotersystem erfordern.

In der Feinplanungsphase erfolgt die weitere Ausdetaillierung der Schnittstelle.

## 7 Anwendungsbeispiele

### 7.1 Überblick

In den vorangegangenen Kapiteln wurde eine Methode zur Nutzung mechatronischer Produktkomponenten bei der automatisierten Montage entwickelt und deren Potential in möglichen Anwendungsszenarien näher dargestellt. Ebenso wurde eine Kommunikationsschnittstelle zwischen Produkt und Robotersystem entwickelt und eine Hilfestellung zur Umsetzung der Programmierung gegeben. In diesem Kapitel soll nun dieser Ansatz an konkreten Beispielen praktisch umgesetzt werden. Beispielprodukte sind dabei die Montage eines Magnetventils und eine Teilmontage der SpaceMouse®, einem 3D-Steuer- und Eingabegerät. Dabei wird bei den vorgestellten Anwendungsbeispielen immer wieder auf die in Kapitel 4.4 entwickelten theoretischen Szenarien verwiesen.

### 7.2 Montage eines Magnetventils

Die erste Anwendung stellt die Montage eines Magnetventils dar. Dabei handelt es sich um eine Nutzung des Elektromagneten im Magnetventil als Aktor zur Unterstützung des automatisierten Montageprozesses. Da dies lediglich eine Ansteuerung eines Aktors darstellt, ist der Umfang der Softwareschnittstelle so gering, dass sie in diesem Fall nicht näher betrachtet wird.

#### 7.2.1 Aufgabenstellung und Analyse des Montageprozesses

In einer Montageanlage mit manuellen und automatischen Montageprozessen werden Komponenten für eine Gaspumpe montiert. Ein Prozess ist dabei die Montage eines Magnetventils. Diese Montage erfolgt bisher manuell. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wurden Überlegungen angestellt, weitaus mehr Montageprozesse der Pumpenmontage und damit auch die Montage des Magnetventils zu automatisieren.

Das Magnetventil besitzt den in Abbildung 7-1 dargestellten Aufbau. In den Grundkörper wird eine Hülse eingeschoben. In der Hülse befinden sich der Stößel und eine Feder. Durch ein Betätigen des Ventils wird der Stößel entgegen

der Federkraft nach unten gezogen. Beim Öffnen wird er durch die Feder wieder nach oben gedrückt.

Das Problem einer automatisierten Montage ist hier die Tatsache, dass wegen der Ausprägung des Basisbauteiles und aufgrund vorangegangener Montageschritte das Ventil kopfüber in den Grundkörper der Pumpe zu montieren ist. Dies hat zur Folge, dass der Stößel samt Feder und Hülle gegen ein Herausfallen gesichert werden muss, bis sich das Ventil im Pumpengehäuse befindet.

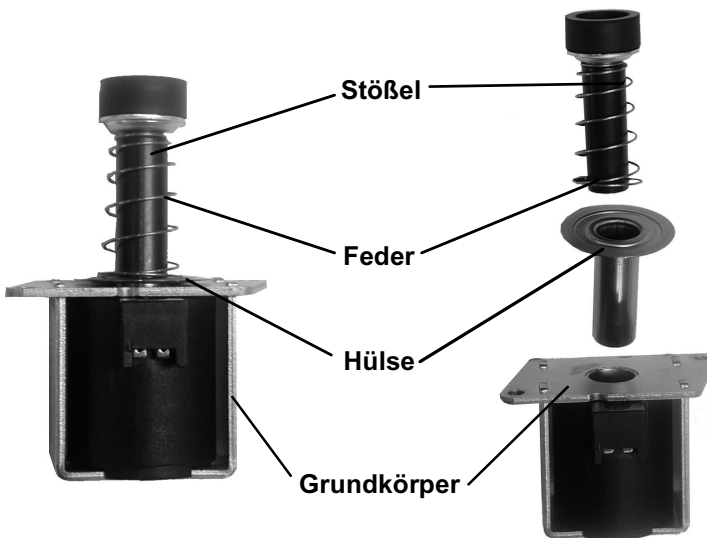


Abbildung 7-1: Produktaufbau des Magnetventils

### 7.2.2 Umsetzung des Montagekonzeptes

Die Aufgabenstellung und Analyse des Montageprozesses zeigen eine Möglichkeit zur Umsetzung der in dieser Arbeit entwickelten Vorgehensweise. Zur Automatisierung des Montagevorganges wurde ein Roboterwerkzeug entwickelt, welches dem Robotersystem ermöglicht, das Ventil vor der Montage anzusteuern und damit zu schließen. Dadurch wird ein Herausfallen des Stößels verhindert.

Das Robotersystem greift das Ventil mit den eingelegten Komponenten Hülse, Feder und Stößel an den Seitenflächen. Anschließend werden, durch zwei im

Greifer integrierte und durch einen Zylinder bewegliche Kontakte, die Anschlüsse des Ventils kontaktiert. Somit ist die Kopplung zwischen Robotersystem und Produkt bzw. Bauteil hergestellt. Anhand eines offenen Kommunikationskreises nach Abbildung 4-11 wird das Ventil vor der eigentlichen Montage angesteuert und somit geschlossen. Die Komponenten sind vor dem Herausfallen gesichert. Nach der erfolgten Montage wird die Kontaktierung wieder gelöst und das Ventil freigegeben.

Diese Umsetzung erlaubt auch eine Erweiterung ähnlich der Funktionsprüfung eines Pneumatikventils nach WÜNSCHE [1993] (siehe Kapitel 2.3.4.2). So ist es möglich, die Anzugströme des Ventils bei Ansteuerung auszuwerten. Durch einen Vergleich mit dem Sollverlauf kann ein ordnungsgemäßes Schließen des Ventils überprüft werden. Damit ist gewährleistet, dass alle Bauteile vorhanden sind, dass das Ventil vor dem Wenden durch den Roboter geschlossen ist und dass die Komponenten gegen Herausfallen gesichert sind.

### 7.2.3 Bewertung

Das Ziel eines Automatisierungskonzeptes ist es in der Regel, die Produktionskosten zu senken. Das kann durch eine Steigerung der Produktivität und durch eine Verbesserung der Produkt- und Montagequalität erfolgen. Allerdings haben Automatisierungsanlagen im Gegensatz zu manuellen Montagezellen ein wesentlich höheres Investitionsvolumen. Vor allem die fixen Kosten schlagen hier zu Buche. Aus diesem Grunde ist eine Entscheidung, ob eine Automatisierung wirtschaftlich sinnvoll ist, von vielen Faktoren abhängig, welche in dieser Arbeit nicht alle betrachtet wurden. Weiterhin lassen sich oft so genannte „weiche“ Investitionskriterien wie Flexibilität oder Montagequalität nur schwer monetär beziffern. Das vorgestellte Konzept wird daher zunächst anhand technischer Faktoren bezüglich der Erfüllung der Anforderungen bewertet. Die wirtschaftliche Bewertung wird durchgeführt, indem für den untersuchten Prozess die momentanen Personalkosten den Kosten für eine Automatisierung gegenübergestellt werden.

#### 7.2.3.1 Technologische Bewertung

Die Montage des Magnetventils ist aufgrund der notwendigen Bauteilsicherung mit konventionellen Mitteln nur schwer zu automatisieren. Hauptanforderung an die zu entwickelnde automatisierte Montagestation war daher eine einfach

## 7 Anwendungsbeispiele

---

umzusetzende Sicherung der Ventileinzelteile gegen Herausfallen während des Montageprozesses. Durch das Ansprechen des im Magnetventil integrierten Elektromagneten ist es möglich, das Ventil während des Montageprozesses zu schließen. Damit ist es gelungen, die notwendige Bauteilsicherung ohne großen Aufwand zu realisieren.

Zusätzlich dazu müssen Prüfprozesse zur Überprüfung der Anwesenheit aller Bauteile und zum korrekten Verschluss des Ventils vor der Montage integriert werden. Dies kann mittels zusätzlicher Sensorik umgesetzt werden. Jedoch bietet die Nutzung des Produktaktors eine weitere Möglichkeit. Ähnlich wie bei der von WÜNSCHE [1993] beschriebenen Prüfung eines Pneumatikventils, kann eine zusätzliche Sensorik zur Prüfung des Ventils entfallen. Durch ein Auswerten der Anzugströme können die geforderten Prüfprozesse sehr einfach umgesetzt werden.

Durch das Zurückgreifen des Robotersystems auf den Produktaktor konnte hier eine kostengünstige Lösung geschaffen werden, das Magnetventil ordnungsgemäß automatisiert zu montieren. Dies schafft neben der Rationalisierung auch die Möglichkeit einer Einbindung der Ventilmontage in einen umfassenden automatisierten Montageablauf.

### 7.2.3.2 Wirtschaftliche Bewertung

Der betrachtete Montageprozess umfasst das Entnehmen der Ventileinheit aus einem Bereitstellungsbehälter, das Einsetzen in das Basisbauteil und das Fixieren des Ventilkörpers mit zwei Schrauben.

Montagezeit	15 s/Stk.	Personalkosten	45.000 €/a
Arbeitszeit pro Jahr	220 d	Kosten für Produktionsmittel	1.000 €/a
Arbeitszeit pro Tag	7,5 h	sonstige Kosten (Energie, Miete etc.)	1.000 €/a
Anzahl Montageumfänge pro Jahr	396.000 Stk/a	Gesamtkosten	47.000 €/a

Stückkosten ergeben sich damit zu 0,12 €/Stk

Abbildung 7-2: Kosten der manuellen Montage pro Mitarbeiter

### 7.3 Automatisierte Montage der SpaceMouse®

---

Die in Abbildung 7-2 dargestellten Werte basieren auf Informationen des Herstellers.

Dem gegenüber gestellt werden nun die Kosten der automatisierten Montage.

Roboter mit Steuerung und Gestell	€	50.000
Greifer	€	1.000
<u>Schraubeinheit</u>	€	<u>10.000</u>
<i>Gesamt</i>	€	61.000

Die Berechnung des Maschinenstundensatzes der Anlage erfolgt nach VDI 3258A [1962] und VDI 3258B [1964]. Dabei wird angenommen, dass die automatisierte Anlage lediglich die betrachteten Montageumfänge durchführt.

Mit einer Nutzungsdauer von 6 Jahren, einer Einsatzzeit von 1650h/a, einer Anlagenverfügbarkeit von 90%, einem kalkulatorischen Zinssatz von 6,5%, angenommenen Energiekosten von 0,37€/a und angenommenen Instandhaltungskosten von 0,5 €/h ergibt sich für die entwickelte Anlage ein Maschinenstundensatz von 9,06 €/h. Zusammen mit angenommenen anteiligen Bedienerkosten von 33% der Personalkosten eines Mitarbeiters ergibt sich ein Arbeitsstundensatz von 18,06 €/h. Bei einer Montagezeit von 12 s/Stk. ergeben sich daraus eine Jahresstückzahl von 495.000 Stück/a und somit Stückkosten von 0,06 €/Stk. Bei einer Vollausslastung der Anlage.

Legt man die Stückkosten der manuellen Montage von 0,12 €/Stk. zugrunde, so lässt sich eine Grenzstückzahl von 247.500 Stk./a ermitteln, ab der eine Automatisierung unter den gegebenen Voraussetzungen wirtschaftlich ist.

### 7.3 Automatisierte Montage der SpaceMouse®

Ein weiteres Beispiel einer Nutzung mechatronischer Produktkomponenten im Montageprozess ist die Automatisierung verschiedener Prozesse bei der Montage der SpaceMouse®. Im Folgenden wird zunächst die SpaceMouse® und ihre Funktionsweise vorgestellt. Anschließend erfolgen die Klärung der Montageaufgabe und die Beschreibung der umgesetzten Montageprozesse. Aufgrund der Besonderheit der informationstechnischen Kopplung zwischen Produkt und Robotersystem während der Montage wird am Ende detailliert auf die entwickelte Kommunikationsschnittstelle eingegangen.

## 7 Anwendungsbeispiele

Die SpaceMouse® ist ein Gerät zur 3D-Manipulation von graphischen oder realen Objekten in allen sechs Raumfreiheitsgraden. Sie wird in den Varianten SpaceMouse® Classic, SpaceMouse® Plus, CadMan® und ErgoCommander® hergestellt (Abbildung 7-3). Jede Variante besitzt dabei die gleiche Funktionsweise und als zentrales Element das Elektronikmodul. Die Art der Variante wird hauptsächlich durch das Produktdesign, durch die Anzahl und Lage der Funktionstasten und durch Zusatzfunktionen der SpaceMouse® Software bestimmt.



Abbildung 7-3: Varianten der SpaceMouse® (Fotos: 3Dconnexion)

Der grundsätzliche Aufbau der SpaceMouse® wird anhand der Variante Classic beschrieben (Abbildung 7-4). Er unterscheidet sich von den anderen Varianten jedoch nicht wesentlich. In das Grundgehäuse ist die Tastaturplatte mit Tasta-



### 7.3 Automatisierte Montage der SpaceMouse®

turmatte eingeschraubt. Die innere Stahlplatte mit Zugentlastung und die äußere Stahlplatte mit fünf Gummifüßchen werden mit dem Gehäuse und dem Elektronikmodul mit drei Schrauben verbunden. Am Elektronikmodul sind über ein Kabel die Tastaturplatine und das serielle Anschlusskabel befestigt. Die Steuerkappe ist auf das Elektronikmodul aufgeklebt.

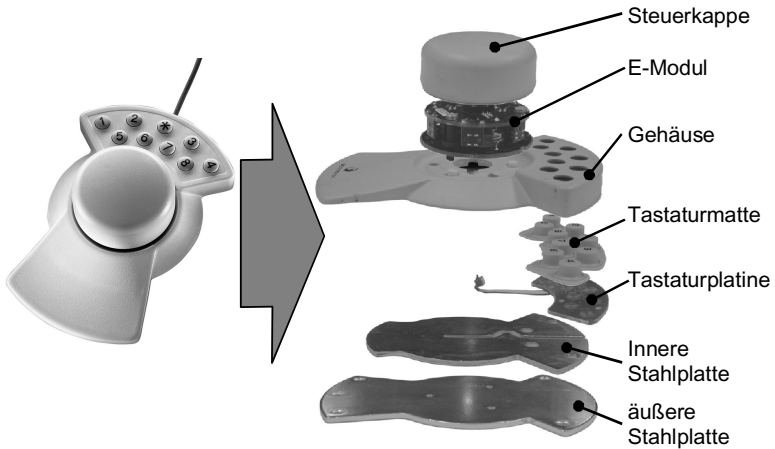


Abbildung 7-4: Produktstruktur der SpaceMouse®

Das Elektronikmodul stellt das Herzstück der SpaceMouse® dar. Es besteht aus einem fest mit dem Gehäuse der SpaceMouse® verbundenen Grundgehäuse und einem daran mit Federn beweglich aufgehängten Blendenring (Abbildung 7-5).

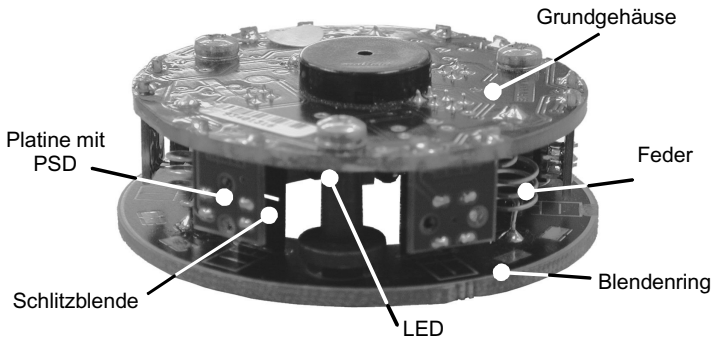


Abbildung 7-5: Elektronikmodul der SpaceMouse®

## 7 Anwendungsbeispiele

Die Funktion beruht dabei auf 6 opto-elektronischen Messsystemen, die um  $60^\circ$  versetzt und alternierend um  $90^\circ$  gedreht in dem Elektronikmodul angeordnet sind.

Das Messsystem besitzt eine Licht emittierende Diode (LED), die einen Lichtkegel auf einen eindimensionalen Positionsdetektor (PSD) sendet. Dazwischen befindet sich innerhalb des Lichtkegels die beweglich angebrachte Schlitzblende (Abbildung 7-6).

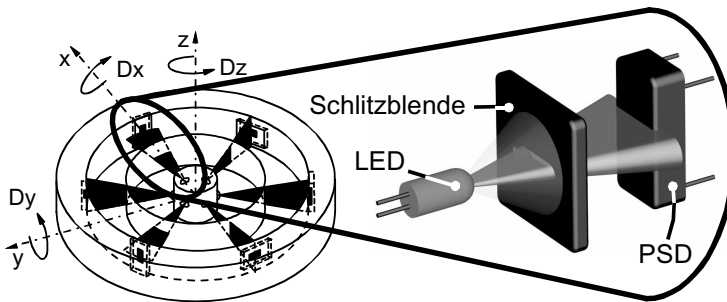


Abbildung 7-6: Funktionsprinzip des Messsystems

Der PSD ist gegenüber der Blende exakt justiert. Beim Bewegen der SpaceMouse® werden die Schlitzblenden ausgelenkt und die Lichtstreifen wandern horizontal oder vertikal auf den jeweiligen PSDs. Die PSDs erkennen die Lage der Lichtstreifen auf ihren Oberflächen. In einem integrierten Einprozessor-Chip wird daraus die Auslenkung der SpaceMouse® in allen sechs Raumfreiheitsgraden bestimmt und über eine serielle Schnittstelle an das angeschlossene System weitergegeben.

Weitere Beschreibungen von Anwendung, Funktionsweise und Aufbau der SpaceMouse® sind in der Literatur zu finden, z.B. STETTER [2000], HIRZINGER & GOMBERT [1995], HIRZINGER & GOMBERT [1999], oder HIRZINGER [2000A].

### 7.3.1 Aufgabenstellung

Aufgrund der Variantenvielfalt und der Komplexität der Aufgabe erfolgt die Montage der SpaceMouse® bisher weitgehend manuell. Lediglich einige selbst

entworfene Montagehilfsmittel unterstützen den Werker bei seiner Arbeit. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und der Montagequalität soll die SpaceMouse® Montage zum Teil automatisiert durchgeführt werden. Jedoch gilt es, dafür einige Anforderungen zu erfüllen (Abbildung 7-7).

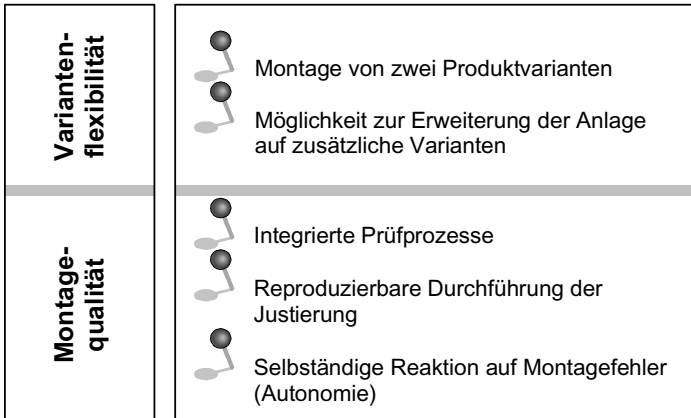


Abbildung 7-7: Anforderungen an die Automatisierung der SpaceMouse® Montage

Ein Kriterium der zu entwickelnden Montageanlage ist die Variantenflexibilität. Um eine möglichst wirtschaftliche Auslastung der Anlage zu gewährleisten, sollen mehrere Varianten der SpaceMouse® automatisiert montiert werden können. Dabei ist darauf zu achten, dass es bei einem Variantenwechsel zu keinen oder nur sehr geringen Rüstzeiten kommt, da durch die auftragsbezogene Fertigung die Losgrößen oft sehr klein sind. Zunächst sind aufgrund der hohen Stückzahlen die Varianten Classic und Plus für eine Automatisierung von Interesse. Jedoch soll die Anlage zu einem späteren Zeitpunkt um zusätzliche Varianten erweitert werden können.

Ein weiteres Kriterium ist die Montagequalität. Ein Verkaufsmerkmal der SpaceMouse® ist die sehr niedrige Anzahl an Rückläufern, die durch Produktionsfehler begründet sind. Die Qualität der SpaceMouse® wird in erster Linie durch die korrekte Funktionalität des Elektronikmoduls und der Tastatur bestimmt. Die PSDs müssen sowohl als Einzelbaustein als auch im Zusammenspiel miteinander und mit der Mechanik der SpaceMouse® ebenso funktionieren wie

die einzelnen Tasten. Dies beinhaltet eine korrekte Montage von Tastaturmatte, Platine, Steckverbindungen und PSDs, eine exakte Justierung der Messsysteme auf die geforderten Sollwerte, eine korrekte Montage der Steuerkappe und das Erreichen vorgegebener Sensorwerte bei maximaler Auslenkung der Maus nach der Montage und Justierung aller Komponenten. Erforderlich sind mehrere Kontroll- und Prüfprozesse bereits während der Montage und die Möglichkeit, mit dem Robotersystem zu reagieren. Ebenso beeinflusst wird die Montagequalität durch eine reproduzierbare Durchführung des schwierig zu automatisierenden Justierprozesses. Schließlich muss das Robotersystem einen gewissen Grad an Autonomie besitzen, um die Verfügbarkeit hoch zu halten und um auf auftretende Montagefehler bei den komplexen Prozessen umgehend reagieren zu können. Das ist notwendig, da die Anlage ein Teil einer Montagelinie ist und somit die Gesamtverfügbarkeit der Linie stark beeinflusst.

### 7.3.2 Analyse der Montageprozesse

Zunächst sollen die Montageprozesse analysiert werden. Ziel der Analyse ist es, einzelne Montageprozesse zu identifizieren, die durch eine Nutzung der Produktkomponenten automatisiert werden können. Abbildung 7-8 zeigt die analysierten Prozesse in zeitlicher Reihenfolge.

Nach einer Vormontage von Tastaturmatte und Tastaturplatine in das Gehäuse erfolgt zunächst eine klassische Montage der Gehäusebaugruppe mit Elektronikmodul, Kabel und Stahlplatten. Ab diesem Zeitpunkt sind die mechatronischen Komponenten, die Maussoftware und die PSD-Sensoren funktionell in die SpaceMouse® integriert.

Nach einer Funktionsprüfung des Elektronikmoduls und der Tastatur erfolgt in einem weiteren Schritt die Justierung der einzelnen Messsysteme. Die korrekte Ausrichtung der Positionsdetektoren gegenüber den Schlitzblenden wird durch einen Biegevorgang erreicht. Durch ein Bewegen des auf eine Platine aufgelöteten PSDs verbiegen sich dessen Kontaktfüßchen und seine Lage wird nachhaltig geändert. Dies ist aufgrund der Fertigungs- und Montagetoleranzen in vorangegangenen Arbeitsschritten notwendig. Zur Kontrolle der Funktion von Elektronikmodul und Tasten und zur genauen Einstellung der PSD-Lagen gibt ein mit der SpaceMouse® verbundener PC die einzelnen PSD-Werte über eine spezielle Software am Bildschirm aus. Die Sollwerte der einzelnen Messsysteme können sich dabei sowohl innerhalb eines Elektronikmoduls als auch von Variante zu Variante der SpaceMouse® unterscheiden. Nach der Justierung ist ein weiterer

Funktionstest notwendig. Da Hardwareanschläge die Bewegung des Blendenrings begrenzen, ist es aufgrund vorgelagerter Montagefehler trotz korrekt justierter Positionsdetektoren nicht gewährleistet, dass der gesamte Messbereich der PSDs genutzt werden kann.

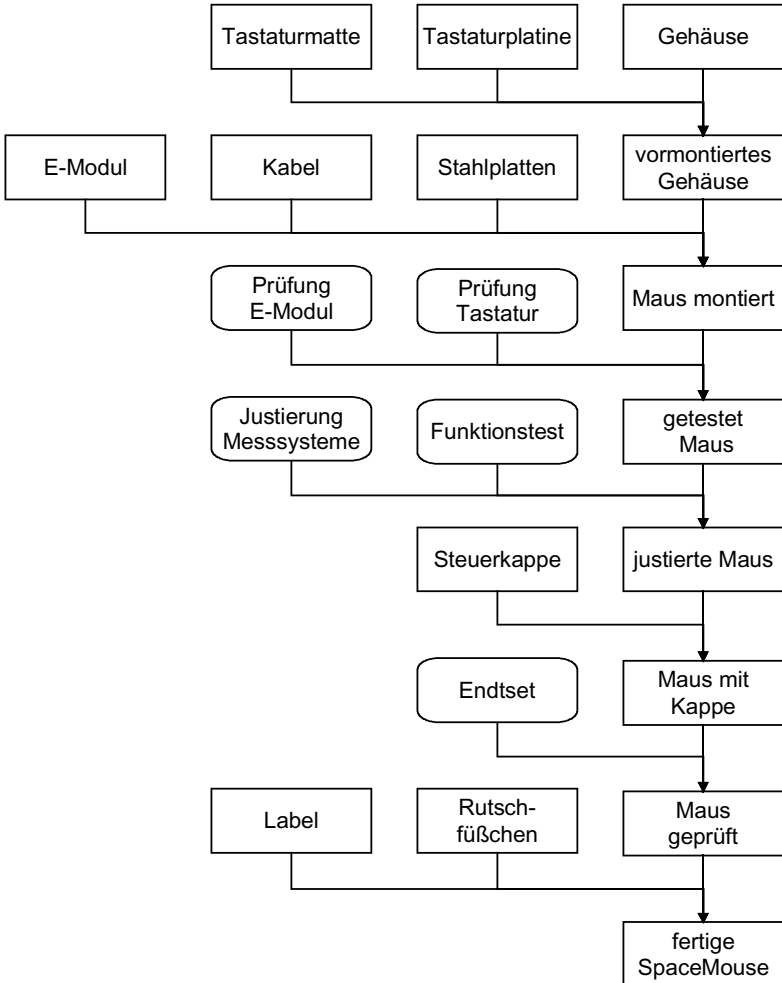


Abbildung 7-8: Untersuchte Prozesse der SpaceMouse® Montage

## 7 Anwendungsbeispiele

Anschließend wird die Steuerkappe auf das Elektronikmodul aufgepresst und verklebt. Nach dem Aushärten des Klebers findet ein letzter Test der gesamten Produktfunktionalität statt. Daraufhin werden das Label mit der Seriennummer sowie die Rutschfüßchen aufgeklebt und das Prüfprotokoll der Seriennummer zugeordnet.

Dieser Montageablauf unterscheidet sich bei den einzelnen Varianten in den Sollwerten der Messsysteme und in Anzahl und Ausprägung der zu montierenden Bauteile, der durchzuführenden Funktionstests und damit der Roboterbewegungen.

### 7.3.3 Umsetzung der Automatisierung

Anhand der aufgezeigten Problemstellung und der Analyse des Montageablaufes ergeben sich hier einige Ansatzpunkte zur Umsetzung der in dieser Arbeit entwickelten Vorgehensweise, die in der SpaceMouse® integrierten PSDs und Softwarekomponenten für den Montageprozess zu nutzen (Abbildung 7-9).

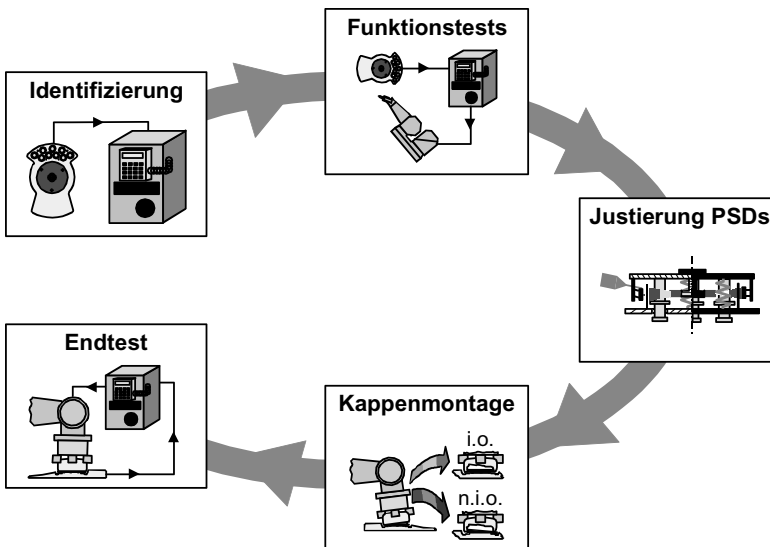


Abbildung 7-9: Ablauf der automatisierten SpaceMouse® Montage

Die Software der SpaceMouse® stellt hier zum einen die Übertragung der Sensorwerte an die Robotersteuerung und der Steuerbefehle des Roboters an die SpaceMouse® sicher. Zum anderen wird sie zur Variantenidentifizierung genutzt. Die Schritte der Funktionsprüfungen, der Justierung, der Kappenmontage und des Endtestes bedingen den Einsatz von Sensoren zur montagenahen Qualitätssicherung. Diese Prozessschritte eignen sich damit zur Nutzung der Produktsensorik besonders. Die Produktsensoren werden vom Roboter verwendet, um während der Montage Informationen über Funktionalität von Komponenten und Produkt und über relevante Produktzustände zu bekommen. Dadurch ist der Roboter in der Lage, auf Qualitäts- und Montagefehler unmittelbar zu reagieren. Weiterhin werden die Roboterbewegungen bei der Justierung der PSDs und beim Qualitätstest aktiv mit Hilfe des Produktes geregelt. Aus diesem Grund wurde der in Abbildung 7-9 dargestellte Teil des gesamten Montageablaufes zur praktischen Umsetzung gewählt. Mögliche vor- und nachgelagerte Montageschritte benötigen keine informationstechnische Kopplung von Produkt und Robotersystem und sollen demnach nicht näher betrachtet werden.

Zur Automatisierung von ausgewählten Montageprozessen der SpaceMouse® wurde eine Roboterzelle entwickelt (Abbildung 7-10).

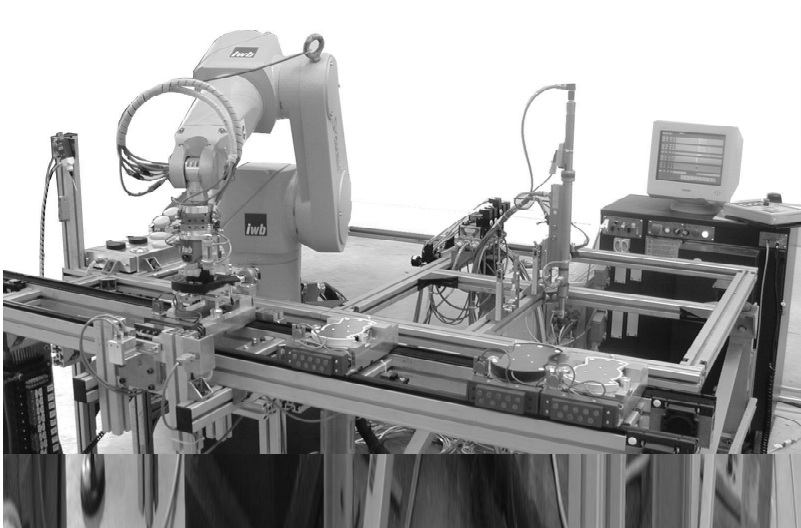


Abbildung 7-10: Roboterzelle zur automatisierten Montage der SpaceMouse®

Um eine möglichst große Flexibilität der Anlage zu gewährleisten, müssen die zum Einsatz kommenden Werkzeuge weitgehend variantenneutral konzipiert und prozessflexibel sein. Die Verwendung von mehreren, für jeweils eine Aufgabe konzipierten Werkzeugen ist sehr kostenintensiv und die dafür notwendigen Werkzeugwechsel erhöhen die unproduktiven Nebenzeiten entscheidend [SEEGRÄBER 1993]. Daher wurde ein Greifer entwickelt, der für alle vier oben aufgeführten Montageprozesse verwendet werden kann. Hierbei wurde nicht nur auf die unterschiedlichen Montageprozesse, sondern auch auf die unterschiedlichen Varianten Rücksicht genommen. Dies stellt zwar eine notwendige Voraussetzung für den Betrieb der entwickelten Montageanlage dar, jedoch ist die Art der Werkzeuge unabhängig von dem vorgestellten Ansatz einer Nutzung mechatronischer Produktkomponenten im Montageprozess. Daher soll auf das Werkzeug nicht genauer eingegangen werden.

Nun werden zur besseren Darstellung einer Nutzung mechatronischer Produktkomponenten zur Unterstützung der SpaceMouse® Montage die Prozesse näher beschrieben, welche auf Software und Sensoren des Produktes zurückgreifen.

Die betrachtete Ausgangssituation ist ein mit Gehäuse und Bodenplatten verschraubtes und mit dem seriellen Anschlusskabel verbundenes Elektronikmodul. Die in Kapitel 4.3.3.1 aufgeführten Anforderungen an das zu montierende Produkt sind erfüllt. Sensoren und Software sind in das E-Modul integriert und funktionsfähig und die Kommunikationsfähigkeit ist durch das Anschlusskabel und das Funktionieren der Sensoren und der dazugehörigen Software gewährleistet. Aus montagetechnischen Gründen befindet sich die SpaceMouse® in ihrer momentanen Form mit der Bodenplatte nach oben in einem Werkstückträger. Das Anschlusskabel ist in den Werkstückträger eingesteckt.

### 7.3.3.1 Kontaktierung und Identifizierung

Als ersten Schritt gilt es, eine informationstechnische Kopplung zwischen Robotersteuerung und SpaceMouse® herzustellen. Dazu wird die SpaceMouse® mit der Robotersteuerung durch das Aktivieren der Hardwareschnittstelle physikalisch verbunden. Die in der Robotersteuerung implementierte Software-Schnittstelle kann nun die Kommunikation zwischen der SpaceMouse® und dem Robotersystem starten.

Durch die vorhandene Verbindung identifiziert sich zunächst die zu montierende SpaceMouse® bei der Robotersteuerung selbst. Auf bestimmte Steuerbefehle der



Robotersteuerung hin übermittelt die Produktsoftware variantenspezifische Daten. Dies stellt eine eigenständige Nutzung der Produktsoftware nach Kapitel 4.4.3 dar. Als Hauptinformation übermittelt die SpaceMouse® hier neben der Versionsnummer die Art der Variante, anhand der die folgenden Montageprozesse zugewiesen und die variantenspezifischen Programme in die Robotersteuerung geladen werden. Es wird ein Kommunikationskreis aus einem reinen Informationsfluss zwischen den Softwarebausteinen der SpaceMouse® und der Robotersteuerung nach Abbildung 4-6 aufgebaut. Versionsnummer und Variante werden in einem Reportfile dokumentiert, welches der im Montageprozess befindlichen SpaceMouse® zugewiesenen ist. In diesem können alle für eine Dokumentation relevanten Daten hinterlegt werden.

### 7.3.3.2 Funktionsprüfung von PSDs und Tastatur

Die ersten eigentlichen Montageprozesse sind Funktionsprüfungen (siehe Kapitel 4.4.1.1). Zuerst werden die bis jetzt noch nicht justierten PSDs bzw. die kompletten Messsysteme geprüft. Dabei werden von der Robotersteuerung die aktuellen Einzelwerte der sechs PSDs über die Schnittstelle abgefragt. Liegen diese Werte außerhalb bestimmter Grenzen, so kann auf ein nicht ordnungsgemäß funktionierendes Messsystem „LED-Schlitzblende-PSD“ geschlossen und die SpaceMouse® aus der Linie ausgeschleust werden. Die Einzelwerte der PSDs werden wiederum im Reportfile abgespeichert.

Neben den Messsystemen wird auch die ordnungsgemäße Funktion der in vorgelegerten Prozessen montierten Tastatur überprüft. Der Tastaturtest erfolgt mittels Drückens der einzelnen Tasten durch den Roboter und eines gleichzeitigen Abfragens der daraus resultierenden Signale der jeweiligen Drucksensoren der einzelnen Tasten. Durch einen Soll-Ist-Vergleich der übertragenen Signale kann auf die Funktionalität der einzelnen Tasten geschlossen werden. Das Testergebnis wird im Reportfile abgelegt. Bei Misserfolg der Prüfung wird die SpaceMouse® aus der Linie ausgeschleust. Anhand der im Reportfile hinterlegten Dokumentation des Tests können nicht funktionierende Tasten identifiziert werden.

Da in beiden vorangegangenen Funktionsprüfungen die Robotersteuerung über die Produktsoftware auf Produktsensoren (PSD und Drucksensor Taste) zurückgreift, um Informationen für eine Entscheidung (PSD bzw. Taste i.O. oder n.i.O.) zu bekommen, ist der Kommunikationskreis durch einen Kreisfluss zwischen den Softwarekomponenten der beiden Teilsysteme unter Einbeziehen von Produktsensorsignalen, wie in Abbildung 4-7 dargestellt, beschrieben.

### 7.3.3.3 Justierung der PSDs und Funktionstest

Der Hauptprozess ist die Justierung der einzelnen PSDs. Diese erfolgt durch das Verändern der Position des PSDs gegenüber dem Rest des Messsystems, analog zu der in Kapitel 7.3.2 beschriebenen Vorgehensweise. Dazu wird auch hier jeder PSD durch eine am Roboter angebrachte Justiernadel in Richtung der notwendigen Positionsänderung gebogen, bis der Lichtstreifen auf der PSD-Oberfläche seine Sollposition erreicht hat und somit der PSD den Sollwert zurückmeldet (Abbildung 7-11). Dabei werden die Sensorwerte direkt über die Schnittstelle der Robotersteuerung eingelesen und dort verarbeitet.

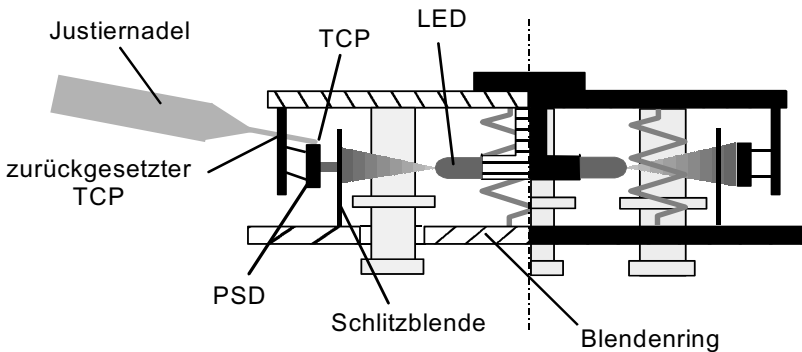


Abbildung 7-11: Biegevorgang zur PSD-Justierung

Aufgrund von Fertigungs- und Montagetoleranzen bei den Einzelkomponenten der Messsysteme zueinander kann, trotz der vorhandenen Information über die Anfangswerte der einzelnen PSDs, deren absolute Lage nicht genau genug bestimmt werden, um diese Information für den Justiervorgang nutzen zu können. Daher muss der Weg der Roboterbewegung von einem festen Startpunkt aus immer komplett durchschritten werden. Die relative Änderung der Lage des Sensors und damit des PSD-Wertes bleibt bei einem vorgegebenen Biegeweg jedoch annähernd konstant. Im vorliegenden Fall wurde pro Grad Roboterdrehung eine Erhöhung bzw. Verringerung des PSD-Wertes um etwa sechs Einheiten ermittelt. Das bedeutet auch, dass der Montageprozess die Sensorwerte der SpaceMouse® beeinflusst. Dies stellt nach Kapitel 4.3.3.2 eine wesentliche Anforderung an die Nutzung der Produktsensorik zur Unterstützung des Montageprozesses dar.

Um die Justierung möglichst schnell bei ausreichender Genauigkeit durchführen zu können, wird zuerst eine Grobpositionierung und anschließend eine Feinpositionierung durchgeführt. Dabei werden die PSDs als Produktsensoren genutzt um die Bewegung des Roboters zu regeln (siehe Kapitel 4.4.1.2). Als Führungsgröße dient der Sollwert, auf den der jeweilige PSD justiert werden muss. Abbildung 7-12 zeigt den Ablauf der Justierung in einem Blockdiagramm.

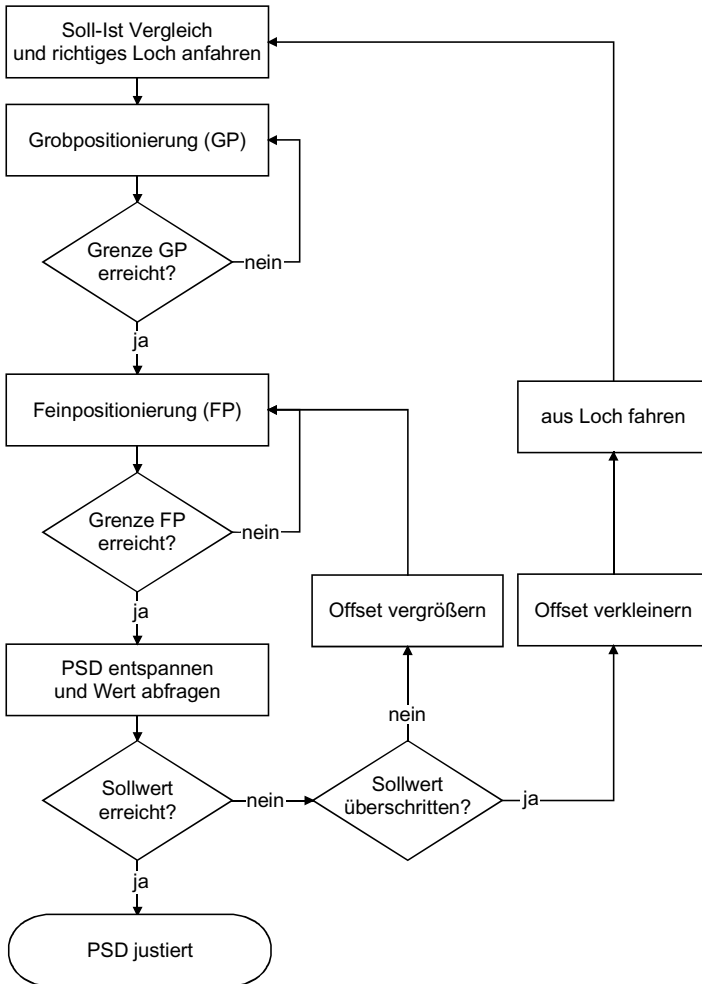


Abbildung 7-12: Blockdiagramm der PSD-Justierung

Zu Beginn wird von der Robotersteuerung der aktuelle PSD-Wert abgefragt und mit dem vorgegebenen Sollwert des PSDs in justiertem Zustand verglichen. Anhand des Vorzeichens der Differenz von Soll- und Istwert wird von der Steuerung des Roboters die Entscheidung getroffen, in welche Richtung der PSD gebogen werden muss. Diese Information ist wichtig, da sich bei unterschiedlichen Biegerichtungen der Arbeitspunkt des Roboters an unterschiedlichen Seiten des Sensors befinden muss.

Nach dem Positionieren der Justiernadel wird der Tool-Center-Point (TCP) des Roboters von der Nadelspitze um etwa 5mm zurückgesetzt. Somit ist es möglich, über eine Drehbewegung des Roboters um den TCP per Hebelwirkung die Lage des Sensors zu verändern (Abbildung 7-11).

Aufgrund der Elastizität der Kontaktfüßchen federt der PSD etwas gegen die Biegerichtung zurück. Da beim Justieren lediglich die plastische Verformung von Interesse ist, muss der elastische Teil der Verformung herausgerechnet werden. Aus diesem Grund wird ein Offset eingeführt, welcher sich jenseits des Sollwertes befindet. Er deckt den elastischen Bereich des Biegevorganges ab. Der Offset bildet sich zum einen aus Erfahrungswerten vorangegangener Justierprozesse und zum anderen aus dem elastisch-plastischen Verhalten des aktuell zu justierenden PSDs. Er beträgt zirka 12 Einheiten, kann sich von PSD zu PSD unterscheiden und ist zu Beginn des Regelkreises nur ungefähr bekannt. Dies ist für eine Grobpositionierung jedoch ausreichend. Der Offset wird auf die Führungsgröße aufgeschlagen und bildet mit ihr die Biegegrenze. Die Differenz aus Biegegrenze und Istwert geht als Regeldifferenz in den Regelkreis ein.

Für die zuerst stattfindende *Grobpositionierung* bildet sich das Regelgesetz wie folgt:

$$\text{Grad der Roboterbewegung} = (1/6)^\circ * (\text{Führungsgröße} + \text{Offset})$$

Um ein Überbiegen bereits bei der Grobpositionierung zu verhindern, wird die Führungsgröße um fünf Einheiten verringert. Der Regelkreis der Grobpositionierung wird somit durchlaufen, bis sich der Istwert des PSDs bis auf mindestens fünf Einheiten an die Biegegrenze angenähert hat.

Der notwendige Offset hat dabei den Vorteil, dass selbst bei einem nahe dem Sollwert gelegenen Istwert des PSDs die durchgeführte Bewegung bei der Grobpositionierung immer noch größer als zwei Grad ist, ehe der neue Istwert zurückgeführt wird. Dies erhöht die Biegegeschwindigkeit.

Anschließend erfolgt die *Feinpositionierung*. Dabei wird in kleineren Schritten bis an die Biegegrenze heran gebogen. Die Vorgehensweise gegenüber der Grobpositionierung ändert sich nicht.

Außerhalb dieser Positionierung sorgt eine Regelung dafür, dass nach dem Zurückfedern des PSDs der Sollwert auch wirklich erreicht wird. Dazu überprüft die Robotersteuerung nach einer Entspannung des PSDs dessen Wert. Bei einem Nichterreichen des Sollwertes wird der Offset, abhängig vom erreichten PSD-Wert, vergrößert und die Feinpositionierung fortgesetzt. Bei einem Überschreiten des Sollwertes wird der Offset entsprechend verringert, um dies für die Zukunft zu verhindern. Die Justierung macht jedoch eine Richtungsänderung der Biegebewegung notwendig, um das Überbiegen rückgängig zu machen. Dies erfordert einen Lochwechsel und eine erneute Grobpositionierung.

Der aktuelle Istwert, der durch den PSD selbst gemessen wird, bildet mit dem vorgegebenen Sollwert als Führungsgröße die Regeldifferenz. Diese Differenz geht in den Regler ein. Durch ständiges Abfragen des aktuellen PSD-Wertes durch die Robotersystemsteuerung während des Biegevorganges kann der PSD genau auf den Grenzwert positioniert werden.

Weiterhin erfolgt eine ständige Kontrolle, ob der PSD durch den Biegevorgang beschädigt wurde. Ist dies der Fall, ändert sich der Wert des PSDs schlagartig und er nähert sich den maximalen und minimalen Werten an. Durch die Fehlerbehandlungskomponente der Schnittstelle wird dies erkannt und der Roboter bricht den Justiervorgang ab.

Sind alle sechs PSDs erfolgreich justiert worden, wird durch ein Auslenken des Platinenrings und damit aller sechs Messsysteme gleichzeitig die Funktionalität des Zusammenspiels der sechs Messsysteme mit der Produktmechanik geprüft. Um ein qualitativ einwandfreies Produkt zu haben, müssen vorgegebene minimale und maximale Ausschläge der PSD-Werte innerhalb des durch Hardwareanschläge begrenzten Arbeitsraumes erreicht werden können. Dazu wird der bewegliche Platinenring vom Roboter bis zum Erreichen der Hardwareanschläge bewegt und daraufhin die jeweiligen PSD-Werte von der Robotersteuerung abgefragt und abgespeichert. Anhand der gespeicherten sechs Minimal- und sechs Maximalwerte kann überprüft werden, ob die Funktionalität des Elektronikmoduls gegeben ist. Auch hier bedient sich die Robotersteuerung mit Hilfe der Produktsoftware der Informationen von Produktsensoren, um eine Entscheidung zu treffen. Somit ist der Kommunikationskreis durch einen Kreisfluss zwischen

den Softwarekomponenten der beiden Teilsysteme unter Einbeziehen von Produktsensorsignalen nach Abbildung 4-7 beschrieben.

### 7.3.3.4 Montage der Steuerkappe

Nach der vollständigen Justierung des E-Moduls und der Überprüfung der Funktionsfähigkeit muss die Steuerkappe der SpaceMouse® aufgesetzt werden. Um einen sicheren Halt der Kappe in der späteren Anwendung zu gewährleisten, wird die Kappe zum einen aufgedrückt, zum anderen aufgeklebt. Gerade das Aufdrücken durch den Roboter stellt einen Unsicherheitsfaktor dar. Zum Erreichen einer hohen Prozesssicherheit ist es notwendig, den Montageprozess der Steuerkappe zu kontrollieren. Dazu werden erneut die vorhandenen Produktsensoren genutzt.

Die Kappe wird auf den beweglichen Blendenring des E-Moduls aufgedrückt. Dabei beeinflusst der Montageprozess die Sensorwerte der SpaceMouse®. Ist der Montageprozess korrekt durchgeführt worden, befindet sich bei neutraler Kappenstellung der Blendenring in horizontaler Lage (Abbildung 7-13 rechts oben). Die PSDs liefern bei einem Abfragen der Istwerte in etwa die Sollwerte zurück.

Bei einem fehlerhaften Montageprozess hingegen erfolgt bei neutraler Kappenstellung eine Auslenkung des Blendenringes (Abbildung 7-13 rechts unten). Die PSDs liefern bei Abfragen der Istwerte von den Sollwerten stark abweichende Werte zurück. Besonders kennzeichnend ist in diesem Fall der PSD, der zum einen eine vertikale Bewegung messen kann und zum anderen sich in der Nähe der Fehlstelle befindet.

Wird der Prozess als n.i.O. gemeldet, kann entweder die Steuerkappe abgezogen und der Prozess erneut durchgeführt oder die SpaceMouse® unmittelbar aus der Linie ausgeschleust und der Nacharbeit zugeführt werden.

Diese Kommunikation stellt wieder eine Nutzung der Produktsensoren unter Zuhilfenahme der Produktsoftware zur Entscheidungsfindung dar, wie sie in Abbildung 4-7 dargestellt ist.

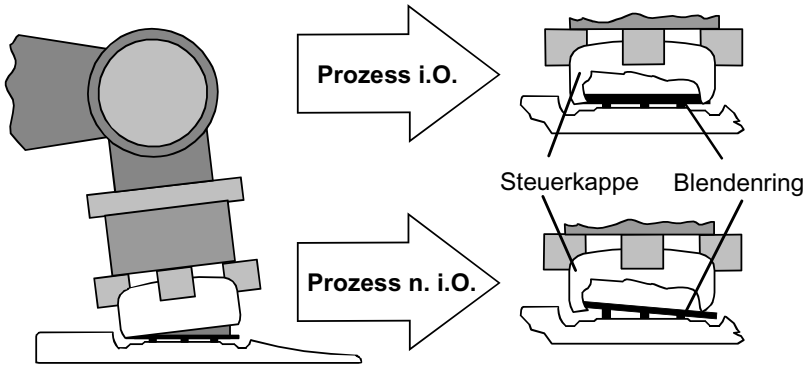


Abbildung 7-13: Prozesskontrolle bei der Montage der Steuerkappe

### 7.3.3.5 Endtest

Nach dem Aushärten des Klebstoffes muss eine abschließende Prüfung der gesamten Produktfunktionalitäten erfolgen. Diese Prüfung umfasst zum einen ein erneutes Testen der Tastatur (siehe Kapitel 7.3.3.2). Zum anderen wird die Navigationsfunktion des Gerätes getestet. Dazu wird die SpaceMouse® an ihrer Steuerkappe vom Roboter der Reihe nach in alle sechs Raumfreiheitsgrade ausgelenkt und zwar in positiver und negativer Richtung. Anhand eines Steuerbefehls erfolgt jeweils die Abfrage der Koordinaten. Diese werden von der Software der SpaceMouse® in einem mausinternen Format gesendet. Innerhalb der Schnittstelle erfolgt das Verarbeiten dieser Daten in die vom Anwendungsprogramm erwarteten Koordinatenwerte.

Die jeweiligen Werte werden abgespeichert und mit den vorgegebenen Sollwerten in der Robotersteuerung verglichen. Somit kann auch hier durch die Nutzung der Produktsensoren nach Abbildung 4-7 eine Entscheidung über die Erfüllung der geforderten Produktfunktionalitäten getroffen werden.

### 7.3.4 Umsetzung der Kommunikationsschnittstelle

Zur automatisierten Herstellung einer informationstechnischen Verbindung zwischen SpaceMouse® und Robotersteuerung wurde eine informationstechnische Schnittstelle geschaffen, welche aus einer Kontaktiereinheit und einer Kommunikationsschnittstelle mit Hardware- und Softwareteil besteht.

Die Schnittstelle muss dem Montageprogramm den Zugriff auf Informationen und benötigte Funktionen der SpaceMouse® ermöglichen. Im Speziellen handelt es sich dabei um das Abfragen der Variante, einzelner PSD-Werte, einzelner Raumkoordinaten sowie das Ermitteln des Zustandes der Tasten. Um diese Anforderungen technisch umzusetzen, muss die Schnittstelle in der Lage sein, eine Verbindung herzustellen und zu lösen.

### 7.3.4.1 Software

Der Softwareteil der Schnittstelle ist nach dem in Abbildung 5-4 dargestellten reduzierten ISORM aufgebaut. Das vom ISORM vorgeschriebene strenge Schichtenmodell wurde jedoch nicht an allen Stellen eingehalten. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und Effizienz wurden Unterprogramme der Schichten, die Aufrufe lediglich an benachbarte Schichten weitergeben, ohne selbst Arbeit zu leisten, ausgespart. Stattdessen wird das entsprechende Unterprogramm konzeptionell allen Schichten zugeordnet, die einen Aufruf dieses Unterprogramms weiterleiten würden.

Im Folgenden wird der funktionale Aufbau der Schnittstelle nach Kapitel 5.3 erklärt.

#### **Ereignis-Komponente**

Um den Montageprozess am Bildschirm verfolgen zu können, wurde eine graphische Monitorausgabe erstellt. Aktualisierungen auf der Oberfläche werden durch Ereignisse (z.B. Änderung eines PSD-Wertes) ausgelöst. Dazu bietet die Oberflächenkomponente für jede Art von Ereignis ein Unterprogramm an (z.B. PSD\_VALUE\_CHANGED), das durch die Schnittstelle innerhalb der Anwendungsschicht aufgerufen wird, sobald das entsprechende Ereignis auftritt.

#### **Fehlerbehandlungs-Komponente**

Die Fehlerbehandlung wurde in dem Anwendungsbeispiel durch die Rückgabe der Variablen SUCCESS in jedem Unterprogramm realisiert. Ein Fehler wird erst dann gemeldet (SUCCESS == FALSE), wenn die entsprechende Schicht trotz einer eigenen Fehlerbehandlung zu keinem Ergebnis kam. Das aufrufende Programm kann daraufhin bei Bedarf entscheiden, wie weiter zu verfahren ist. Das durch das Betriebssystem der Robotersteuerung bereitgestellte Programm IO\_STAT ermöglicht das Erkennen von Kommunikationsfehlern während der Ausführung von Lese- und Schreibfunktionen.



### Server und Datastore

Da die benutzte Robotersteuerung aufgrund der rechenintensiven Bewegungssteuerung die Ausführung zusätzlicher Tasks sehr verlangsamt, konnte keine Serverkomponente umgesetzt werden, die nebenläufig Daten von der SpaceMouse® ausliest und in den Datastore schreibt.

Die Schnittstelle speichert aber bei jedem Auslesen von Werten die erhaltenen Daten in den Datastore ab. Vor allem während des Endtests ist es wichtig, die Maximal- bzw. Minimalwerte einer Reihe von PSD-Werten zu ermitteln. Dazu füllt der Datastore die Variablen `minPSD` und `maxPSD`, die durch einen Reset wieder zurückgesetzt werden können.

Weiterhin wurde eine Report-Komponente implementiert. Diese Report-Komponente ist eine Art passiver Datastore, d.h. die Daten werden nicht vom Robotersystem benötigt, sollen aber aus Dokumentationsgründen behalten und gespeichert werden. Diese Report-Komponente wird von dem Montageprogramm genutzt, um Ereignisse zu dokumentieren.

### Funktions-Komponente

Die Funktionskomponente entspricht der Anwendungsschicht des ISORM. Die einzelnen Funktionen der SpaceMouse® wurden hinsichtlich ihrer Notwendigkeit für die Montage überprüft und ggf. der Steuerung durch ein eigenes Unterprogramm zugänglich gemacht. Diese Unterprogramme setzen auf die Darstellungsschicht auf und können in zwei Kategorien eingeteilt werden:

- Unterprogramme, die nur Daten an die SpaceMouse® senden, sowie
- Unterprogramme, die Daten anfordern und empfangen.

### Device-Komponente

Die Device-Komponente beinhaltet die Darstellungs-, Sicherungs- und Bitübertragungsschicht des ISORM.

Die *Darstellungsschicht* bietet zum einen eine Funktionalität zum Übersetzen von Sendebefehlen in für die SpaceMouse® verständliche Werte. So muss hier dem Steuerbefehl noch ein Zeilenumbruch „/n“ angehängt werden, da die SpaceMouse® diesen erwartet, ehe sie den Befehl ausführt. Zum anderen bietet sie eine Funktionalität zum Übersetzen der von der SpaceMouse® gesendeten Daten in physikalische Größen für die Anwendungsschicht. Sie wird für jede Art

von möglichen Werten („string“, „PSD-Wert“, „Raumkoordinaten“, „Tasten“) durch je ein Unterprogramm umgesetzt.

In der *Sicherungsschicht* prüfen Unterprogramme, ob die Antworten der SpaceMouse® vollständig sind und sorgen dafür, dass sie identifiziert werden können. Eine Antwort der SpaceMouse® besteht aus mehreren Zeichen. Sie sendet als erstes Zeichen immer den entsprechenden Steuerbefehl und als letztes Zeichen einen Zeilenumbruch. Somit kann die Antwort identifiziert und darauf reagiert werden.

Die *Bitübertragungsschicht* besteht aus Programmen zum Aktivieren der Schnittstelle, zum Freigeben der Schnittstelle für das nächste Produkt und zum Schreiben und Lesen von Daten. Die Programme zum Schreiben und Lesen werden dabei vom Betriebssystem des Roboters zur Verfügung gestellt und mussten somit nicht eigens umgesetzt werden.

### 7.3.4.2 Hardware

Ebenso zur Bitübertragungsschicht gehört der Hardwareteil der Schnittstelle. Dieser besteht aus einer Kontaktiereinheit und einem Verbindungskabel von der Kontaktiereinheit zur Robotersteuerung. Aufgabe der Kontaktiereinheit ist es, die materielle Verbindung zwischen der SpaceMouse® und der Robotersteuerung nach Bedarf automatisiert und prozesssicher herzustellen und zu lösen. Dazu ist auf jedem Werkstückträger eine Kontaktbox angebracht. In diese Box wird der neunpolige SUB-D-Stecker der SpaceMouse® während der vorgelagerten manuellen Montagevorgänge eingesteckt. Die Kontakte werden innerhalb der Box auf eine Kontaktplatte durchgeschleift. Zur Kontaktierung mit der Robotersteuerung wird eine fest in der Zelle angebrachte Gegenplatte mittels eines pneumatischen Linearzylinders auf die Kontaktplatte gedrückt. Um eine prozesssichere Verbindung zu gewährleisten, sind die Kontaktpins der Gegenplatte mit Federn in Anpressrichtung beweglich gelagert. Die Gegenplatte ist durch ein Kabel mit der RS 232 Schnittstelle der Robotersteuerung verbunden. Abbildung 7-14 zeigt den Aufbau der Kontaktiereinheit.

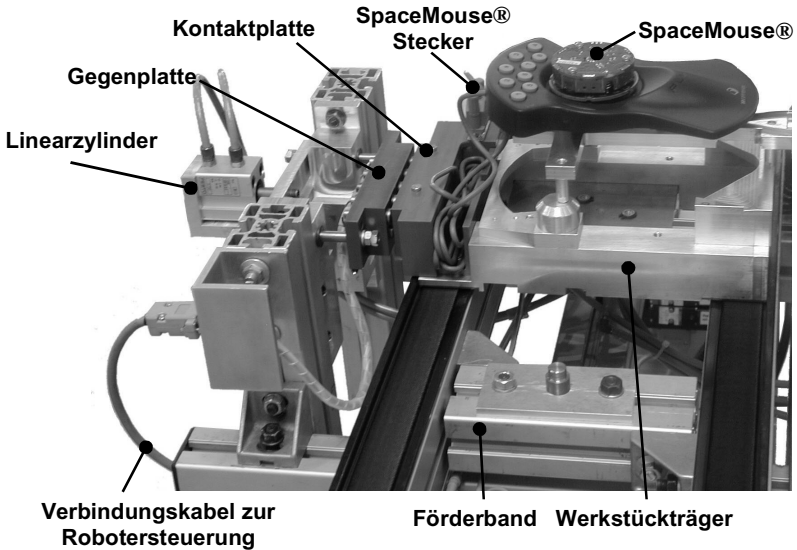


Abbildung 7-14: Kontaktiereinheit SpaceMouse® Montage

### 7.3.5 Bewertung des Systems

#### 7.3.5.1 Technologische Bewertung

Als Grundlage der technologischen Bewertung dienen die in Kapitel 7.3.1 aufgestellten Anforderungen an die zu entwickelnde Montageanlage. Vorteile, die sich aus der grundsätzlichen Automatisierung von manuellen Montageprozessen ergeben, werden hier außer Acht gelassen. Lediglich die Vorteile des vorgestellten Ansatzes gegenüber einer herkömmlichen Automatisierung werden aufgeführt.

#### Variantenflexibilität

Durch die Selbstidentifizierung der SpaceMouse® wurde erreicht, dass mehrere Varianten in beliebiger Reihenfolge montiert werden können. Ein Hochladen variantenabhängiger Unterprogramme und das Mitbringen der für den Montageprozess notwendigen produktspezifischen Peripherie durch die Produkte unterstützen dies. Die Variantenflexibilität verringert entscheidend die Stillstandszeiten der Anlage durch Umrüstvorgänge auf verschiedene Varianten und führt zu

einer besseren Auslastung der Anlage. Diese Strategie erlaubt auch eine einfache und schnelle Erhöhung der montierbaren Variantenzahl. Abgesehen von den Werkzeugen, die für jede Variante entsprechend konstruktiv angepasst werden müssen, ist es bei der entwickelten Anlage unerheblich, welche und wie viele Varianten montiert werden.

### **Integrierte Prüfprozesse**

Durch den ständigen Kontakt von Produkt und Robotersystem ist dieses zu jeder Zeit des Montageprozesses über die einzelnen Produktzustände und Produktfunktionalitäten informiert. Dadurch können vom Robotersystem alle wesentlichen Prüfschritte unmittelbar durchgeführt und daraufhin entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden. Als Folge davon können separate Prüfstationen entfallen. Auch ein Mitschleppen von Montagefehlern, die erst bei einer Endprüfung erkannt werden, wird verhindert.

### **Reproduzierbare Durchführung der Justierung**

Gerade die Justierung ist aufgrund der fehlenden Zugänglichkeit zu den benötigten Informationen aus dem Produktinneren nicht zu automatisieren. Durch die Nutzung der PSDs für den Montageprozess konnte jedoch eine Automatisierung realisiert werden. Der Justiervorgang konnte mit der erforderlichen Genauigkeit von  $\pm 0,06\text{mm}$  durchgeführt werden. Dies entspricht einer Justierung auf  $\pm 1$  Einheit des PSD-Wertes. Weiterhin konnten durch eine Automatisierung Justierfehler verringert werden. Vor allem bei Elektronikmodulen, die bei jedem PSD einen anderen Sollwert benötigen, ist bei manueller Montage ein großes Fehlerpotential gegeben. Ebenso wurde die Möglichkeit der Eingliederung der komplexen Justierung in eine Gesamtautomatisierung erreicht.

### **Autonomie**

Durch die Möglichkeit der Überprüfung der Produktfunktionalitäten und des Montageprozesses der Steuerkappe sowie der ordnungsgemäßen Justierung gelingt es dem System, selbständig auf Störungen zu reagieren, die sich aus dem Montageprozess ergeben. Auch die Flexibilität gegenüber Varianten schafft hier eine gewisse Autonomie.

### **Aufwand**

Diesen Vorteilen steht der Aufwand zur Schaffung der informationstechnischen Kopplung gegenüber. Das betrifft sowohl die Hardware als auch die Programmierung der Softwareschnittstelle. Der Aufwand kann, wie bereits beschrieben,

durch einen möglichst produktneutralen Aufbau zumindest für Folgeprodukte reduziert werden. Auch die Realisierung der Überlegung, den vorhandenen Maustreiber als Kern der Schnittstelle zu verwenden, könnte hier Abhilfe schaffen. Voraussetzung ist jedoch, dass das Betriebssystem der Robotersteuerung den Treiber ausführen kann.

### 7.3.5.2 Wirtschaftliche Bewertung

Für die wirtschaftliche Bewertung einer automatisierten Anlage müssen entweder die Stückkosten bekannt sein, die mit ihr erzielt werden sollen, oder es muss ein Szenario existieren, mit dem sie verglichen werden kann. Das Vergleichsszenario kann dabei eine manuelle, teil- oder vollautomatisierte Anlage darstellen, welche den gleichen Montageumfang bewältigt. Im Falle der SpaceMouse® wird die manuelle Montage herangezogen, da es mit konventionellen Methoden nicht möglich ist, die Montage zu automatisieren. Gegenstand der Wirtschaftlichkeitsanalyse sind die folgenden Montageprozesse:

- Funktionsprüfung des E-Moduls und der Tastatur
- Justierung der Messsysteme mit anschließendem Funktionstest
- Montage der Steuerkappe
- Endtest

#### Manuelle Montage

Bei der derzeit realisierten manuellen Montage der SpaceMouse® ist keine der Montagestationen ständig besetzt. Die anfallenden Arbeiten werden flexibel zwischen den Mitarbeitern aufgeteilt und nach Bedarf erledigt. Die Stationen sind nicht streng getaktet, parallele Arbeiten an einer SpaceMouse® finden nicht statt. Somit können die Einzelzeiten der Stationen zu einer Montagedauer zusammengerechnet werden, ohne Taktverluste berücksichtigen zu müssen. Jedoch hat diese Arbeitsorganisation große Zeitverluste zur Folge, die sich in einem schlechten Wirkungsgrad niederschlagen. Dieser wurde bei der Analyse mit 70% bestimmt. Bei einer Arbeitszeit von 7,5 Stunden pro Tag und 220 Arbeitstagen im Jahr ergibt sich daraus eine Arbeitskapazität pro Mitarbeiter von

$$7,5 \frac{h}{d} \cdot 3600 \frac{s}{h} \cdot 220 \frac{d}{a} \cdot 0,7 = 4.158.000 \frac{s}{a}$$

## 7 Anwendungsbeispiele

---

Bei der SpaceMouse® haben sich die folgenden Montageprozesszeiten ergeben:

Funktionsprüfung E-Modul und Tastatur	10 s
Justierung Messsysteme mit Funktionstest	54,1 s
Montage der Steuerkappe	8,7 s
<u>Endtest</u>	<u>55,5 s</u>
<i>Summe</i>	128,3 s

Die Nebenzeiten für Transport, Störungen und Arbeitsvorbereitung sind durch Zuschlagsfaktoren berücksichtigt, die aus der Analyse der bestehenden Montage abgeleitet wurden:

Montagezeit	128,3s
Transportzeiten (5%)	6,4 s
Störzeiten (5%)	6,4 s
<u>Vorbereitungszeiten (10%)</u>	<u>12,8 s</u>
<i>Gesamtzeit</i>	153,9 s

Mit der errechneten Kapazität eines Mitarbeiters kann der untersuchte Montageablauf 27017,5-mal pro Jahr bearbeitet werden. Es wird davon ausgegangen, dass Versorgungsgengpässe durch rechtzeitige Produktion der benötigten Baugruppen vermieden werden. Bei angenommenen Kosten von 45.000 € pro Jahr und Mitarbeiter ergeben sich 1,67 € an Personalkosten für einen Montageablauf.

Dazu werden die Kosten für die Produktionsfaktoren wie Akkuschrauber, Montagewerkzeuge oder Energie addiert. Raumkosten werden nicht berücksichtigt, da für die manuelle und die automatisierte Montage vom gleichen Platzbedarf ausgegangen wird. Die Produktionsfaktoren sind hauptsächlich an die produzierte Stückzahl gekoppelt. Es wird daher davon ausgegangen, dass sich ihre Kosten proportional zur Montagezeit verhalten. Diese werden mit 2% der Personalkosten angesetzt. Somit ergeben sich die Kosten für einen Montageablauf zu 1,70 €/Stk.

### **Automatisierte Montage**

Der hohe Anteil der Personalkosten an den Produktionskosten und die großen Zeitverluste bei der manuellen Montage deuten darauf hin, dass eine technische Optimierung durch Teilautomatisierung der Fertigungsanlagen wirtschaftliches Potential bietet. Eine Automatisierung ist jedoch mit hohen Fixkosten und niedrigen variablen Kosten verbunden. Aus diesem Grund ist eine Wirtschaftlichkeit einer Anlage erst ab einer gewissen Stückzahl gegeben. Basierend auf den

### 7.3 Automatisierte Montage der SpaceMouse®

Kosten der manuellen Montage von 1,70 €/Stk. soll nun die Stückzahl errechnet werden, ab der sich ein Einsatz der automatisierten Anlage lohnt. Für die realisierte Montageanlage werden folgende Kosten zugrunde gelegt:

Roboter mit Steuerung und Gestell	€	64.000
Greifer mit Greiferwechselsystem	€	2.500
Kontaktiereinheit	€	1.000
Werkstückträger	€	4.000
Bauteilmagazine	€	1.500
Klebstoffdispenser	€	7.000
<i>Gesamt</i>	€	80.000

Zur Berechnung des Maschinenstundensatzes der Anlage werden auch hier wieder die Richtlinien VDI 3258A [1962] und VDI 3258B [1964] herangezogen. Die Nutzungsdauer  $N_D$  wurde vom Hersteller der SpaceMouse® auf sechs Jahre festgesetzt. Dabei beträgt die Einsatzzeit  $E_Z$  1650 h/a. Die Verfügbarkeit  $V$  der Anlage wird mit 90% bemessen. Die kalkulatorischen Abschreibungen ergeben sich damit zu:

$$K_A = \frac{Invest}{N_D \cdot E_Z \cdot V} = 8,98 \text{ €/h}$$

Der kalkulatorische Zinssatz  $Z$  beträgt 6,5%. Die kalkulatorischen Zinskosten betragen damit:

$$K_Z = \frac{Invest \cdot Z}{2 \cdot 100 \cdot E_Z \cdot V} = 1,75 \text{ €/h}$$

Da sich der Roboter nicht ständig unter Volllast bewegt, gehen die Energiekosten mit 80% der Maximalleistung  $P_N$  von 3,7kW zu einem Kostensatz  $K_{St}$  von 0,10 €/kWh ein.

$$K_E = P_N \cdot K_{St} \cdot 0,8 = 0,3 \text{ €/h}$$

Die Instandhaltungskosten  $K_I$  berechnen sich mit 7% der kalkulatorischen Abschreibungen zu 0,63 €/h. Somit ergibt sich für die entwickelte Anlage folgender Maschinenstundensatz:

$$K_{MH} = K_A + K_Z + K_E + K_I = 11,66 \text{ €/h}$$

## 7 Anwendungsbeispiele

---

Für die Bedienung der Anlage werden 33% eines Arbeiters veranschlagt. Die anteiligen Bedienerkosten  $K_B$  berechnen sich damit zu 9,00 €/h. Addiert man diese zum Maschinenstundensatz, so ergibt sich folgender Arbeitsstundensatz:

$$K_{AH} = K_{MH} + K_B = 20,66 \text{ €/h}$$

Um wirtschaftlich zu arbeiten, müssen die Stückkosten der manuellen Montage  $K_{StM}$  von 1,70 €/Stk. erreicht bzw. unterboten werden. Mit dem errechneten Arbeitsstundensatz ergibt sich daraus eine Mindeststückzahl von:

$$\frac{K_{AH} \cdot E_Z}{K_{StM}} = 20053 \text{ Stk./a}$$

Die Untersuchung der entwickelten Anlage hat ergeben, dass die durchschnittliche Durchlaufzeit der zu Grunde liegenden Montageprozesse 205 Sekunden beträgt. Das bedeutet, dass unter der Voraussetzung einer vollen Auslastung der Anlage bei der angenommenen Verfügbarkeit  $V$  von 90 %

$$\frac{E_Z \cdot V \cdot 3600 \frac{s}{h}}{205 \frac{s}{Stk.}} = 26078 \text{ Stk./a}$$

produziert werden können. Dies hat Stückkosten von 1,31 € zur Folge.

### Abschließender Vergleich

Die Berechnung zeigt, dass ab einer Produktionsmenge von 20053 Stk./a die entwickelte automatisierte Anlage gegenüber der manuellen Montage wirtschaftlich ist. Bei einer Vollausslastung der Montagezelle können die Montagekosten für die untersuchten Prozesse um etwa 23% gesenkt werden. In diese Berechnung ist dabei die Reduzierung der Nebenzeiten in den vor- und nachgelagerten manuellen Bereichen noch nicht enthalten. Diese kommt zustande, da durch die Integration einer automatisierten Montageanlage in die manuelle Montagelinie die Taktzeit fest vorgegeben wird. Auch eine mögliche Verringerung der Montagefehler vor allem im Bereich der Justierung findet hier noch keine Berücksichtigung.



### 8 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die zunehmende Individualisierung der Märkte sind Unternehmen gezwungen, auf spezielle Kundenwünsche stärker einzugehen und ihre Montage zu rationalisieren. Ein wirksames Mittel für die Rationalisierung ist eine Automatisierung. Die Individualisierung wird durch das Einbringen der Mechatronik in die Produkte erreicht. Damit können zwar die Kundenanforderungen erfüllt werden, jedoch wirken eine hohe Variantenvielfalt, steigende Qualitätsanforderungen und komplexe Produktstrukturen den Automatisierungsbemühungen entgegen. Doch die Mechatronik eröffnet hier nicht nur neue Möglichkeiten zur Generierung und Erweiterung von Produktfunktionalitäten, sondern bietet auch Chancen für eine effiziente und wirtschaftliche Automatisierung der Montage. Diese Chancen sind jedoch mit einigen Anforderungen verbunden, um mechatronischen Produkten gerecht werden zu können. Vor allem eine hohe Anlagenflexibilität und Montagequalität bei gleichzeitig sinkenden Montagekosten gilt es zu realisieren.

Die veränderten Strukturen von Produkten mit mechatronischen Komponenten erlauben neue Montagestrategien, die speziell darauf abgestimmt sind. Eine Methode ist das Miteinbeziehen von mechatronischen Produktkomponenten in den automatisierten Montageprozess. Dies bietet eine Reihe von Vorteilen, die Effizienz der Montage zu steigern. Trotzdem gibt es bis heute keine Untersuchungen über eine Nutzung aller in einem Produkt vorkommenden Komponenten, die möglicherweise in der Lage sind, einen automatisierten Montageprozess aktiv zu unterstützen. Lediglich die Nutzung sensorischer Eigenschaften von Produktaktoren zu Prüfzwecken wurde wissenschaftlich beleuchtet. Darüber hinaus gibt es keine Untersuchungen, auch in anderen Bereichen der Montage, außer bei der Prüfung, auf Produktkomponenten zurückzugreifen.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, eine Montagestrategie zu entwickeln die es erlaubt, die mechatronischen Produktkomponenten Sensoren, Aktoren und Software in den automatisierten Montageprozess mit einzubeziehen. Ein besonderes Augenmerk lag dabei auf der Automatisierung von Montageprozessen, auf der Steigerung der Anlagenflexibilität und auf der Gewährleistung einer hohen Montagequalität. Dazu wurden Anforderungen an das Gesamtsystem und die Teilsysteme ermittelt, ein theoretisches Konzept erarbeitet und dieses anhand von Anwendungsszenarien praxisnah erläutert. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der hardware- und softwaretechnischen Entwicklung einer Kommunikationsschnitt-

stelle, welche die einwandfreie Kommunikation zwischen Produkt und Robotersystem sicherstellt.

Der vorgestellte Lösungsansatz zur wirtschaftlichen Montage von Produkten mit mechatronischen Komponenten beruht auf einer Verbindung zwischen Produkt und Robotersystem. Erfolgt neben der mechanischen und energetischen zusätzlich eine informationstechnische Kopplung des Produktes mit dem Robotersystem bereits während der Montage, ist eine intelligente Nutzung der im Produkt integrierten Sensoren, Aktoren oder Softwarebausteine zur Unterstützung des Montageprozesses möglich.

Maßgeblich bei dem entwickelten Montagekonzept ist der Aufbau eines Informationsflusses zwischen Produkt und Robotersystem. Da dieser Informationsfluss in beide Richtungen erfolgen kann, entsteht ein Kommunikationskreis zwischen den beiden Teilsystemen Produkt und Robotersystem, der je nach verwendeter Produktkomponente unterschiedliche Ausprägungen hat. Den korrekten Datenaustausch gewährleistet eine Kommunikationsschnittstelle. Oft ist die Nutzung mechatronischer Produktkomponenten für den automatisierten Montageprozess abhängig von Voraussetzungen und Produktstrukturen. Sie müssen geometrisch und funktionell derart in die Produkte integriert sein, dass eine Nutzung dieser Komponenten zur Unterstützung des Montageprozesses möglich ist.

Anhand von theoretischen Anwendungsszenarien wurden die Möglichkeiten und Potentiale einer Nutzung mechatronischer Produktkomponenten bei der automatisierten Montage aufgezeigt. Dabei wurde sowohl auf die Nutzung von Produktsensoren, Produktaktoren und Produktsoftware als auch auf eine kombinierte Nutzung verschiedener Komponenten und auf eine Nutzung bereits existierender Produktfunktionen eingegangen. Die Anwendungspotentiale zeigen, dass sowohl die Flexibilität der Anlage als auch die Montagequalität gesteigert und damit zusätzliche Kostenpotentiale ausgeschöpft werden können. Eine Selbstidentifizierung und das Mitbringen von spezifischer Peripherie durch das Produkt steigern Varianten- und Produktflexibilität. Ebenso können sowohl Umsetzungen von schwer automatisierbaren Montageprozessen als auch in den Montageprozess integrierte Prüf- und Kontrollprozesse einfach und effizient durchgeführt werden. Durch die damit entstehende Autonomie des Systems kann dann auf vorhersehbare oder unvorhersehbare Störungen durch das Robotersystem reagiert werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt der Arbeit war die Entwicklung einer Kommunikationsschnittstelle zwischen Produkt und Robotersystem. Um die Komplexität der Schnittstelle zu ordnen, wurde diese in einen Hardware- und einen Softwareteil untergliedert. Der Hardwareteil ist für den physikalischen Verbindungsauf- und -abbau zuständig. Der Softwareteil stellte sich als weit komplexer dar und besitzt eine Device-Komponente, eine Funktions-Komponente, eine Ereignis-Komponente und eine Fehlerbehandlungs-Komponente. Die Abbildung dieser Funktionen in der Schnittstelle wurde durch eine Orientierung an den notwendigen Schichten des ISO/OSI-Referenzmodells erreicht. Durch die Ableitung von Anforderungen an Aufbau und Programmierung der Schnittstelle und durch eine genaue Beschreibung aller Funktionen und der dafür notwendigen Unterprogramme wurde eine Hilfestellung zur Programmierung einer derartigen Schnittstelle gegeben.

Der vorgestellte Ansatz beeinflusst die Vorgehensweise der Montagesystemplanung. Aus diesem Grund wurden Änderungen dargestellt, welche die herkömmlichen Planungsvorgänge ergänzen. Besonderes Augenmerk lag auf der Einführung der Kommunikationsplanung. In dieser Phase wird die Grundlage für die Kommunikation zwischen Produkt und Robotersystem geschaffen.

Am Ende erfolgte eine Verifizierung des vorgestellten Ansatzes anhand zweier Beispiele. Bei der Montage eines Magnetventils wurde der Aktor Elektromagnet dafür genutzt, die Einzelbauteile vor dem Herausfallen zu sichern und somit eine automatisierte Montage stark zu vereinfachen. Das zweite Beispiel ist die SpaceMouse®, ein Computer-Navigationsgerät. Dabei wurden Produktsensoren zur Funktionsprüfung von Produkt und Bauteilen, zur Kontrolle von Montageprozessen und zur Bewegungsregelung des Roboters benutzt. Die Produktsoftware lieferte Informationen, wie z.B. die Art der Variante. Eine abschließende Bewertung der Beispiele konnte zeigen, dass durch eine aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten die Effizienz vor allem in der automatisierten Montage entscheidend gesteigert werden kann.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Montagestrategie soll als Grundlage für weitere Untersuchungen dienen. Um die Potentiale, die Produkte mit mechatronischen Komponenten für die automatisierte Montage bieten, in ausreichendem Maße nutzen zu können, reicht es nicht aus, sich auf die Kreativität der Montageplaner zu verlassen. Es müssen Methoden und Hilfsmittel entwickelt werden, die Potentiale frühzeitig zu erkennen. Ebenso ist es notwendig, die Voraussetzungen zur effektiven Umsetzung bereits in einer frühen Phase des

Produktentstehungsprozesses zu schaffen. Aus diesem Grund sind Konzepte zu erarbeiten, die Berücksichtigung der Strategie in der Produktentwicklung und Montageplanung zu unterstützen und dort die spätere Realisierung zu erleichtern.

Weitere Forschungs- und Arbeitsaufgaben liegen im Bereich der Kommunikationsschnittstelle. Die Hersteller von Automatisierungskomponenten, insbesondere von Industrierobotern, müssen Möglichkeiten schaffen, die Implementierung der notwendigen Kommunikationsschnittstelle zu erleichtern oder diese sogar umgehen zu können. Ähnliches gilt für die Programmierer der Produkttreiber. Ist eine Kommunikationsschnittstelle für ein Produkt zu schaffen, welches entweder im laufenden Produktionszyklus oder im späteren Einsatz einen Treiber benötigt, kann durch eine gemeinsame Entwicklung von Treiber und Kommunikationsschnittstelle der Aufwand entscheidend gesenkt werden.

## 9 Literaturverzeichnis

ABELE 1984

Abele, E. (Hrsg.): Einsatzmöglichkeiten von flexibel automatisierten Montagesystemen in der industriellen Produktion. Düsseldorf: VDI-Verlag 1984.

ANDREASEN & AHM 1988

Andreasen, M. M.; Ahm, T.: Flexible Assembly Systems. Berlin: Springer 1988.

ASTRA 2003

Astra Datentechnik GmbH 2003: <<http://www.astra-gmbh.de>>

AUSLANDER 1996

Auslander, D. M.: What is Mechatronics?. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 1 (1996) 1, S. 5-9.

BÄRNREUTHER 1992

Bärnreuther, B.: Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen. München: Carl Hanser 1992. (Fertigungstechnik - Erlangen 32)

BARTHELMEß 1987

Barthelmeß, P.: Montagerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozessgestaltung. Berlin: Springer 1987. (*iwb* Forschungsberichte 9)

BENDER 1998

Bender, K.: Software – Technologietreiber für den Maschinenbau. VDMA Maschinenbau-Nachrichten 50 (1998) 9, S. 16-17.

BKM 2003

Bayerisches Kompetenznetzwerk für Mechatronik (BKM) 2003: <<http://www.bayern-mechatronik.de>>

BLANK 1996

Blank, H.-J.: Sensoren am PC. München: Markt & Technik 1996.

BÖNKER & SCHMIDT 2001

Bönker, Th.; Schmidt, G.: Entwicklungstrends in der Handhabungstechnik. VDI-Z 143 (2001) 9, S. 86-89.

## 9 Literaturverzeichnis

---

### BRUSSEL 1996

Brussel van, H. M. J.: Mechatronics – A Powerful Concurrent Engineering Framework. IEEE/ASME Transaction on Mechatronics 1 (1996) 2, S. 127-135.

### BÜTTGENBACH 2001

Büttgenbach, S.: Sensoren, Aktoren, Feldbusse – Komponenten mechatronischer Systeme. In: Mechatronik-Workshop, Düsseldorf. Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.

### BULLINGER 1995

Bullinger, H.-J.: Arbeitsplatzgestaltung - Personalorientierte Gestaltung marktgerechter Arbeitssysteme. Stuttgart: Teubner 1995.

### CHARWAT 1994

Charwat, H. J.: Lexikon der Mensch-Maschine-Kommunikation. München: Oldenbourg 1994.

### LEWANDOWSKI 2003

Lewandowski, W. (Red.): Das Computerlexikon. < <http://www.dascomputerlexikon.de> > 2003.

### DILLMANN & HUCK 1991

Dillmann, R.; Huck, M.: Informationsverarbeitung in der Robotik. Berlin: Springer 1991.

### DIN EN ISO 9000 2000

DIN EN ISO 9000: Qualitätsmanagementsysteme: Grundlagen und Begriffe. Berlin: Beuth 2000.

### DIN ISO 8402 1994

DIN ISO 8402: Qualitätsmanagement und Qualitätssicherung: Begriffe. Berlin: Beuth 1994.

### DIN 8593-0 1985

DIN 8593-0: Fertigungsverfahren Fügen: Einordnung-Unterteilung-Begriffe. Berlin: Beuth 1985.

### DIN 19226-1 1994

DIN 19226-1: Leittechnik; Regelungs- und Steuerungstechnik: Allgemeine Grundbegriffe. Berlin: Beuth 1994.

### DIN 19233 1972

DIN 19233: Automat, Automatisierung, Begriffe. Berlin: Beuth 1972.

DIN 19240 1985

DIN 19240: Messen, Steuern, Regeln – Peripherieschnittstellen elektronischer Steuerungen. Berlin: Beuth 1985.

DIN 44302 1987

DIN 44302: Informationsverarbeitung; Datenübertragung, Datenübermittlung; Begriffe. Berlin: Beuth 1987.

DIN V 66311 1987

DIN V 66311: Industrielle Automation; Sensorschnittstelle für Roboter und Fertigungssysteme: Datenübertragung. Berlin: Beuth 1987.

DIRNDORFER 1993

Dirndorfer, A.: Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage. Berlin: Springer 1993. (*iwb* Forschungsberichte 63)

DUBBEL 1995

Dubbel, H. (Begr.); Beitz, W. (Hrsg.); Küttner, K.-H. (Hrsg.): Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau. 18. Aufl. Berlin: Springer 1995.

EISSFELDT 1991

Eissfeldt, H.: Regelung von Hybridschrittmotoren durch Ausnutzung sensorischer Motoreigenschaften. Dissertation Technische Universität München 1991.

ELBEL 1996

Elbel, T.: Mikrosensorik. Wiesbaden: Vieweg 1996.

EVERSHEIM 1987

Eversheim, W. (Hrsg.): Strategien zur Rationalisierung der Montage – Einzel- und Kleinserienproduktion komplexer Produkte. Düsseldorf: VDI-Verlag 1987.

FELDMANN 1993

Feldmann, K.: Entwicklungslinien flexibler Montagesysteme. In: Auslegung und Betrieb modularer Montagesysteme, Fürth. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993.

FELDMANN & SLAMA 2001

Feldmann, K.; Slama, S.: Highly Flexible Assembly - Scope and Justification. Annals of the CIRP Vol. 50/2 2001, S. 489-498.

## 9 Literaturverzeichnis

---

FELDMANN ET AL. 1999

Feldmann, K.; Müller, B.; Haselmann, T.: Automated Assembly of Lightweight Automotive Components. Annals of the CIRP Vol. 48/1 1999, S. 9-12.

FELDMANN ET AL. 2001

Feldmann, K.; Rottbauer, H.; Göhringer, J.: Rationelle Montagestrukturen mit angepasster Automatisierung im Produktionsverbund. In: Auslegung und Betrieb modularer Montagesysteme, Fürth/Erlangen. Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.

FICHTMÜLLER 1996

Fichtmüller, N.: Rationalisierung durch flexible, hybride Montage. Berlin: Springer 1996. (*iwb* Forschungsberichte 95)

GAIROLA 1985

Gairola, A.: Montage automatisieren durch montagegerechtes Konstruieren. VDI-Z 127 (1985) 11, S. 403-408.

GAUSEMEIER & LÜCKEL 2000

Gausemeier, J.; Lückel, J.: Entwicklungsumgebung Mechatronik. Paderborn: HNI 2000. (HNI-Verlagsschriftenreihe 80)

GREBE 2001

Grebe, S.: Traumwerte für Automatisierung. SPS-Magazin 14 (2001) 8+9, S. 10-12.

GRUNDLER 2001

Grundler, E.: Jobmaschine Factory Automation. VDI-Z 143 (2001) 6, S. 3.

HEIMANN ET AL. 1998

Heimann, B.; Gerth, W.; Popp, K.: Mechatronik - Komponenten, Methoden, Beispiele. Leipzig: Carl Hanser 1998.

HEINZL 1994

Heinzl, J.: Justierung und Funktionsprüfung von Baugruppen in der Montage mit dem Schwerpunkt der Nutzung sensorischer Eigenschaften von Aktoren. In: Ehrlenspiel, K. (Hrsg.): Sonderforschungsbereich 336 - Montageautomatisierung durch Integration von Konstruktion und Planung – Arbeits- und Ergebnisberichte Januar 1992 – Juni 1994. München: Eigenverlag 1994. S. 341-366.

HENSHALL & SHAW 1990

Henshall, J.; Shaw, S.: OSI Explained. New York: Horwood 1990.



HERING ET AL. 1993

Hering, E.; Triemel, J.; Blank, H.-P.: Qualitätssicherung für Ingenieure. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993.

HESSE 1993

Hesse, S.: Montagemaschinen. Würzburg: Vogel 1993.

HESELBACH 1989

Hesselbach, J.: Roboter in flexiblen Montagesystemen. VDI-Z 131 (1989) 8, S. 88-92.

HIRZINGER 1999

Hirzinger, G.: Weltraum-Robotik. Transferpotential auch für terrestrische Systeme. DLR-Nachrichten 31 (1999) 93, S. 50-59.

HIRZINGER 2000A

Hirzinger, G.: Von der Steuerkugel zur SpaceMouse® – Eine europäische Idee kommt aus der Raumfahrt. Oberpfaffenhofen: DLR 2000 (Eigenverlag).

HIRZINGER 2000B

Hirzinger, G.: Weltraum-Robotik. Transferpotential auch für terrestrische Systeme. In: Reinhart, G.; Zäh, M. F. (Hrsg.): Vorlesungsskript zur Ringvorlesung Mechatronik. Technische Universität München 2000.

HIRZINGER & GOMBERT 1995

Hirzinger, G.; Gombert, B.: 3D-Space-Mouse – Neues Eingabegerät für Profi-CAD. F&M Feinwerktechnik&Messtechnik 103 (1995) 1-2.

HIRZINGER & GOMBERT 1999

Hirzinger, G.; Gombert, B.: CAD für Zweihänder. KEM 36 (1999) 3, S. 31-33.

HOLMSTEDT ET AL. 1997

Holmstedt, P.; Martensson, L.; Arnström, A.: Cooperation of Man and Robot Assembly - an Evaluation of an Industrial Flexible Assembly System. Annals of the CIRP Vol. 46/1 1997, S. 11-14.

HSU 1997

Hsu, T.-R.: Mechatronics – An Overview. IEEE Transaction on Components, Packaging and Manufacturing Technology Part C 20 (1997) 1, S. 4-7.

## 9 Literaturverzeichnis

---

ISERMANN 1998

Isermann, R.: Mechatronik – Entwicklungen für Maschinen und Geräte. atp – Automatisierungstechnische Praxis 40 (1998) 6, S. 40-49.

ISERMANN 1999

Isermann, R.: Mechatronische Systeme - Grundlagen. Berlin: Springer 1999.

ISO/IEC 7498 1994

ISO/IEC 7498: Informationstechnik – Kommunikation offener Systeme. Berlin: Beuth 1994.

JANOCHA 1992

Janocha, H. (Hrsg.): Aktoren – Grundlagen und Anwendungen. Berlin: Springer 1992.

JANOCHA 1995

Janocha, H.: Neue Aktoren aus Sicht der Mechatronik. at – Automatisierungstechnik 43 (1995) 12, S. 588-593.

JAUCH 1993

Jauch, T.: Automatisierte Montage nicht formstabiler Bauteile mit Industrierobotern. Dissertation Universität Kaiserslautern 1993. (FBK Produktionstechnische Berichte 6)

KALDE 1987

Kalde, M.: Methodik zur Festlegung der Flexibilität in der Montage. Aachen: RWTH Aachen (Eigenverlag) 1987.

KALJAS & REEDIK 1998

Kaljas, F.; Reedik, V.: On synergistic aspects in integrated product development of mechatronic systems. In: Adolfsson, J.; Karlsén, J. (Hrsg.): Mechatronics 98. Amsterdam: Elsevier Science 1998, S. 513-516.

KALLENBACH ET AL. 1997

Kallenbach, E.; Birli, O.; Saffert, E.; Schäffel, Chr.: Zur Gestaltung integrierter mechatronischer Produkte. In: Mechatronik im Maschinen- und Fahrzeugbau, Moers. Düsseldorf: VDI-Verlag 1997. (VDI Berichte 1315)

KALLENBACH 2001

Kallenbach, E.: Mechatronik - eine Einführung. In: Mechatronik-Workshop, Düsseldorf. Düsseldorf: VDI-Verlag 2001.

**KASPERS & KÜFNER 2002**

Heinrich, B. (Hrsg.): Kaspers/Küfner – Messen, Steuern, Regeln. Wiesbaden: Vieweg 2002.

**KLAPDOR 2000**

Klapdor, W.: Systementwurf – Umsetzung der Marktanforderungen und Unternehmensziele. In: Mechatronik-Workshop, Stuttgart. Düsseldorf: VDI-Verlag 2000.

**KOMISCHKE 1988**

Komischke, M.: Einbindung von Sensorsystemen in den Informationsfluss integrierter Produktionssysteme. Düsseldorf: VDI-Verlag 1988. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 Nr. 162)

**KONOLD & REGER 1997**

Konold, P.; Reger, H.: Angewandte Montagetechnik. Braunschweig: Vieweg 1997.

**KOREN ET AL. 1999**

Koren, Y.; Heisel, U.; Jovane, P.; Moriwaki, T.; Pritschow, G.; Ulsoy, G.; van Brussel, H.: Reconfigurable Manufacturing Systems. Annals of the CIRP Vol. 48/2 1999, S. 527-540.

**KREUZER ET AL. 1994**

Kreuzer, E. J.; Lugtenburg, J.-B.; Meißner, H.-G.; Truckenbrodt, A.: Industrieroboter. Berlin: Springer 1994.

**KUBA ET AL. 1995**

Kuba, R.; Fichtmüller, N., Nagy, G.: Die anpassungsfähige Produktion. Schweizer Maschinenmarkt SMM (1995) 17, S. 74-76.

**KUGLER & WENK 1999**

Kugler, P.; Wenk, M.: Low cost Lasersystem für die Materialbearbeitung von Leichtbauwerkstoffen. In: Geiger, M.; Lenfert, K. (Hrsg.): Innovationen durch Laser Engineering. Berichtsband zum Zwischenkolloquium FORLAS II. Bamberg: Meisenbach 1999. S. 113-133.

**KWON 2001**

Kwon, Y.-U.: Visuell unterstütztes Lageregelungssystem für Industrieroboter. Berlin: IPK 2001. (Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin)

**KYURA & OHO 1996**

Kyura, N.; Oho, H.: Mechatronics - An Industrial Perspective. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 1 (1996) 1, S. 10-15.

## 9 Literaturverzeichnis

---

LINDERMAIER 1998

Lindermaier, R.: Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen. Berlin: Springer 1998. (*iwb* Forschungsberichte 115)

LOTTER 1993

Lotter, B.: Integrierte Qualitätssicherung automatischer Montage. Der Betriebsleiter 34 (1993) 5, S. 66-68.

MILBERG 1987

Milberg, J.: Montage – Rationalisierungspotential der Zukunft. In: 7. Deutscher Montagekongress, München. Landsberg: Moderne Industrie 1987.

MILBERG & SCHMIDT 1990

Milberg, J.; Schmidt, M.: Flexible Assembly Systems – Opportunities and Challenge for Economic Production. Annals of the CIRP Vol. 39/1 1990, S. 5-8.

MÜLLER & SCHWEIZER 1987

Müller, S.; Schweizer, M.: Robotertechnik. Landsberg: Moderne Industrie 1987. (Die Bibliothek der Technik 1).

NEUGEBAUER 1999

Neugebauer, J.: Montage- und Handhabungstechnik – Trends und Zukunftspotentiale. wt Werkstattstechnik 89 (1999) 4, S. 155-158.

PAHL & BEITZ 1997

Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre – Methoden und Anwendungen. 4. Aufl. Berlin: Springer 1997.

PFEIFFER 1989

Pfeiffer, G.: Grenzen der Wirtschaftlichkeit bei der automatisierten Montage. In: Automatisierung der Montage in der Feinwerktechnik und Elektrotechnik, Darmstadt. Düsseldorf: VDI-Verlag 1989. (VDI Berichte 747)

PÖPPEL 1991

Pöppel, J.: Sensor- und Aktoreigenschaften von Bubble-Jet-Heizelementen in Tintenschreibwerken. Dissertation Technische Universität München 1991.

PRODUKTION 2001

N.N.: Roboter kennen keine Konjunktursorgen. In: Produktion, Sonderausgabe Fabrikautomation 2001/02. Landsberg: Moderne Industrie 2001, S. 8-10.

## PRUST 2000

Prust, D.: Autonome Freiformflächenbearbeitung durch sensorische Bewegungsführung von Industrierobotern. Aachen: Shaker 2000. (Berichte aus der Produktionstechnik 33/2000)

## REFA 1990

REFA - Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. (Hrsg.): Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. München: Carl Hanser 1990.

## REINHART 1998

Reinhart, G.: Die Montage – eine Stärke des Standorts. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Montage Management – Lösungen zum Montieren am Standort Deutschland. München: TCW Transfer-Centrum GmbH 1998. (TCW-Report 6)

## REINHART &amp; FICHTMÜLLER 1994

Reinhart, G.; Fichtmüller, N.: Flexible Montagearbeitsplätze erleichtern die Rationalisierung. VDI-Z 136 (1994) 4, S. 105-107.

## REINHART &amp; MILBERG 1998

Reinhart, G., Milberg, J.: Integrierte Gestaltung von Produkt und Montageanlage. In: Lindemann, U. (Hrsg.): Transferbereich 2 - Montageautomatisierung durch Integration von Konstruktion und Planung – Arbeits- und Ergebnisbericht 1996-1997. München: Eigenverlag 1998, S.47-80.

## REINHART &amp; ROSS 2003

Reinhart, G.; Ross, P.: Method for Determining the Economic Level of Automation in an Early Phase of Assembly Planning. Production Engineering Vol. X/1 2003.

## REINHART &amp; SCHNEIDER 1995

Reinhart, G.; Schneider, B.: Montage. In: Kern, W.; Schröder, H.-H.; Weber, J. (Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. Stuttgart: Schäfer-Poeschel 1995, S. 1236-1247.

## REINHART &amp; ZÄH 2002

Reinhart, G.; Zäh, M. F. (Hrsg.): Montagetechnik, Handhabung, Industrieroboter. Vorlesungsskript des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften. Technische Universität München 2002.

## 9 Literaturverzeichnis

---

REINHART ET AL. 1996

Reinhart, G.; Lindemann, U.; Heinzl, J.: Qualitätsmanagement - Ein Kurs für Studium und Praxis. Berlin: Springer 1996.

REINHART ET AL. 1998

Reinhart, G.; Cuiper, R.; Loferer, M.: Die Bedeutung der Montage als letztes Glied in der Auftragsabwicklung. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Montage Management – Lösungen zum Montieren am Standort Deutschland. München: TCW Transfer-Centrum GmbH 1998. (TCW-Report 6)

REINHART ET AL. 1999

Reinhart, G.; Dürrschmidt, S.; Krüger, A.: Stückzahlflexible Montage. In: Reinhart, G. (Hrsg.): 15. Deutscher Montagekongress, München. Landsberg: Moderne Industrie 1999.

REINHART ET AL. 2001

Reinhart, G.; Egermeier, H.; Thieke, S.; Dürrschmidt, S.: Mechatronik. In: Schuh, F. (Hrsg.): Enzyklopädie Naturwissenschaft und Technik. 7. Erg.-Lfg. Landsberg: Moderne Industrie 2001, S. 1-11.

REITER 1996

Reiter, R.: Flexibilisierung von Prüfeinrichtungen in der Montage durch Modularisierung und Baukastensystematik. In: Gens, W. (Hrsg.): 41. wissenschaftliches Kolloquium der TH Ilmenau, Band II. Ilmenau: Eigenverlag 1996, S. 610-615.

REITER 1998

Reiter, R.: Integrierte Gestaltung automatischer Prüfmittel für die flexible Montage. Düsseldorf: VDI-Verlag 1998. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 Nr. 720)

RODDECK 1997

Roddeck, W.: Einführung in die Mechatronik. Stuttgart: Teubner 1997.

RÖHRIG 2002

Röhrig, M.: Variantenbeherrschung mit hochflexiblen Produktionsendstufen. Düsseldorf: VDI-Verlag 2002. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2 Nr. 622)

ROSS 2002

Ross, P.: Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung. München: Herbert Utz 2002. (*iwb* Forschungsberichte 170)

## SCHERNIKAU 2001

Schernikau, J.: Gestaltung von mechatronikgerechten Organisationen in der Produktentwicklung. Aachen: Shaker 2001. (Berichte aus der Produktionstechnik 8/2001)

## SCHILLING 1997

Schilling, R. (Hrsg.): Regelungstechnik – Einführung für Maschineningenieure. Vorlesungsskript des Lehrstuhls und Laboratoriums für hydraulische Maschinen und Anlagen. Technische Universität München 1997.

## SCHLAICH &amp; KAUFMANN 1990

Schlaich, G.; Kaufmann, H.: Roboter für die Montage. Landsberg: Moderne Industrie 1990. (Die Bibliothek der Technik 43)

## SCHMID 1989

Schmid, D.: Sensorführung von Robotern. In: Automatisierung der Montage in der Feinwerktechnik und Elektrotechnik, Darmstadt. Düsseldorf: VDI-Verlag 1989, S. 235-268. (VDI Berichte 747)

## SCHMIDT 1992

Schmidt, M.: Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme. Berlin: Springer 1992. (*iwb* Forschungsberichte 41)

## SCHMITT 2000

Schmitt, R.: Aufbau flexibler Mess- und Prüfstationen für die automatisierte Montage. Aachen: Shaker 2000. (Berichte aus der Produktionstechnik 26/2000)

## SCHNEIDER 1998A

Schneider, B.: Montageautomatisierung – Neue Perspektiven durch kostengünstige Technik. *iwb* newsletter 6 (1998) 1/2, S. 5-6.

## SCHNEIDER 1998B

Schneider, G.: Feuerprobe bestanden – PC-Technologie in der Robotersteuerungstechnik erfolgreich eingeführt. *Elektronik* 47 (1998) 8, S. 82-88.

## SCHRAFT 2001

Schraft, R.-D.: Automatisierung in der Produktion. VDI-Z 143 (2001) 9, S. 4-5.

## SCHRAFT &amp; KAUN 1998

Schraft, R.-D.; Kaun, R.: Automatisierung der Produktion. Berlin: Springer 1998.

## 9 Literaturverzeichnis

---

SCHRAFT & KAUN 1999

Schraft, R.-D.; Kaun, R. (Hrsg.): Automatisierung – Stand der Technik, Defizite und Trends in der Automatisierungstechnik. Düsseldorf: Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Wirtschaftswoche 1999.

SCHÜRMAN 2003

Schürmann, B.: Bussysteme. Folien zur Vorlesung der AG Entwurfsmethodik eingebetteter Systeme. Universität Kaiserslautern 2003.

SCHULLER 1998

Schuller, R. W.: Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen. Berlin: Springer 1998. (*iwb* Forschungsberichte 117)

SCHWEITZER 1989

Schweitzer, G.: Mechatronik - Aufgaben und Lösungen. In: Kontrollierte Bewegungen - Mechatronik im Maschinen- und Fahrzeugbau, Bad Homburg. Düsseldorf: VDI-Verlag 1989. (VDI Berichte 787)

SEEGRÄBER 1993

Seegräber, L.: Greifsysteme für Montage, Handhabung und Industrieroboter. Ehningen b. Böblingen: expert 1993.

SELIGER 1998

Seliger, G.: Montagetechnik und Fabrikbetrieb. ZWF 93 (1998) 10, S. 492-496.

SPATH & BAUMEISTER 2001

Spath, D.; Baumeister, M.: Synchronisation of material flow and assembly in hybrid and modular systems. *Assembly Automation* 21 (2001) 2, S. 152-157.

STETTER 2000

Stetter, R.: Mehr Freiheit für die Kreativität durch 3D-Eingabe. *CAD-CAM Report* 18 (2000) 3, S. 50-53.

SWACZINA 1983

Swaczina, K.: Sensordatenverarbeitung für bahngesteuerte Handhabungsautomaten. München: Carl Hanser 1983. (*Produktionstechnik Berlin* 32)

TOMIZUKA 2000

Tomizuka, M.: Mechatronics: From the 20th to 21st Century. In: 1st IFAC Conference on Mechatronic Systems, Darmstadt. Düsseldorf: VDI-Verlag 2000, S. 1-10.



TRÄNKLER & OBERMEIER 1998

Tränkler, H.-R.; Obermeier, E. (Hrsg.): Sensortechnik – Handbuch für Praxis und Wissenschaft. Berlin: Springer 1998.

VDI/VDE 2174 1970

VDI/VDE 2174: Mechanische Kenngrößen von Stellgeräten für strömende Stoffe. Düsseldorf: VDI-Verlag 1970.

VDI/VDE 2422 1994

VDI/VDE 2422: Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994.

VDI 2221 1993

VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993.

VDI 2860 1990

VDI 2860: Montage und Handhabungstechnik: Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen Symbole. Düsseldorf: VDI-Verlag 1990.

VDI 3258A 1962

VDI 3258-1: Kostenrechnung mit Maschinenstundensätzen: Begriffe, Bezeichnungen, Zusammenhänge. Düsseldorf: VDI-Verlag 1962.

VDI 3258B 1964

VDI 3258-2: Kostenrechnung mit Maschinenstundensätzen - Erläuterungen und Beispiele. Düsseldorf: VDI-Verlag 1964.

VDMA 2003

VDMA - Fachverband Robotik und Automation (Hrsg.): Robotik + Automation - Portrait der Branche 2002/2003. <<http://www.vdma.org/fabrikautomation/>> 2003.

WELLING 1994

Welling, A.: Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge. Berlin: Springer 1994. (*iwb* Forschungsberichte 73)

WENDT 1992

Wendt, A.: Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen. Berlin: Springer 1992. (*iwb* Forschungsberichte 57)

## 9 Literaturverzeichnis

---

WENK 2002

Wenk, M.: Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern. Bamberg: Meisenbach 2002. (Fertigungstechnik - Erlangen 131)

WESTKÄMPER 1998

Westkämper, E.: Montage für die Produkte der Zukunft. In: Reinhart, G. (Hrsg.): 14. Deutscher Montagekongress, München. Landsberg: Moderne Industrie 1998.

WIENDAHL & RÖHRIG 1999

Wiendahl, H.-P., Röhrig, M.: Beschäftigungswirksame Produktionskonzepte – Ein Ansatz für Märkte mit kurzen Produktlebenszyklen, hoher Variantenzahl und starken Volumenschwankungen. In: Reinhart, G. (Hrsg.): 15. Deutscher Montagekongress, München. Landsberg: Moderne Industrie 1999.

WIENDAHL ET AL. 2001

Wiendahl, H.-P.; Lay, G.; Schirrmeister, E.; Röhrig, M.: Zurück zu neuen Ufern. ZWF 96 (2001) 7-8, S. 399-404.

WILLY 1994

Willy, A.: Vorrichtungssysteme für die flexibel automatisierte Montage. Berlin: Springer 1994. (IPA-IAO Forschung und Praxis 191)

WÜNSCHE 1993

Wünsche, T.: Integrierte Qualitätstechnik in der flexibel automatisierten Produkterstellung. Dissertation Technische Universität München 1993.

WÜNSCHE & HEINZL 1993

Wünsche, T.; Heinzl, J.: Rückwirkungen bei Aktoren sensorisch nutzen. F&M Feinwerktechnik & Messtechnik 101 (1993) 5, S. 179-182.

ZELLER & SCHÖNHERR 1993

Zeller, J.; Schönherr, U.: Sensorintegration in moderne Robotersteuerungen. In: Intelligente Steuerung und Regelung von Robotern, Langen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993. (VDI Berichte 1094)

ZHAO 1990

Zhao, W.: Sensorgeführte Industrieroboter zur Bahnverfolgung. München: Carl Hanser 1990. (Produktionstechnik Berlin 79)

## 10 Glossar

Automatisieren	Automatisieren heißt, künstliche Mittel einzusetzen, damit ein Vorgang automatisch abläuft. Bei einer Anlage bedeutet das, sie mit Automaten so auszurüsten, dass sie automatisch arbeitet. Die Automatisierung ist das Ergebnis des Automatisierens [DIN 19233 1972].
Basisbauteil	Das Bauteil, mit dem das Fügebauteil durch einen Fügeprozess verbunden werden soll. Im Allgemeinen dasjenige Bauteil mit der größten Masse oder einer komplizierten Form und/oder das Teil mit der größten Anzahl an Fügestellen [HESSE 1993].
BlueTooth	BlueTooth ist eine Übertragungstechnik, mit der Geräte per Funk Daten austauschen können. Die Reichweite beträgt bis zu 100 Metern [LEWANDOWSKI 2003].
FireWire	Bei FireWire (auch IEEE 1394 oder i-Link genannt) handelt es sich um einen Hochgeschwindigkeitsanschluss für Zusatzkarten oder periphere Geräte. Er ermöglicht eine Datenübertragungsrate von 400 Megabit pro Sekunde [LEWANDOWSKI 2003].
Fügebauteil	Das Bauteil, welches mit einem anderen Bauteil, meist dem Basisbauteil, durch einen Fügeprozess verbunden werden soll.
Fügen	Fügen ist das auf Dauer angelegte Verbinden oder sonstige Zusammenbringen von zwei oder mehr Werkstücken geometrisch bestimmter Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosem Stoff. Dabei wird jeweils der Zusammenhalt örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt [DIN 8593-0 1985].
Handhaben	Handhaben ist das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugskordinatensystem. Es können weitere Bedingungen – wie z.B. Zeit, Menge und Bewegungsbahn – vorgegeben sein [VDI 2860 1990].

Hardware	Als Hardware wird der materielle Teil eines Systems bezeichnet [CHARWAT 1994].
I/O	I/O bezeichnet binäre Ein- und Ausgänge, welche den Steuerungen zu Verfügung stehen, um mit der Außenwelt zu kommunizieren. Werden mehrere I/Os zu einem Ein- bzw. Ausgang zusammengefasst, entsteht ein digitaler, paralleler Ein- bzw. Ausgang.
Montage	Unter Montage werden die Funktionen Fügen, Handhaben, Justieren und Kontrollieren zusammengefasst [DUBBEL 1995]. Aufgabe der Montage ist es, aus Teilen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten an unterschiedlichen Orten mit unterschiedlichen Fertigungsverfahren hergestellt wurden, ein Produkt von höherer Komplexität mit vorgegebener Funktion in einer bestimmten Zeit zusammenzubauen [REINHART & SCHNEIDER 1995].
Montageablauf	Der Montageablauf stellt die zeitliche Abfolge der Montageprozesse dar, die für die Montage einer Baugruppe oder eines Produktes durchgeführt werden müssen.
Montageprozess	Ein Montageprozess bildet sich aus der Kombination von Füge-, Handhabungs-, Justier-, Kontroll- und Sonderfunktionen [REINHART & SCHNEIDER 1995].
Montagesystem	Zu einem Montagesystem zählen alle Einrichtungen, die als Betriebsmittel den Produktionsfortschritt im Sinne der Aufgaben des Montagesystems bewirken. Dies sind beispielsweise Maschinen, Werkzeuge, Vorrichtungen, Mess- und Prüfeinrichtungen [REFA 1990, S. 42].
Multitasking	Multitasking bedeutet, dass es das Betriebssystem erlaubt, mehrere Aufgaben (sog. Tasks) parallel ablaufen zu lassen. Es teilt hierbei die Leistung der CPU in Zeitfenster auf, innerhalb derer die einzelnen Tasks der Reihe nach bearbeitet werden.
Parallele Datenübertragung	Wenn mehrere Daten gleichzeitig über ein Kabel übertragen werden, spricht man von einer parallelen Datenübertragung [LEWANDOWSKI 2003].

Produktlebenszyklus	Der Produktlebenszyklus beschreibt den idealtypischen Absatzverlauf eines Produktes am Markt. Dieser kann in fünf abgrenzbare Phasen eingeteilt werden. In den Phasen Markteinführung, Wachstum, Reifung, Sättigung und Degeneration sind jeweils andere Strategien und Maßnahmen für das Produkt gefordert sowie spezifische Verhaltensweisen der Marktteilnehmer zu erwarten [ROSS 2002].
RS232	RS232 ist eine Leitungskonfiguration für das Senden und Empfangen von Daten durch eine serielle Datenübertragung. Die internationale Norm V.24 legt die entsprechenden funktionalen Eigenschaften und V.28 die entsprechenden elektrischen Eigenschaften fest [LEWANDOWSKI 2003].
Serielle Datenübertragung	Bei einer seriellen Datenübertragung werden die Daten nacheinander übertragen. Serielle Anschlüsse existieren in einer 9-poligen und einer 25-poligen Ausführung [LEWANDOWSKI 2003].
Server	Unter einem Server ist ein Prozess zu verstehen, der einem Anwender spezielle Dienste zur Verfügung stellt.
Signal	Ein Signal ist eine, im Einzelfall ausgewählte, physikalische Größe, die als Träger für Übermittlung, Verarbeitung und Speicherung von Daten dient und für deren Werte bestimmte Bedeutungen vereinbart wurden [CHARWAT 1994].
Software	Als Software werden alle Programme bezeichnet, die in einem System, in der Regel einem Rechner, ablaufen. Sie stellen die immateriellen Teile des Systems dar [CHARWAT 1994].

USB ist die Abkürzung für "Universal Serial **B**us" und stellt einen Computeranschluss dar. USB ist kein BUS-System, sondern bildet eine Sternstruktur mit mehreren Ebenen. Geräte mit USB-Anschluss lassen sich während des Rechnerbetriebes anschließen oder abkoppeln. Die Datenübertragungsrate beträgt derzeit 480 Megabit pro Sekunde [LEWANDOWSKI 2003].

# iwb Forschungsberichte Band 1–121

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 erschienen im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg und sind im Erscheinungsjahr und den folgenden drei Kalenderjahren erhältlich im Buchhandel oder durch Lange & Springer, Otto-Suhr-Allee 26–28, 10585 Berlin

- 1 *Streifinger, E.*  
**Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel**  
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 *Fuchsberger, A.*  
**Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen**  
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 *Maier, C.*  
**Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern**  
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 *Summer, H.*  
**Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen**  
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 *Simon, W.*  
**Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen**  
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 *Büchs, S.*  
**Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung**  
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, I.*  
**Schneiderodierte Oberflächen**  
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 *Pilland, U.*  
**Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen**  
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 *Barthelmeß, P.*  
**Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung**  
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 *Reithofer, N.*  
**Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen**  
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 *Diess, H.*  
**Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse**  
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 *Reinhart, G.*  
**Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze**  
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 *Bürstner, H.*  
**Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion**  
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 *Groha, A.*  
**Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme**  
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 *Riese, K.*  
**Klipsmontage mit Industrierobotern**  
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 *Lutz, P.*  
**Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung**  
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 *Klippel, C.*  
**Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems**  
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 *Rascher, R.*  
**Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelerstellung**  
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 *Heusler, H.-J.*  
**Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme**  
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 *Kirchknopf, P.*  
**Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen**  
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 *Sauerer, Ch.*  
**Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen**  
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 *Karstedt, K.*  
**Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung**  
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 *Peiker, St.*  
**Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems**  
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 *Schugmann, R.*  
**Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage**  
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 *Wirba, P.*  
**Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik**  
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 *Eibelshäuser, P.*  
**Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung**  
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 *Prasch, J.*  
**Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie**  
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 *Teich, K.*  
**Prozefkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion**  
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 *Pfrang, W.*  
**Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze**  
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 *Tauber, A.*  
**Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung**  
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 *Jäger, A.*  
**Systematische Planung komplexer Produktionssysteme**  
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 *Hartberger, H.*  
**Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme**  
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 *Tuczek, H.*  
**Inspektion von Karosseriepreßteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung**  
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 *Fischbacher, J.*  
**Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten**  
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 *Moser, O.*  
**3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen**  
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8
- 36 *Naber, H.*  
**Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente**  
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 *Kupec, Th.*  
**Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen**  
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 *Maulhardt, U.*  
**Dynamisches Verhalten von Kreissägen**  
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 *Götz, R.*  
**Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile**  
1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 *Koepfer, Th.*  
**3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung**  
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 *Schmidt, M.*  
**Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme**  
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 *Burger, C.*  
**Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen**  
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 *Hoßmann, J.*  
**Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen**  
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 *Petry, M.*  
**Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmabkastens für robotergeführte Klebprozesse**  
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 *Schönecker, W.*  
**Integrierte Diagnose in Produktionszellen**  
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 *Bick, W.*  
**Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades**  
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 *Gebauer, L.*  
**Prozefuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen**  
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 *Schrüfer, N.*  
**Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung**  
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wissbacher, J.*  
**Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen**  
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Garnich, F.*  
**Laserbearbeitung mit Robotern**  
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*  
**Digitale Zustandsregelung elektrischer Vorschubantriebe**  
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Glaas, W.*  
**Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung**  
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 *Helml, H.J.*  
**Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose**  
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 *Lang, Ch.*  
**Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung**  
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 *Schuster, G.*  
**Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage**  
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 *Bomm, H.*  
**Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme**  
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 *Wendt, A.*  
**Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen**  
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 *Hansmaier, H.*  
**Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung**  
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 *Dilling, U.*  
**Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen**  
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5



- 60 *Strohmayr, R.*  
**Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von  
Zubringeinrichtungen**  
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*  
**Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer  
Zellenrechnersoftware**  
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 *Stetter, R.*  
**Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur  
Effizienzsteigerung des Industrierobereinsatzes**  
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dindorfer, A.*  
**Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage**  
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*  
**Simulation des Schwingungsverhaltens spanender  
Werkzeugmaschinen**  
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*  
**Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-  
Layoutoptimierung**  
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummetsteiner, G.*  
**3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur  
Planung manueller Montagesysteme**  
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelmann, F.*  
**Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen  
Automatisierung von Produktionssystemen**  
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*  
**Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-  
Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik**  
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*  
**Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen**  
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*  
**Automatische Inbetriebnahme  
geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler**  
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*  
**Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von  
Produktionssystemen**  
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*  
**Rechnergestütztes Projektinformations- und  
Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld**  
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*  
**Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur  
Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge**  
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zetlmayer, H.*  
**Verfahren zur simulationsgestützten  
Produktionsregelung in der Einzel- und  
Kleinserienproduktion**  
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindl, M.*  
**Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung**  
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*  
**Das integrierte Betriebsmittelwesen - Baustein einer  
flexiblen Fertigung**  
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Raith, P.*  
**Programmierung und Simulation von Zellenbläufen in  
der Arbeitsvorbereitung**  
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*  
**Strömungstechnische Optimierung von  
Produktionssystemen durch Simulation**  
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zäh, M. F.*  
**Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen**  
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanzler, N.*  
**Technologisches Prozeßmodell für die  
Kugelschleifbearbeitung**  
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanov, P.*  
**Konstruktionsbegleitende Kalkulation von  
Werkzeugmaschinen**  
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*  
**Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen  
Fertigungszellen**  
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*  
**Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der  
Hartbearbeitung**  
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*  
**Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in  
flexiblen Produktionszellen**  
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*  
**Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung  
und logistisches Störungsmanagement**  
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*  
**Systematische Planung anwendungsspezifischer  
Materialflußsteuerungen**  
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*  
**Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in  
Montageanlagen**  
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Limmer, St.*  
**Konzept einer integrierten Produktentwicklung**  
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*  
**Integrierte Planung von Informationssystemen für  
rechnergestützte Produktionssysteme**  
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deutsche, U.*  
**Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung  
in mittelständischen Unternehmen**  
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieterle, A.*  
**Recyclingintegrierte Produktentwicklung**  
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*  
**Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte**  
1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*  
**Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen · Gestellstrukturen**  
1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*  
**Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren**  
1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*  
**Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme**  
1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*  
**Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen**  
1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*  
**Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme**  
1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*  
**Autonome Fertigungszellen · Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung**  
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moctezuma de la Barrera, J.L.*  
**Ein durchgängiges System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie**  
1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*  
**Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung**  
1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*  
**Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten**  
1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Pischeltzrieder, K.*  
**Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion**  
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Köhler, R.*  
**Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten**  
1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*  
**Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung**  
1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*  
**Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem**  
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*  
**Steuerungintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe**  
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*  
**Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen**  
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Kräner, U.*  
**Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitsuche und Standardisierung**  
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*  
**Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service**  
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*  
**Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion**  
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*  
**Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen**  
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*  
**Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung**  
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*  
**Produktionsregelung · ein modularer, modellbasierter Ansatz**  
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*  
**Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse**  
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindermaier, R.*  
**Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen**  
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehrer, J.*  
**Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung**  
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*  
**Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen**  
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*  
**Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung**  
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*  
**Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen**  
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Pfob, E.*  
**Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen**  
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*  
**Erfahrungsgelernte Planung von Laseranlagen**  
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

# Seminarberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen  
und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Seminarberichte iwb sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, utz@utzverlag.com

- 1 **Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**  
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
- 2 **Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt**  
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
- 3 **Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung**  
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
- 4 **Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**  
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
- 5 **Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**  
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
- 6 **Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung**  
86 Seiten · ISBN 3-931327-76-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-77-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel**  
130 Seiten · ISBN 3-931327-78-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**  
120 Seiten · ISBN 3-931327-79-5
- 10 **3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**  
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 **Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**  
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 **Autonome Produktionssysteme**  
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 **Planung von Montageanlagen**  
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 14 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 15 **Flexible Fluide Kleb/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 **Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 **Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 **Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**  
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 **Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**  
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
- 20 **Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**  
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
- 21 **Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**  
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
- 22 **Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**  
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
- 24 **EDM Engineering Data Management**  
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 25 **Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**  
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 **Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag**  
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 **Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**  
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 **Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**  
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar**  
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 30 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 31 **Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends**  
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 32 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 33 **3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension**  
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 **Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz**  
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 **Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben**  
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 **Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion**  
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 **Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**  
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 **Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**  
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 **Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**  
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 **Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen**  
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**  
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**  
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern**  
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikroteilen**  
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**  
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation**  
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1
- 47 **Virtuelle Produktion - Prozeß- und Produktsimulation**  
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 **Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen**  
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8

- 49 **Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50 **Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion**  
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 **Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle**  
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien**  
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53 **Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung**  
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 54 **Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation**  
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 55 **e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0
- 56 **Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9
- 57 **Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
- 58 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien**  
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
- 59 **Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Füge-technologien für die Mikrosystemtechnik**  
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
- 60 **Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln**  
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 62 **Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien**  
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63 **Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge**  
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1
- 64 **Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial**  
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
- 65 **Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen**  
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
- 66 **Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder**  
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
- 67 **Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder**  
ISBN 3-89675-067-4 · lieferbar ab 03/04
- 68 **Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik**  
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
- 69 **Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette**  
134 Seiten · ISBN 3-89675-069-0

# Forschungsberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen  
und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Forschungsberichte iwb ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, utz@utzverlag.de

- 122 Schneider, Burghard  
**Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile**  
1999 · 183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Goldstein, Bernd  
**Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung**  
1999 · 170 Seiten · 65 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Mößner, Helmut E.  
**Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme**  
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Gräser, Ralf-Gunter  
**Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern**  
1999 · 167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Trossin, Hans-Jürgen  
**Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik**  
1999 · 162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Kugelmann, Doris  
**Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern**  
1999 · 168 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Diesch, Rolf  
**Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen**  
1999 · 160 Seiten · 69 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Lulay, Werner E.  
**Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen**  
1999 · 182 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Murr, Otto  
**Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen**  
1999 · 178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Macht, Michael  
**Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping**  
1999 · 170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-638-9
- 132 Mehler, Bruno H.  
**Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbänden**  
1999 · 152 Seiten · 44 Abb. · 27 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Heitmann, Knut  
**Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle**  
1999 · 146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Blessing, Stefan  
**Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen**  
1999 · 160 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Abay, Can  
**Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik**  
2000 · 159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-697-4

- 136 Brandner, Stefan  
**Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken**  
 2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6
- 137 Hirschberg, Arnd G.  
**Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung**  
 2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6
- 138 Reek, Alexandra  
**Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen**  
 2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X
- 139 Sabbah, Khalid-Alexander  
**Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen**  
 2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3
- 140 Schliffenbacher, Klaus U.  
**Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken**  
 2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7
- 141 Sprenzl, Andreas  
**Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung**  
 2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1
- 142 Gallasch, Andreas  
**Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion**  
 2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4
- 143 Cuiper, Ralf  
**Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen**  
 2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0 · lieferbar ab ca. 02/01
- 144 Schneider, Christian  
**Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion**  
 2000 · 180 Seiten · 66 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-789-X
- 145 Jonas, Christian  
**Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen**  
 2000 · 183 Seiten · 82 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-870-5
- 146 Willnecker, Ulrich  
**Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen**  
 2001 · 175 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-891-8
- 147 Lehner, Christof  
**Beschreibung des Nd:Yag-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss**  
 2001 · 205 Seiten · 94 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0004-X
- 148 Rick, Frank  
**Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen**  
 2001 · 145 Seiten · 57 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0008-2
- 149 Höhn, Michael  
**Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme**  
 2001 · 171 Seiten · 74 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0012-0
- 150 Böhl, Jörn  
**Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung**  
 2001 · 179 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0020-1
- 151 Bürgel, Robert  
**Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben**  
 2001 · 185 Seiten · 60 Abb. · 10 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0021-X  
 lieferbar ab ca. 09/01
- 152 Stephan Dürrschmidt  
**Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion**  
 2001 · 914 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0023-6

- 153 Bernhard Eich  
**Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung**  
 2001 · 132 Seiten · 48 Abb. · 6 Tabellen · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0028-7
- 154 Wolfgang Rudorfer  
**Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke**  
 2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier  
**Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe**  
 2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak  
**Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen**  
 2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner  
**Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen**  
 2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz  
**Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung**  
 2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald  
**Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung**  
 2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner  
**Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen**  
 2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller  
**Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen**  
 2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer  
**Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen**  
 2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fährer  
**Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses**  
 2002 · 176 Seiten · 69 Abb. · 13 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0124-0
- 164 Jürgen Höppner  
**Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler**  
 2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte  
**Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik**  
 2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin Weißberger  
**Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess**  
 2002 · 210 Seiten · 86 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0138-0
- 167 Dirk Jacob  
**Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik**  
 2002 · 200 Seiten · 82 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0142-9
- 168 Ulrich Roßgoderer  
**System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen**  
 2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel  
**Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen**  
 2002 · 164 Seiten · 89 Abb. · 27 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0174-7

- 170 Paul Jens Peter Ross  
**Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung**  
2002 · 144 Seiten · 38 Abb. · 38 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0191-7
- 171 Stefan von Praun  
**Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess**  
2002 · 250 Seiten · 62 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0202-6
- 172 Florian von der Hagen  
**Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen**  
2002 · 220 Seiten · 104 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0208-5
- 173 Oliver Kramer  
**Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe**  
2002 · 212 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0211-5
- 174 Winfried Dohmen  
**Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme**  
2002 · 200 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0214-X
- 175 Oliver Anton  
**Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsenster Montagesysteme**  
2002 · 158 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0215-8
- 176 Welf Broser  
**Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke**  
2002 · 224 Seiten · 122 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0217-4
- 177 Frank Breiting  
**Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen**  
2003 · 156 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0227-1
- 178 Johann von Pieverling  
**Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling**  
2003 · 163 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0230-1
- 179 Thomas Baudisch  
**Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine**  
2003 · 190 Seiten · 67 Abb. · 8 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0249-2
- 180 Heinrich Schieferstein  
**Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems**  
2003 · 132 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0251-4
- 181 Joachim Berlak  
**Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen**  
2003 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0258-1
- 182 Christian Meierlohr  
**Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung**  
2003 · 181 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0292-1
- 183 Volker Weber  
**Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken**  
2004 · 210 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0330-8
- 184 Thomas Bongardt  
**Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern**  
2004 · 170 Seiten · 40 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0332-4
- 185 Tim Angerer  
**Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten**  
2004 · 180 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0336-7
- 186 Alexander Krüger  
**Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme**  
2004 · 197 Seiten · 83 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0371-5