

Andreas Licha

*Flexible Montageautomatisierung zur
Komplettmontage flächenhafter
Produktstrukturen durch kooper-
ierende Industrieroboter*

Andreas Licha

*Flexible Montageautomatisierung zur
Komplettmontage flächenhafter
Produktstrukturen durch kooper-
ierende Industrieroboter*

Herausgegeben von

Professor Dr.-Ing. Klaus Feldmann,

Lehrstuhl für

Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik

FAPS



Meisenbach Verlag Bamberg

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

Tag der Einreichung: 25. September 2002
Tag der Promotion: 28. Januar 2003
Dekan: Prof. Dr. rer. nat. Albrecht Winnacker
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c.
Engelbert Westkämper, Uni Stuttgart

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.

ISBN 3-87525-189-X
ISSN 1431-6226

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks
und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus,
vorbehalten.
Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des
Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein
anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichts-
gestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich
genannten Sonderfälle -, reproduziert oder unter Verwendung
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder
verbreitet werden.

© Meisenbach Verlag Bamberg 2003
Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf
Printed in Germany

Vorwort und Danksagung

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Maschinenbau und Fertigungstechnik, danke ich für die wohlwollende Förderung sowie den wissenschaftlichen Freiraum, den er mir zuteil werden ließ. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E. h. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Engelbert Westkämper, dem Leiter des Instituts für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart danke ich für die wohlwollende Übernahme des Koreferates.

Meinen Kollegen, insbesondere den Mitgliedern der Gruppe Handhabungs- und Montage-technik danke ich für die hervorragende Zusammenarbeit und die anregenden Diskussionen der letzten Jahre. Namentlich möchte ich insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Stefan Slama, Herrn Dipl.-Ing. Ulrich Wenger sowie Frau Dipl.-Ing. Gordana Michos und Frau Dipl.-Ing. Katrin Melzer danken. Mein Dank gilt ferner den Studenten, die mich bei meinen Forschungsarbeiten unterstützt haben. Insbesondere möchte ich mich an dieser Stelle bei Herrn Dipl.-Inf. Helmut Koller, Andreas Dobroschke und Matthias Brossog bedanken, die durch ihr außerordentliches Engagement zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Einen besonderen Dank möchte ich Herrn Dr.-Ing. Thomas Stöckel und Herrn Dr.-Ing. Thomas Collisi für die freundschaftliche Atmosphäre während unserer gemeinsamen Zeit am Lehrstuhl sowie für Ihre wertvollen Anregungen aussprechen.

Darüber hinaus gilt ein besonderer Dank meinen Eltern und Großeltern, die durch ihre wohlwollende Förderung die Grundsteine für das Gelingen dieser Arbeit legten. Ein ganz besonderer Dank gilt darüber hinaus meiner Freundin Anne, die mich stets motivierte und vor allem in der Entstehungszeit der Arbeit für ein ausgleichendes Umfeld sorgte.

Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Allgemeine Trends in der Montagetechnik	5
2.1	Einfluss geänderter Marktanforderungen auf Montagesysteme	5
2.2	Einsatz von Industrierobotern in der Montagetechnik	9
2.3	Serielle Verdrahtung durch Feldbussysteme	13
2.4	Bedeutung der Software für Planung und Betrieb von Montageanlagen	18
2.4.1	Simulation als Mittel zur Planung von Montageanlagen	18
2.4.2	Standardisierung von Programmiersprachen durch IEC 1131-3	23
2.4.3	OPC - OLE for Process Control	24
2.5	Auswirkungen neuer Materialien und Fügetechnologien	28
3	Konzeption der Komplettmontage als innovativer Ansatz für die Montage flächiger Bauteile	29
3.1	Definition des Begriffes <i>flächig</i>	29
3.2	Bauformen flächiger Produktstrukturen	30
3.3	Marktpotentiale flächiger Produkte	32
3.4	Bisherige Lösungsansätze für die Montage flächiger Baugruppen	32
3.4.1	Manuelle Montage	33
3.4.2	Automatisierte Montage	34
3.4.3	Bewertung der Montagelösungen	35
3.5	Komplettmontage - Begriffsdefinition und Anforderungen	36
3.6	Merkmale des Systemkonzepts	38
3.7	Zusammenfassung	43
4	Auswahl und Konfiguration eines Komplettmontagesystems	44
4.1	Methodik bei der Planung automatischer Montagezellen	44
4.2	Methoden zur Bewertung von Lösungskonzepten	47
4.2.1	3-Stufen-Auswahl	47

4.2.2 Nutzwertanalyse.....	48
4.3 Anforderungsanalyse zur Montage des Modellproduktes	49
4.4 Grobplanung der automatischen Komplettmontagezelle	50
4.4.1 Auswahl einer geeigneten Kinematik.....	52
4.4.2 Bauteilzuführung und -bereitstellung.....	58
4.4.3 Materialfluss und Zellenlayout.....	59
4.5 Identifikation im Materialfluss	61
4.6 Zusammenfassung	64
5 Realisierung einer flexiblen Zelle für die Komplettmontage	66
5.1 Auftragspezifische Vorkommissionierung.....	66
5.2 Aufbau einer Komplettmontagezelle mit kooperierenden Robotern.....	71
5.2.1 Integration zusätzlicher Freiheitsgrade mittels eines Hexapoden	73
5.2.2 Entwurf eines flexiblen Greifers für die Handhabung flächiger Teile	84
5.2.3 Realisierung einer durchgängigen Kommunikationsarchitektur.....	89
5.3 Durchgängige Bauteilidentifikation im heterogenen Steuerungsumfeld.....	91
5.4 Zusammenfassung	94
6 Entwurf und Realisierung eines durchgängigen Steuerungskonzepts für die Komplettmontagezelle	95
6.1 Einsatzgebiete kooperierender (Industrie-) Roboter	95
6.2 Anforderungsanalyse für ein integriertes Steuerungskonzept.....	97
6.3 Stand der Technik.....	100
6.3.1 Planung von Montageabläufen	100
6.3.2 Methoden zur Bahnplanung	103
6.3.3 Methoden zur Bahnplanung in dynamischen Umgebungen	105
6.3.4 Die Zellzerlegung	108
6.3.5 Die Potentialfeldmethode	109
6.3.6 Steuerungsstrukturen für kooperierende Industrieroboter	112
6.4 Zusammenfassung der optimalen Teilstrategien	114
6.5 Realisierung des integrierten Konzeptes.....	115
6.5.1 Montageablaufplanung mit <i>FAPSgraph</i>	116
6.5.2 Prä- und Postprozessor mit Anbindung zur Kinematiksimulation	121
6.5.3 Koordinierungsinstanz.....	128

6.6 Zusammenfassung	138
7 Darstellung des Einsatzkonzeptes anhand des Modellproduktes.....	139
7.1 Definition der Montageaufgabe und Anpassung der Zellenperipherie.....	140
7.2 Planung der Montagesequenz	140
7.3 Autonome Bahnplanung zur Ausführungszeit.....	141
8 Zusammenfassung und Ausblick	144
Literaturverzeichnis	147
Glossar	157

1 Einleitung

Die letzten Jahre waren von tief greifenden Veränderungen im gesamten Produktionsumfeld geprägt. Aus der höheren Innovationsgeschwindigkeit, die zu einer Verkürzung der Produktlebenszyklen und einer zunehmenden Variantenvielfalt führt, erwachsen neue Anforderungen an die gesamte Wertschöpfungskette [1]. Heutige Kunden verlangen nach individualisierten Konsumgütern in immer kürzerer Lieferzeit zum Preis von Massengütern [2]. Um konkurrenzfähig zu bleiben, ist es für die Unternehmen erforderlich, dass sie flexibel auf das dynamische Marktumfeld reagieren, gleichzeitig aber auch den hohen Kosten- und Qualitätsansprüchen genügen (Bild 1).

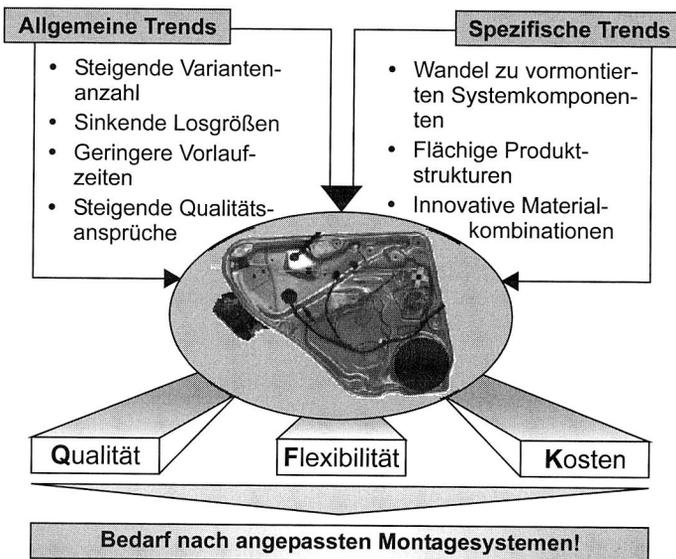


Bild 1: Allgemeine und spezifische Trends in der Montage verlangen nach angepassten Systemlösungen für flexible Montagesysteme

Eine Branche, in der diese Veränderungen besonders deutlich zu Tage treten, ist die Automobilindustrie. Dieser für die heimische Wirtschaft besonders bedeutende Bereich beschäftigte im Mai 2001 alleine 764.000 Menschen. Weitere 300.000 waren bei Zulieferbetrieben angestellt. Unter Berücksichtigung der zusätzlich indirekt Beschäftigten, hängt jeder siebte Arbeitsplatz in Deutschland von der Konkurrenzfähigkeit dieser Branche ab [3].

Da diese Unternehmen in Deutschland in vielen Bereichen die Technologieführerschaft inne haben, bilden sich hier bereits frühzeitig spezifische Trends, die in anderen Branchen erst in Zukunft an gleicher Bedeutung gewinnen werden. Beispielhaft hierfür ist die

Reduzierung der Fertigungstiefe in der Endmontage, die von den Automobilzulieferern einen Wandel vom einfachen Lieferanten zum Systemlieferanten erfordern. Neben der gesamten Entwicklungskompetenz müssen diese auch in der Lage sein, die so genannten Module vormontiert und sequenzgenau an das Montageband anzuliefern. Ein typischer Vertreter dieses Modulgedankens ist das in Bild 1 abgebildete KFZ-Türmodul. Auf dem flächigen Basisträger werden die erforderlichen mechanischen, elektrischen und mechatronischen Komponenten beim Zulieferer montiert und Just-In-Sequence an das Endmontageband des Automobilisten angeliefert. Weitere (groß-) flächige Module sind beispielsweise Schiebedächer, Frontends und Heckklappen. Aber auch in anderen Bereichen, wie der Luft- und Raumfahrt führt der Modularisierungsgedanke zu flächigen Produktstrukturen, die dezentral vormontiert werden [4]. Neben den Qualitätsanforderungen stellt insbesondere die Variantenvielfalt gepaart mit den großen Bauteilabmaßen und der geringen Vorlaufzeit hohe Herausforderungen an die zugeordneten Montagesysteme.

In den 80er Jahren galt die computerintegrierte Fertigung (CIM) als Garant für die hierfür erforderliche hohe Flexibilität. Diese Vision führte zu investitionsintensiven Fertigungslinien, welche die in sie gelegten Hoffnungen nicht erfüllten. Dies ergibt sich zumindest aus einer Mitte 2001 veröffentlichten Studie des Fraunhofer-Instituts für Systemtechnik und Innovationsforschung ISI mit dem Titel „Sackgasse Hochautomatisierung“. 36% der befragten Unternehmen, die hochautomatisierte Montageanlagen einsetzen geben an, den Automatisierungsgrad ihrer Fertigungs- und Montagelinien bereits gesenkt zu haben oder zumindest kurz- bis mittelfristig eine Senkung vorzunehmen, da diese eine zu geringe Mengen- und Variantenflexibilität aufweisen [5]. Wie auch am Beispiel des KFZ-Türmoduls zu beobachten ist, favorisieren aktuelle Konzepte die Stärkung manueller und hybrider Arbeitsplätze.

Mit den Methoden der klassischen Montageautomatisierung ist die für die Just-In-Sequence Anlieferung erforderliche Losgröße 1 nur unzureichend zu realisieren. Die Gründe hierfür liegen in der Produktvarianz, die den wirtschaftlichen Einsatz von Industrierobotern zum einen durch deren aufwendige Programmierung und zum anderen durch die, im Vergleich zum Menschen, geringe Flexibilität behindern. Darüber hinaus ergeben sich insbesondere bei komplexen und flächigen Teilen wie dem Türmodul erhebliche Probleme beim Transport und den notwendigen Arbeitsräumen.

Trotz dieser Argumente, die für eine manuelle Montage sprechen, kann eine angepasste Automatisierung auch in diesem Bereich für ein Unternehmen rentabel sein. Neben den hohen Lohn- und Lohnnebenkosten sprechen die gestiegenen Qualitätsanforderungen und Dokumentationspflichten für eine Automatisierung. Aber auch aus arbeitsschutzrechtlicher Sicht ist die rein manuelle Montage unter Umständen problematisch. Durch die Integration einer Vielzahl mechatronischer Komponenten wie Elektromotoren und Antriebe erreichen die zu montierenden Module Gewichte, die ohne Hebehilfen manuell nicht mehr transportiert werden dürfen. Die hohe Flexibilität des Produktionsfaktors Mensch wird so signifikant beschränkt.

Im Unterschied zu den Ansätzen bei CIM sind die heutigen Automatisierungstechnologien durch die Verwendung offener Standards und Protokolle nicht mehr abgeschlossene, proprietäre Systeme, sondern in der Lage, sich mit einem vergleichsweise geringen Engineeringaufwand in heterogene Systemlandschaften zu integrieren. Es lassen sich somit nach wie vor erhebliche Kosten-, Qualitäts-, und Flexibilitätspotentiale durch eine angepasste und intelligente Automatisierung erschließen [6]. Zu diesem Schluss kommen auch verschiedene Autoren, die die Ergebnisse der Fraunhofer-Studie als nicht wesentlich neu oder zielführend bezeichnen [7, 8, 9].

Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb ein neuer Lösungsansatz für die automatisierte Montage flächenhafter Produktstrukturen vorgestellt. Das als *Komplettmontage* bezeichnete Konzept löst diese Aufgabenstellung im Wesentlichen durch den Einsatz zweier kooperierend arbeitender Linearroboter und einer speziell darauf abgestimmten Steuerungs- und Kommunikationsstruktur, die sich zum einen durch eine größtmögliche Herstellerunabhängigkeit, zum anderen durch die weitgehend automatische Generierung der RC-Programme auszeichnet.

Aufbau der Arbeit

Zu diesem Zweck werden im folgenden Kapitel zunächst die Einflüsse des Marktes auf die allgemeine Gestaltung von Montagesystemen betrachtet. Hierzu gehören neben den Flexibilitätsanforderungen insbesondere die steigende Bedeutung von Software nicht nur bei der Planung, sondern auch beim Betrieb der Anlagen.

Nach einer Begriffsdefinition erfolgt im dritten Kapitel eine detaillierte Betrachtung der Bauformen, Marktpotentiale und bisherigen Montagelösungen für flächige Produktstrukturen. Es wird sich zeigen, dass die realisierten Montagesysteme den aktuellen Anforderungen nur unzureichend genügen, was insbesondere in deren mangelhafter Flexibilität begründet liegt. Abgeleitet aus dem sich daraus ergebenden Anforderungsprofil erfolgt die systematische Herleitung der Merkmale der Komplettmontage. Insbesondere die Vermeidung von Zwischentransporten und der Einsatz von kooperierend arbeitenden Handhabungsgeräten verspricht die Freisetzung eines hohen Rationalisierungspotentials.

Der bis zu diesem Zeitpunkt noch abstrakt gehaltene Forderungskatalog wird in dem sich anschließenden Kapitel unter Nutzung verschiedener Planungsmethoden verdichtet und bewertet. Das so in seiner Grobgestalt entworfene Montagesystem ist in diesem Stadium ein produktneutrales Konzept, das für die Montage verschiedenster flächiger Baugruppen einsetzbar ist.

Für ein reales Modellprodukt erfolgt im fünften Kapitel die Feinplanung des Montagesystems. Es handelt sich dabei um ein so genanntes KFZ-Türmodul, das bislang ausschließlich manuell montiert wird. In diesem Abschnitt ist die gesamte „Montage- und Informations-Hardware“ beschrieben, die teilweise eigens für die Komplettmontagezelle

entwickelt wurde. Hierzu gehört beispielsweise ein Hexapod, der für die Manipulation des Basisteils Verwendung findet.

Eines der wichtigsten Erkenntnisse des vierten und fünften Kapitels ist, dass eine solch komplexe Anlage, wie es die Komplettmontage darstellt, zwingend ein angepasstes Steuerungskonzept benötigt. Aufgrund der vielschichtigen und komplexen Struktur widmet sich das sechste Kapitel ausschließlich diesem Aspekt. Nach einer Betrachtung verschiedener Methoden, die für die Kooperation unabhängiger Roboter bislang entwickelt wurden, erfolgt darauf aufbauend die Vorstellung einer mehrstufigen Steuerungshierarchie für die Planung, Durchführung und Überwachung kooperierender Bewegungen mit Industrierobotern. Diese vermeidet die in vergleichbaren Arbeiten durchgeführten Modifikationen an den verwendeten Robotersteuerungen und gewährleistet auf diese Weise einen hohen Wiederverwendungsgrad.

Anhand des Modellproduktes „KFZ-Türmodul“ erfolgt im siebten Kapitel die Darstellung der prototypischen Montage - von der Montageablaufplanung bis hin zur autonomen Bahnplanung der Roboter in der realisierten Montagezelle.

Mit einer Zusammenfassung der erreichten Forschungsergebnisse und einem Ausblick auf zukünftige Arbeiten auf dem Gebiet der Komplettmontage mit kooperierenden Robotern schließt die Arbeit.

2 Allgemeine Trends in der Montagetechnik

Die Montagetechnik ist als letzte Stufe im Produktentstehungsprozess das Sammelbeken für die verschiedenen Produktvarianten. Je nach Branche entfallen 20-70% der Herstellkosten auf Montage- und Handhabungsprozesse [10]. Eine wirtschaftliche Produktion verlangt deshalb gerade von der Montage eine dynamische Anpassung an aktuelle Entwicklungen. Im folgenden wird auf Trends in der Montagetechnik, sowie technologischer Entwicklungen, die die Montage beeinflussen, eingegangen.

2.1 Einfluss geänderter Marktanforderungen auf Montagesysteme

Die in den letzten Jahren viel beschworenen geänderten Marktbedingungen verlangen von der Organisation der Montage und hier insbesondere von den verwendeten Montagesystemen eine stärkere Flexibilisierung. Klassische automatisierte Montageanlagen, die nach den ursprünglichen Konzepten auf die Produktion hoher Stückzahlen ausgelegt wurden, können diese Forderungen nur unzureichend erfüllen. Die Flexibilisierung der Montage spielte in diesem Zusammenhang lediglich eine untergeordnete Rolle. Sie ist aber gerade die Voraussetzung für die Erfüllung der aktuellen Anforderungen an Montagesysteme. In einer Studie des Fraunhofer-Instituts ISI nennen die befragten Unternehmen, die eine Reduzierung des Automatisierungsgrades durchgeführt haben, die mangelhafte Flexibilität der Anlagen als Hauptproblem [5].

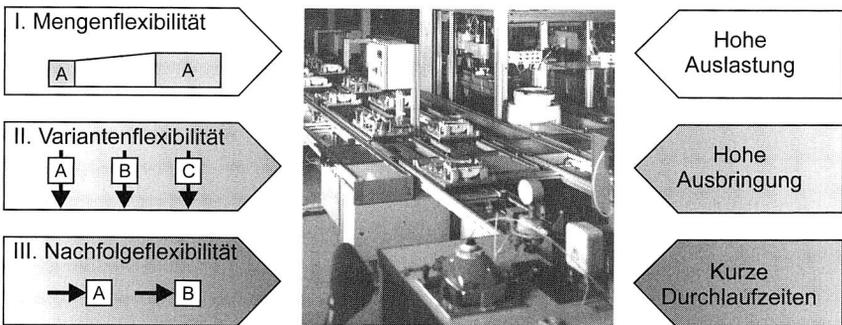


Bild 2: Die wichtigsten Flexibilitätsanforderungen an Montagesysteme, die sich aus den aktuellen Markttrends ergeben [11]

Bislang besteht allerdings noch keine einheitliche Definition des Begriffs Flexibilität. Einigkeit herrscht bei verschiedenen Autoren lediglich über die Tatsache, dass es nicht die Flexibilität als solche, sondern unterschiedliche Arten der Flexibilität gibt. Die folgende Aufzählung soll aus diesem Grund einen kurzen Überblick gewähren:

- *Mengenflexibilität*

Das Produktionsvolumen eines Produktes ist in der Regel nicht konstant, sondern schwankt entsprechend der Phase des Produktlebenszykluses. Ein Montagesystem muss daher in der Lage sein, diese Schwankungen wirtschaftlich abzubilden. Mögliche Lösungsansätze sind dabei die Einführung eines Mehrschichtbetriebes, variabler Personaleinsatz oder ein angepasster Automatisierungsgrad, der durch den Tausch von manuellen und automatischen Stationen entsprechend der Sollmenge beeinflusst werden kann.

- *Variantenflexibilität*

Unter Variantenflexibilität wird die Anpassungsfähigkeit eines Systems zur parallelen Montage unterschiedlicher Varianten eines Produktes, ohne vorherigen Umbau, verstanden. Pauschal ist davon auszugehen, dass mit steigender Ausbringungsmenge eines Montagesystems die Variantenflexibilität sinkt. So fertigt ein Rundtaktautomat in sehr geringen Taktzeiten Bauteile und Baugruppen, dies aber meist nur in einer Variante.

- *Nachfolgeflexibilität*

Sollen auf der Montageanlage Produkte mit nur kurzer Produktlebenszeit montiert werden, so ist die so genannte Nachfolgeflexibilität von Bedeutung. Diese zeigt, wie gut sich ein Montagesystem für die Umrüstung auf ein neues Produkt eignet. Die Nachfolgeflexibilität greift somit wesentlich tiefer in den Aufbau und den Ablauf der Montage ein, als es bei der Variantenflexibilität der Fall ist.

Zusätzlich zu den bereits genannten kennt die Literatur weitere Flexibilitätsarten. Diese weisen eine mehr komponentenorientierte Sicht auf. So sind in [12] insgesamt sechs Flexibilitätsarten genannt, wobei die Mengen- und die Variantenflexibilität auch dort vorkommen. Darüber hinaus wird unterschieden nach:

- *Externe Flexibilität*

Diese ist definiert als ein Maß für die Anpassungsfähigkeit eines Montagesystems an unterschiedliche Produkte durch den Austausch produktspezifischer Komponenten. Eine Steigerung dieser Flexibilitätsform ist beispielsweise durch die Integration eines Greiferwechselsystems oder den Einsatz produktspezifischer Prozessmodule in einer automatischen Montagezelle möglich. Durch diese Definition ergeben sich Überschneidungen mit der Variantenflexibilität, da die Integration eines Greiferwechselsystems für die Montage verschiedener Varianten erforderlich sein kann.

- *Interne Flexibilität*

Kann eine Komponente innerhalb einer Montagezelle für unterschiedliche, wechselnde Aufgaben eingesetzt werden, so besitzt diese eine interne Flexibilität. Ein Industrieroboter, der durch den Start eines neuen Roboterprogramms eine andere Montageaufgabe erfüllen kann, ist flexibler als die klassischen Vereinzelungs- und Zuführsysteme wie Vibrationswendelförderer, die zumeist einen mechanischen Umbau erfordern. Auch bei dieser Flexibilitätsart ist eine eindeutige Abgrenzung gegen

die Variantenflexibilität nur schwer möglich, da es auf die Definition der Systemgrenze ankommt.

Weitere in [12] genannte Flexibilitätsarten, auf die an dieser Stelle hier nicht näher eingegangen werden soll, sind die Integrations- und Technologieflexibilität. Wie zuvor existieren auch hier Abgrenzungsprobleme zueinander, die die praktische Bedeutung dieser Definitionen fraglich erscheinen lassen. Neben den hier betrachteten „technologischen“ Flexibilitätsarten existiert mit der Kostenflexibilität der Begriff auch in der Industriebetriebslehre. Bedingt durch die Natur der Definitionen ist die Angabe quantitativ messbarer und somit normierbarer Werte für die Flexibilitätsarten nicht möglich.

Der Aufbau eines Montagesystems aus modularen Komponenten ist eine Möglichkeit, den Forderungen nach erhöhter Flexibilität gerecht zu werden. Grundlage für eine schnelle Erweiterung oder Veränderung der Anlage stellt die durchgängige Standardisierung der mechanischen, elektrischen und informationstechnischen Schnittstellen sowie die Definition eines einheitlichen Breiten- und Höhenrastermaßes dar [13, 14]. Der Modularisierungsgedanke ist jedoch nicht neu. Bereits in den 70er Jahren brachten Firmen wie die Robert Bosch GmbH Materialflusssysteme auf den Markt, die der Kunde zu beliebigen Anlagen verknüpfen konnte.

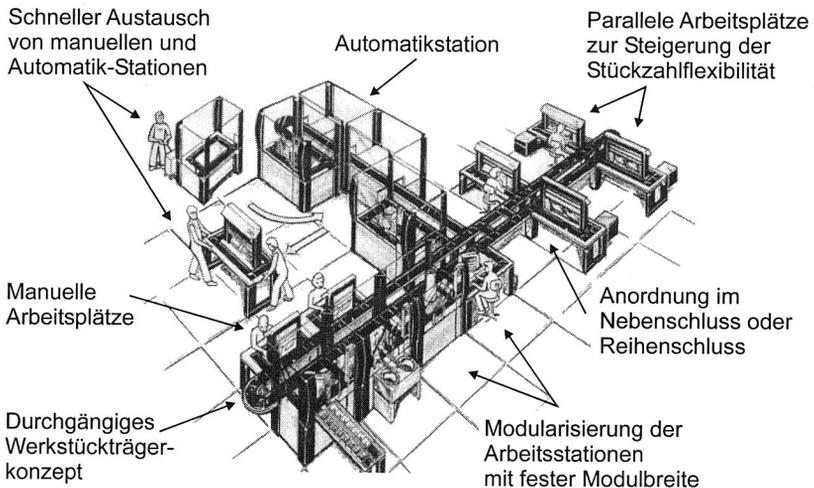


Bild 3: Einsatz modularer Montagestationen zur Erhöhung der Flexibilität

Üblicherweise bestehen Montagesysteme aus einem durchgängigen Materialflusssystem mit einheitlichen Werkstückträgern und einer, zumindest innerhalb des Montagesystems, zentralen Datenhaltung für Fahrpläne, Statistik- und Qualitätsdaten. Bild 3 zeigt beispielhaft den Aufbau eines flexiblen, hybriden Montagesystems, das es ermöglicht, auf jede geforderte Flexibilitätsart adäquat zu reagieren.

Ein typischer Produktlebenszyklus ist in der Anlaufphase (Bild 4) gekennzeichnet durch die Fertigung geringer Produktmengen in wenigen Varianten. Hierfür wird das Montagesystem mit der entsprechenden Anzahl von manuellen Arbeitsplätzen ausgerüstet. Zur Entkoppelung vom Bandtakt werden sie im Nebenschluss an die Hauptstrecke angebunden. Dies bietet zusätzlich den Vorteil, dass bei erhöhtem Stückzahlbedarf (Mengenflexibilität) sich ergebende Taktzeit-Engpässe durch die Integration zusätzlicher, identischer Arbeitsplätze entschärft werden können. Diese Möglichkeit ist in der rechten Hälfte von Bild 3 zu sehen. Alternativ können die manuellen Arbeitsplätze bei noch größeren Stückzahlen durch Automatikstationen ersetzt werden. Dieser Wechsel ist durch ein oder zwei Mitarbeiter innerhalb weniger Minuten realisierbar [13].

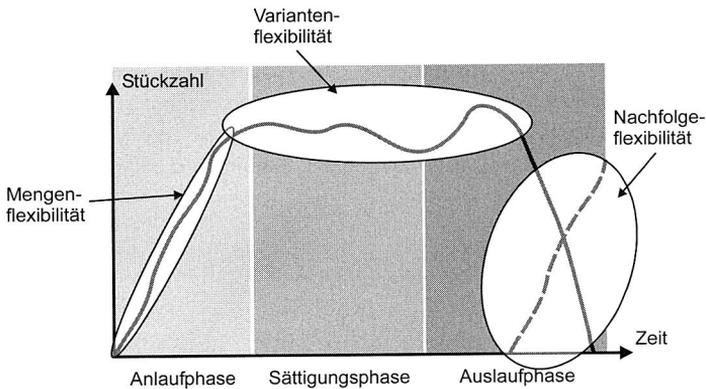


Bild 4: Bedeutung der wichtigsten Flexibilitätsarten verteilt über den Produktlebenszyklus

Spätestens mit Einführung von Produktvarianten ist ein montagesystemweites Identifikationssystem beispielsweise auf Basis von elektronischen Datenträgern empfehlenswert. Über dieses kann jede spezifische Variante identifiziert und die entsprechenden Bearbeitungsprogramme gestartet werden. Unterscheiden sich die Varianten in der Prozessabfolge, so erfordert dies die Verwendung von Montagestationen im Nebenschluss, um variantenspezifische Fahrpläne zu realisieren.

Die so genannte Auslaufphase ist durch eine signifikante Reduzierung der Produktionsmenge bei einem gleichzeitigen Hochlauf des Nachfolgeproduktes gekennzeichnet. Der Einsatz verschiedener Prozessmodule erlaubt dabei die hauptzeitparallele Vorbereitung und Umrüstung auf das Folgeprodukt. Dieser Vorgang wird durch die Standardisierung aller relevanten Abmaße und Schnittstellen wesentlich erleichtert.

2.2 Einsatz von Industrierobotern in der Montagetechnik

Die Durchführung von sich regelmäßig, gleichartig wiederholenden Aufgaben erfolgt über Handhabungsgeräte oder Industrieroboter, die in das Montagesystem integriert sind. Trotz der Reduzierung des Automatisierungsgrades, den viele Unternehmen vornehmen, zeigen aktuelle Untersuchungen nach wie vor deutliche Umsatzzuwächse und steigende Verkaufszahlen für Industrieroboter.

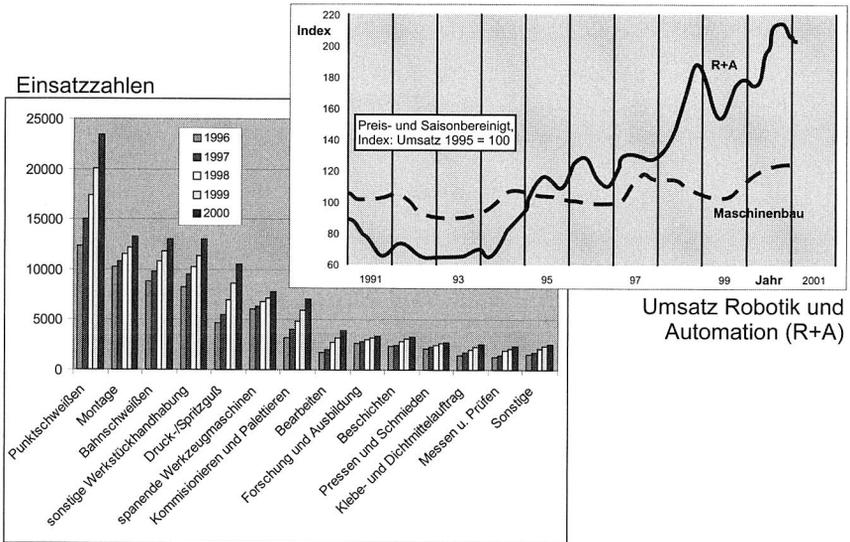


Bild 5: Umsatz und Einsatzzahlen der Branche Robotik und Automation (R+A) im nationalen Vergleich [15]

Deutschland besitzt im Bereich Robotik+Automation (R+A) mit Abstand die Spitzenposition in Europa, in weitem Abstand gefolgt von Italien, Frankreich und England. Die Summe der in diesen Ländern installierten Roboter beträgt lediglich 71.000. In Deutschland wurde dagegen im Jahr 2000 die Marke von insgesamt 100.000 installierten Robotern überschritten. Den größten Einsatzbereich bildet das Punktschweißen mit ca. 23%. Die Montage- und Handhabungstechnik folgt mit mehr als 13.000 installierten Einheiten auf Rang zwei, knapp gefolgt von einer vergleichbaren Zahl von klassischen Schweißrobotern (vgl. [15] und Bild 5). Mit jährlichen Neuinstallationen von 15-20.000 Robotern stellt R+A eine der Wachstumsbranchen in dem eher stagnierenden Maschinenbaumarkt dar.

Über die Definition eines Industrieroboters bestehen international große Unterschiede. Die in Deutschland geltende VDI-Richtlinie 2860 versteht darunter einen Bewegungsautomaten, dessen Achsen sensorgeführt oder zumindest freiprogrammierbar sein

müssen. Der Endeffektor kann mit Greifern oder Werkzeugen ausgerüstet werden [16]. Die internationale ISO TR 8373 geht einen Schritt weiter, indem nach dieser Norm ein Industrieroboter darüber hinaus mindestens drei Achsen besitzen muss. Wesentlich weiter ist die japanische Definition eines Industrieroboters gefasst. Dort zählen auch kurvengesteuerte Einlegegeräte und einfache, manuell bediente Manipulatoren zur Klasse der Industrieroboter [16]. Die VDI-Richtlinie 2860 zählt solche Geräte zu den festprogrammierten Bewegungseinrichtungen (vgl. Bild 6). Diese Unterschiede sind übrigens mit ein Grund, weshalb die Einsatzzahlen von Industrierobotern in Japan im Vergleich zu der restlichen Welt sehr hoch erscheinen.

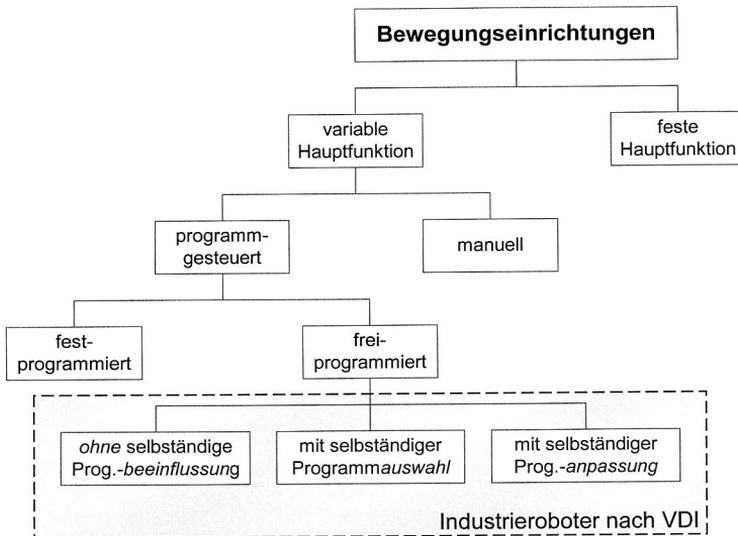


Bild 6: Gliederung der Bewegungseinrichtungen nach VDI 2860 [16]

Die vielfältigen Aufgaben im Bereich Fertigung, Handhabung und Montage führten zur Entwicklung unterschiedlichster Kinematiken. Die überwiegende Mehrzahl der Industrieroboter basiert jedoch auf den drei, in Bild 7 dargestellten kinematischen Grundformen.

Linearroboter

Linearroboter im eigentlichen Sinn werden im Bereich der Montage bislang noch selten eingesetzt. Der Arbeitsraum ist durch drei orthogonal angeordnete Hauptachsen und einer zusätzlichen, optionalen Rotationsachse definiert. Aufgrund dieser Bauform eignen sie sich für die Abdeckung großer, kubischer Arbeitsräume. Ihre Entsprechung im Montagebereich stellen zum einen einfache, pneumatisch gesteuerte Einlegegeräte (Pick-and-Place) oder geregelte Achssysteme mit elektrischen oder servo-pneuma-

tischen (NC-) Antrieben dar. Die endlagengesteuerten, pneumatischen Geräte besitzen meist zwei oder drei fest definierte Positionen und sind somit für eine variantenreiche Montage nur bedingt geeignet.

Freipositionierbare NC-Achsen bieten durch das Baukastensystem eine hohe Variantenvielfalt, die es dem Anwender ermöglicht, sehr genau die Kinematik zu konstruieren, die für die konkrete Montageaufgabe benötigt wird. Als nachteilig an dieser Lösung sind die erhöhten Inbetriebnahme-, Wartungs- und Schulungskosten zu sehen, da Programmierung und Inbetriebnahme nicht vom Hersteller erfolgen. Im Bereich der flexiblen Montage sollte der Einsatz von Linearrobotern als Alternative geprüft werden, deren leistungsfähigere RC-Steuerungen mit einer Vielzahl von Optionen zur Bahn- und Taktzeitoptimierung ausgerüstet sind. Ein weiteres Merkmal von Linearrobotern ist deren hohe Tragfähigkeit, die ein Vielfaches von SCARA-Robotern erreicht.

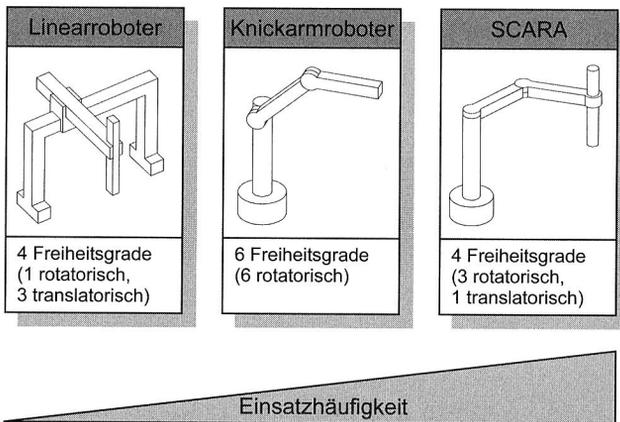


Bild 7: Gebräuchliche kinematische Bauformen von Robotern und deren qualitative Einsatzhäufigkeit im Bereich der Montagetechnik

Knickarmroboter

Knickarmroboter besitzen mit fünf und mehr Freiheitsgraden die größte Bewegungsmöglichkeit und erlauben so die weitreichende Manipulation von Gegenständen im gesamten Arbeitsraum. Mit einer maximalen Tragkraft von 5 kN liegt ihre Domäne aus diesem Grund in der Handhabung und Bearbeitung großer und schwerer Teile, sowie im Schweiß- und Lackierprozess. In den letzten Jahren entwickelten mehrere Unternehmen wie beispielsweise Adept Technologies und Stäubli Knickarmroboter für den Montagebereich. Die Modelle besitzen eine Reichweite von ca. 600mm – 1200mm und decken so den typischen, für die Kleingerätemontage benötigten Arbeitsraum ab. Ihr Einsatzbereich liegt dort, wo die Komplexität der Fügebewegung über die reinen Pick-

and-Place-Bewegungen der Linearachsen und SCARA-Roboter hinausgeht und höhere Taktzeiten möglich sind.

SCARA-Roboter

Horizontal-Knickarmroboter oder SCARA-Roboter (Selective Compliance Assembly Robot Arm) stellen die am häufigsten verwendete Bauform im Bereich der Kleingeräte-montage dar. Sie besitzen drei rotatorische Haupt- und eine translatorische Nebenachse, wobei durch die Verlagerung der Achsantriebe auf die erste Achse die Summe der zu bewegenden Massen reduziert werden konnte. Neben den dadurch erzielbaren kurzen Zykluszeiten bieten SCARA-Roboter einen sehr steifen Aufbau, der sehr hohe Positionier- und Wiederholgenauigkeiten ermöglicht. Typische SCARA-Roboter besitzen bei einer Nutzlast von 4-8kg eine maximale Reichweite von 400-800mm. Sonderformen erreichen Armlängen von 1500mm und mehr, eignen sich aber aufgrund der einhergehenden Verschlechterung aller Kennwerte nicht mehr für Montageoperationen.

Eine weitere, in Bild 7 nicht dargestellte Bauform stellen Parallelkinematiken dar, die sich insbesondere durch ihre hohe Dynamik auszeichnen. Obwohl das kinematische Prinzip bereits seit langem bekannt ist, sind erste Geräte für Spezialanwendungen erst seit wenigen Jahren auf dem Markt verfügbar. Der Grund hierfür ist insbesondere in der anspruchsvollen Steuerung zu sehen, die leistungsfähige Mikroprozessoren erfordert (vgl. hierzu auch Kapitel 5.2.1).

Nicht nur neue Kinematiken werden durch moderne und leistungsfähigere Steuerungen möglich, Roboter erschließen auch neue Anwendungsfelder. Aktuelle Forschungsbereiche beschäftigen sich intensiv mit einer „Intelligenzsteigerung“ für Roboter, um den Einsatz in unbekanntem Umgebungen zu ermöglichen. Hier ist insbesondere die Service-Robotik zu nennen, die es sich zum Ziel gemacht hat, die Arbeiten im häuslichen Umfeld zu automatisieren (z.B. [17]). Neben leistungsfähigen Bild- und Spracherkennungssystemen sind auch hohe Anforderungen an die autonome Bahnplanung zu stellen, denn nur so kann eine sichere Navigation in unbekanntem Gelände erfolgen.

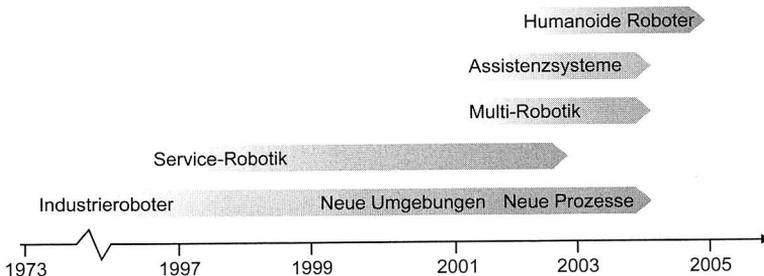


Bild 8: Forschungsfelder Robotik in Deutschland (nach [18])

Bild 8 gibt einen Überblick über die Roadmap in der Roboterforschung. Neben der Verbesserung und der Erschließung neuer Umgebungen und Prozesse bei klassischen Industrierobotern ist ein aktueller Trend hin zur Entwicklung kooperierender Robotiksysteme und Assistenzsystemen zu sehen. Prototypen im Bereich humanoider Roboter besitzen schon sehr gute Eigenschaften, was die Lauf- und Balancefähigkeit betrifft. Industriell verwertbare Lösungen, die über den reinen Show-Effekt hinausgehen, sind geplant, ihre Realisierung ist aber noch nicht in Sicht [19].

Anders sieht es im Bereich der Assistenz- und Multirobotiksysteme aus. Durch die Leistungssteigerung können neue Arbeits- und Aufgabenfelder erschlossen werden. Am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) wurde eine Montagezelle entwickelt, in der sich ein SCARA-Roboter mit einem Werker einen gemeinsamen Arbeitsraum teilt, ohne, dass externe Sicherheitsmaßnahmen wie Schutzzäune oder Lichtvorhänge benötigt würden [20].

2.3 Serielle Verdrahtung durch Feldbussysteme

Der Aufbau komplexer Montage- und Materialflussanlagen mit ihren verschiedensten Aktoren und Sensoren ist in der früher üblichen parallelen Verdrahtung nicht mehr wirtschaftlich darstellbar. Eine moderne serielle Verdrahtung erlaubt die Vernetzung der verschiedenen Automatisierungskomponenten mit nur einem einzigen Kabel („Bus“), mit dem im Idealfall die gesamte Anlage mit den übergeordneten Ebenen der Leit- und Planungsebene verbunden wird. Die Vorläufer der heutigen Feldbussysteme wurden Mitte der 70er Jahre von der Firma Honeywell im Bereich der Prozessleitsysteme auf dem Markt eingeführt [21]. Der Begriff Feldbussystem bezeichnet hierbei ein serielles Datenkommunikationssystem für den Datenaustausch im Feldbereich [22].

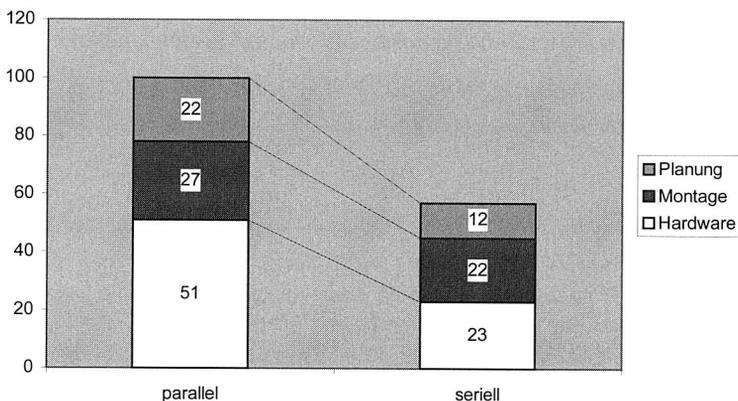


Bild 9: Gegenüberstellung der Kosten zwischen konventioneller (paralleler) und serieller Verdrahtung (Bustechnik) [21]

Was den Einsatz der Bustechnik besonders attraktiv für den Anwender macht, ist die Tatsache, dass sich Einsparungspotentiale sowohl bei der Planung der Anlage, bei der Montage, als auch bei den Hardwarekosten ergeben (Bild 9). Alleine in der Verkabelung der Automatisierungskomponenten lassen sich Kosteneinsparungen bis zu 20% realisieren [23].

Vergleichbar der Problematik bei den speicherprogrammierbaren Steuerungen entstanden auch im Bereich der Bussysteme in den letzten Jahren eine Vielzahl von inkompatiblen Lösungen, die teilweise von einzelnen Firmen oder auch von Firmenkonsortien entwickelt wurden. Nach langem Ringen wurde am 1.1.2000 die IEC 61158, in der unterschiedliche Feldbussysteme definiert sind, veröffentlicht. Mit der Entscheidung, nicht nur genau einen, sondern sieben verschiedene Feldbusse zu normieren, verdeutlicht die IEC die nach wie vor bestehende Problematik, dass es nicht *den* Feldbus gibt, sondern dass jede Anwendung nach einem bestimmten Feldbus verlangen kann. Für vier der Feldbusse waren bereits vor Schaffung des internationalen Standards europäische Normen vorhanden (EN 50170 und EN 50254). Die übrigen drei Feldbusse waren bereits in den USA genormt.

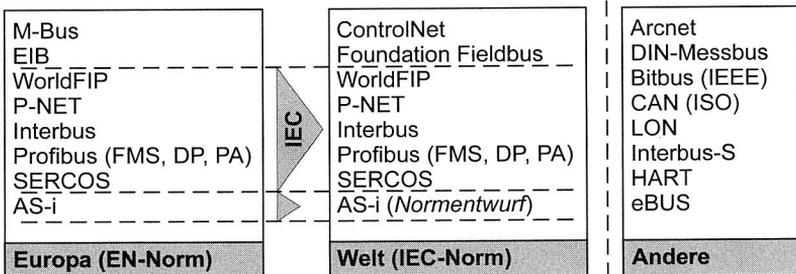


Bild 10: Übersicht über gebräuchliche Feldbusse und deren Normungsstatus

Im folgenden soll ein kurzer Überblick über die am weitest verbreiteten Systeme im Bereich der Fabrikautomatisierung gegeben werden:

Profibus

Der Profibus (Prozess Field Bus) ist mit 53,6% das mit Abstand am häufigsten eingesetzte Feldbussystem in Deutschland [24]. Mittlerweile existieren drei verschiedene Ausprägungen des Profibus-Protokolls, die jedoch gleichzeitig über die gleiche physikalische Leitung übertragbar sind [21]. Das älteste ist das Profibus/FMS (Fieldbus Message Specification), das eine Multimaster-Kommunikation zwischen den beteiligten Stationen erlaubt. FMS ist für die Vernetzung ganzer Anlagenteile konzipiert und erlaubt deshalb den effizienten Austausch von mittleren bis großen Datenmengen. Für die anlageninterne Kommunikation, also den Austausch von wenigen Byte bis hin zu einzelnen Bit wurde der Profibus/DP (DP = Dezentrale Peripherie) entworfen. Mit dem Profi-

bus/PA (Prozessautomatisierung) ist darüber hinaus eine spezielle Lösung für die Anforderungen der Prozessindustrie nach Eigensicherheit etc. vorhanden.

Somit eignet sich insbesondere der Profibus/DP für die spezifischen Anforderungen der Fertigungs- und Montageautomatisierung. Das Protokoll erlaubt theoretisch einen Multimaster-Betrieb mit einem unterlagerten Master-Slave-Zugriff. In der Regel ist der DP jedoch in einer reinen Master-Slave Version realisiert [21]. Jeder der maximal 32 Slaves, die in einem Bussegment erlaubt sind, wird zyklisch vom Master abgefragt. Durch die Aufteilung in mehrere Segmente ist der Anschluss von maximal 126 Teilnehmern möglich. Profibus-Anlagen lassen sich sowohl als Linien-, Stern- und Baumstruktur aufbauen [23]. Aufgrund der sehr hohen Übertragungsgeschwindigkeit, die bis zu maximal 12 Mbit/s spezifiziert ist, lassen sich mit dem Profibus/DP Echtzeitanwendungen realisieren [21].

Interbus

Im Gegensatz zum Profibus-Protokoll mit seinen drei unterschiedlichen Ausprägungen, ermöglicht der Interbus die Integration der Prozess- mit der Leitebene mit nur einem Protokoll. Einen weiteren Unterschied stellt die Zugriffstechnik auf die Klienten dar. Es wird hier das so genannte Summenrahmenprotokoll verwendet. Bei diesem werden die Klienten nicht nacheinander angesprochen, sondern es werden alle Nachrichten und Daten zu einem einzigen Protokoll zusammengefasst. Die Stellung im Feld, also die Reihenfolge ihrer physikalischen Anschaltung an den Bus, bestimmt die Position des einzelnen Datenpaketes innerhalb des Protokolls.

Dieses Verfahren bietet mehrere Vorteile. Zum einen ist die Telegrammlänge immer konstant und somit die Abtastrate im Netz einfach zu bestimmen. Der zweite Vorteil liegt in der Reduzierung der zu übertragenden Daten. Wird jeder Client einzeln angesprochen, so ist die Protokolleffizienz (Verhältnis Nutzdaten zu Protokolllänge) insbesondere bei binären Sensoren und Aktuatoren sehr gering. Jedes Protokoll muss mit der Zieladresse, mehreren Statusinformationen und insbesondere auch Prüfziffern ausgestattet sein. Dieser Overhead wird durch den Einsatz des Summenrahmenprotokolls signifikant verkleinert. In der Fortführung erlaubt dies eine Reduzierung der notwendigen Übertragungsgeschwindigkeit bei gleich bleibender Abtastfrequenz der angeschlossenen Klienten. Dies hat einen positiven Einfluss auf die EMV-Empfindlichkeit und somit auf die resultierenden Hardwarekosten.

Ein weiterer Unterschied zwischen dem Profibus und dem Interbus liegt in der Netztopologie. Der Interbus ist als Ringstruktur aufgebaut, was zu einer größeren Empfindlichkeit der Systemverfügbarkeit gegen fehlerhafte Stationen führt [25]. Im Gegenzug ist durch diese Struktur eine schnelle und genaue Lokalisierung der entsprechenden Stationen gewährleistet.

CAN-Bus

Ein weiteres, sehr verbreitetes Protokoll stellt CAN (Controller-Area-Network) dar. Es wurde ursprünglich von der Firma Bosch für den Einsatz in Kraftfahrzeugen entwickelt und ist mittlerweile als offenes System in der ISO 11898 spezifiziert. Das Hauptmerkmal von CAN ist die objektorientierte Datenübertragung, bei der nicht die Busteilnehmer, sondern die zu übertragenden Größen mit einer eindeutigen Kennung versehen werden. Darüber hinaus ist CAN ein Multimaster-Protokoll, bei dem jeder Teilnehmer sendeberechtigt ist. Eine Beschränkung der Anzahl der Teilnehmer ist nur durch die Leistungsfähigkeit der Treiberbausteine gegeben. Über verschiedene integrierte Mechanismen ist eine sehr hohe Sicherheit erreicht, eventuell auftretende Fehler zu erkennen. [21]

Mittlerweile hat CAN neben der Kraftfahrzeugtechnik (Daimler-Chrysler, BMW, VW) auch Verbreitung in andere Gebiete wie der maschineninternen Kommunikation oder der Gebäudeleittechnik gefunden [26]. Seit 1994/95 ist CAN das am meisten verbreitete Protokoll in der Automobiltechnik [25]. In der Automatisierungstechnik ist in Europa insbesondere das CANOpen-Protokoll, in den USA und Asien das DeviceNet-Protokoll vertreten [25].

AS-Interface

Die bislang vorgestellten Bussysteme eignen sich aufgrund ihres Verhältnisses zwischen Nutzdaten und Protokolloverhead nicht optimal für den Einsatz in der Sensorebene. Die Gründe liegen hier zum einen in den vergleichsweise hohen Anschaltkosten und der geringen Protokolleffizienz. In der Regel werden im Feld nur wenige Bit übertragen, dies jedoch mit einer möglichst geringen Zykluszeit. Es besteht deshalb Bedarf nach einem angepassten Bussystem für diesen Einsatzbereich. Mit dem Aktuator-Sensor-Interface (auch AS-Interface oder AS-i genannt) existiert eine Lösung, die diese Anforderungen erfüllt. Wie der Namenszusatz Interface verdeutlicht, ist AS-i als *Interface*, also als Schnittstelle für Sensoren und Aktuatoren konzipiert. AS-i tritt nicht an, verschiedene Steuerungen miteinander zu verknüpfen. Eingebettet in das klassische Ebenenmodell der Automatisierungspyramide befindet es sich somit unterhalb der klassischen Feldbusebene [27]. Um dies zu verdeutlichen, ist es auch als ein Low-Cost System entworfen, um möglichst einfach und preisgünstig eine große Anzahl binärer Sensoren und Aktuatoren zu vernetzen. Die Verkabelung der Busteilnehmer erfolgt mit einem mechanisch kodierten, ungeschirmten Zweileiter. Nach Popp ist das AS-I die ideale Ergänzung zum Profibus auf Bitebene [23].

Das AS-Interface ist als klassischer Master-Slave-Bus konzipiert. In jedem Segment existiert genau ein Master, der alle Busteilnehmer zyklisch abfragt. In der ursprünglichen Spezifikation V1.0 ist die Anschaltung von maximal 31 Busteilnehmern (Slaves) vorgesehen. Jeder dieser Slaves besitzt eine eindeutige Adresse, über die er vom Master angesprochen wird. Es ist den Slaves somit nicht möglich, aktiv dem Master eine Wertänderung mitzuteilen. Aufgrund der geringen Zykluszeit, die beim maximalen Aus-

bau (Segmentlänge 100m und 31 Slaves) maximal 5ms beträgt, ist dies jedoch zu verschmerzen.

Als Slaves kommen sowohl intelligente Geräte, wie parametrierbare Sensoren zum Einsatz, die über eine eigene Busanschaltung verfügen, als auch einfache Sensoren und Aktuatoren. Diese werden über so genannte Benutzermodule an den Bus angeschlossen. Jedes Benutzermodul stellt jeweils maximal vier digitale Ein- und Ausgänge zur Verfügung. Daraus ergibt sich eine maximale Teilnehmerzahl von jeweils 124 Sensoren und Aktuatoren. Für die Anschaltung von komplexen Anlagen ist dies jedoch zu wenig. Es wurde deshalb mit der Spezifikation V2.1 eine Erweiterung des Adressraums auf maximal 62 Teilnehmer vorgenommen. Um eine vollständige Abwärtskompatibilität zu gewährleisten, konnte dies nur unter Verwendung eines bisherigen Datenbits realisiert werden. Somit lassen sich unter Nutzung der neuen Spezifikation 248 digitale Eingänge und 186 digitale Ausgänge über den Bus betreiben. In jedem Zyklus fragt der Master zunächst die ursprünglichen 31 Slaves ab, um danach in einem zweiten Durchgang die zweite Hälfte des Adressraums zu durchsuchen. Durch diese Vorgehensweise verdoppelt sich jedoch die maximale Zykluszeit auf 10ms, was einer Abtastfrequenz von 100Hz entspricht [28].

Für den Einsatz von AS-i spricht neben der mittlerweile sowohl international als auch europaweiten Normung (IEC 62026-2 und EN 50295), die Existenz einer Vielzahl von Buskopplern zu übergeordneten Bussystemen wie dem CAN-, Profi-, oder dem Interbus. Des weiteren ist auch die Anbindung an das Ethernet möglich.

Interbus-S

Der als Ringsystem aufgebaute Interbus-S hat, vergleichbar dem AS-i, seinen Einsatzschwerpunkt auf der Sensor-Aktuator-Ebene. Durch die Verwendung des Summenrahmenprotokolls erreicht auch der Interbus-S eine sehr hohe Protokolleffizienz, aus der eine sehr geringe Zykluszeit resultiert. Die Übertragung von 128 Byte Eingangs- und 128 Byte Ausgangsdaten ist mit einer Frequenz von 250Hz möglich.

Ethernet und andere Bussysteme

Neben den bereits vorgestellten Bussystemen existiert noch eine Vielzahl anderer Systeme, die in Nischenbereichen vorkommen. Ein typisches Beispiel ist der DIN-Messbus, der für den Austausch von Mess- und Qualitätsdaten konzipiert ist. Der Großteil der realisierten Bussysteme basiert jedoch auf den oben genannten. Als eine Alternative hierzu ist seit einigen Jahren der Einsatz des in der Bürokommunikation üblichen Ethernet im Gespräch. Das TCP/IP-Protokoll, das Ethernet verwendet, basiert auf dem ISO/OSI-Schichtmodell und kann somit als Vorgänger oder Grundlage der heutigen modernen Bussysteme gelten.

Es herrscht jedoch weitgehend Einigkeit darüber, dass klassische Feldbussysteme auf absehbare Zeit ihre Bedeutung nicht verlieren werden [29]. Zu groß ist die Anzahl der bisher realisierten Anlagen und auch die Erfahrung von Betreibern und Planern.

2.4 Bedeutung der Software für Planung und Betrieb von Montageanlagen

Wie in allen Bereichen des täglichen Lebens, ist auch die Montage durch eine immer stärker werdende Softwaredurchdringung gekennzeichnet [30]. Neben den schon angesprochenen Entwicklungen auf dem Gebiet der Robotersteuerungen sollen an dieser Stelle für den Bereich der Montageautomatisierung wesentliche Entwicklungen dargestellt werden.

2.4.1 Simulation als Mittel zur Planung von Montageanlagen

Mit dem Einsatz der Simulationstechnik verknüpfen sich verschiedene Zielsetzungen. Die am häufigsten genannten Gründe sind die Kostensenkung und Verkürzung der Planungsphase durch eine Validierung der Planung in einem Computer-Modell. Darüber hinaus ist eine Steigerung der Prozesssicherheit durch eine Offline-Kollisionsüberwachung geplanter Bewegungen erreichbar [31].

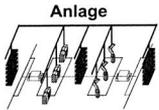
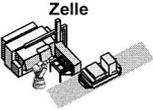
Planungsebene	Planungsinhalt	Simulationsmodell
<p>Anlage</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Anlagenlayout - Materialfluß/Logistik - Systemleistung - Fertigungsprinzip - Steuerstrategien - Entstörstrategien 	Ablausimulation (grob)
<p>Zelle</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Zellenlayout - Ablaufvorschriften - RC-NC-Programmierung - Kollisionsvermeidung - Taktzeitoptimierung 	Ablausimulation (fein) Grafische 3D-Simulation
<p>Komponente</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Betriebsmittelbeanspruchung - Prozeßparameter - Werkzeuge - Hilfsmittel 	Finite-Elemente-Methode (FEM) Grafische 3D-Simulation Mehrkörpersimulation (MKS)

Bild 11: Einsatzbereiche verschiedener Simulationswerkzeuge im betrieblichen Umfeld in Abhängigkeit der Planungsebene [31]

Nach der VDI-Richtlinie 3633 ist Simulation „das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ [32]. In dieser Definition werden sehr deutlich die Grundlagen und Restriktionen der Simulationstechnik deutlich. Wichtig ist zunächst, dass ein Modell eines realen Systems, wie es eine Montagezelle darstel-

len kann, betrachtet wird. Unter einem Modell ist dabei eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems zu verstehen [32], dem für die aktuelle Fragestellung unwichtige Informationen entfernt wurden. Die Schwierigkeit für den Simulationsexperten bei der Modellgenerierung besteht somit darin, dass es durch die Erfassung von nicht relevanten Information zu einem Kosten-, Zeit- und Komplexitätsanstieg kommt, die Simulationsergebnisse aber keine höhere Qualität bieten.

Aufgrund der kürzeren Entwicklungszeiten (Time-to-Market) und dem immer komplexeren Zusammenspiel mechanischer, elektrischer und informationstechnischer Aspekte zu einem mechatronischen Gesamtsystem, wurde die Simulationstechnik in den letzten Jahren zu einem anerkannten Werkzeug, das in der Lage ist, Planern und Entscheidern reproduzierbare Ergebnisse zu liefern, die in den Entscheidungsprozess einfließen können. Zu beachten ist hierbei, dass die Simulationstechnik nicht in der Lage ist, Probleme selbständig zu lösen, es ist lediglich ein Werkzeug um Zusammenhänge darstellen und in vergleichbar kurzer Zeit entschlüsseln zu können.

Im Bereich der Automatisierungs- und Montagetechnik sind insbesondere die folgenden Simulationsmethoden von Bedeutung, wobei die Sortierung analog zur Systemgrenze erfolgte:

- Finite Element-Simulation,
- Mehrkörper-Simulation,
- Graphische 3D-Simulation (Kinematiksimulation),
- Ablaufsimulation.

Finite-Element-Simulation

Die FE-Simulation, die auf den Theorien der Finite-Element-Methode basiert, dient der Analyse der mechanischen Beanspruchung und des Schwingungsverhaltens einzelner Bauteile und -gruppen. Ihren Einsatz findet die Methode bei der Berechnung und Optimierung von Prozessparametern bei Werkzeugmaschinen und anderen meist dynamisch belasteten Betriebsmitteln [31]. Die FE-Simulation findet auf einer sehr niedrigen Systemebene statt und trägt mit ihren Ergebnissen nur indirekt zu der Gestaltung eines Montagesystems bei.

Mehrkörper-Simulation

Die Mehrkörper-Simulation oder auch MKS dient der Berechnung der Kinetik von gekoppelten Systemen. Angewendet wird diese Methode beispielsweise bei der Berechnung von Lagerreaktionen bei hochdynamischen Verfahrbewegungen von Industrierobotern. Mittels der MKS sind bereits zur Entwicklungsphase sehr genaue Aussagen über die erforderliche Leistung der elektrischen Antriebe und der notwendigen Lagerdimensionierung zu treffen. Obwohl es bei der MKS zu einer makroskopischen Systembetrachtung kommt, ist auch diese Simulationsmethode auf die Optimierung einer sin-

gulären Komponente, wie beispielsweise eines Industrieroboters oder eines Bestück-automaten gerichtet.

Graphische 3D-Simulation

Die graphische 3D- oder Kinematiksimulation wurde ursprünglich zur Layoutoptimierung von Montagezellen verwendet. Im Bereich der spanenden Fertigung findet die 3D-Simulation bei der Visualisierung des Materialabtrags und der Überprüfung der Kollisionsräume der angetriebenen Achsen Anwendung. Durch immer leistungsfähigere Soft- und Hardware ist aber auch die Simulation ganzer Anlagen kein Einzelbeispiel mehr. Insbesondere in den Bereichen Automobilbau und Logistik gehört die Planungsabsicherung mit leistungsfähigen 3D-Simulatoren zum Stand der Technik. Die Kinematiksimulation bietet den großen Vorteil, dass bereits zur Planungszeit Aussagen über die zu erwartenden Taktzeiten, der realen Anlage möglich sind.

Grundlage der Simulation bildet ein Zellenmodell, in dem alle relevanten Objekte wie Handhabungs- und Zuführgeräte, Spannstationen, Werkstücke etc. integriert sind. Hierzu zählen sowohl statische Objekte, wie Schaltschränke, die im wesentlichen als geometrische Restriktionen im Zellenmodell verwendet werden, als auch dynamische Objekte, die Gegenstand der eigentlichen Simulation sind. Schnittstellen zu externen CAD-Programmen ermöglichen die einfache Erweiterung um neue Kinematiken und Modellbibliotheken, die als Volumenmodelle in den Simulator importiert werden. Im Gegensatz zu den statischen Objekten benötigen die dynamischen jedoch zusätzliche Informationen über die Anzahl ihrer Freiheitsgrade, zulässigen Drehwinkel etc. Klassische CAD-Systeme, die auf die rein geometrische Konstruktion ausgelegt sind, verwalten diese Informationen jedoch nicht. In einem Zwischenschritt ist aus diesem Grund zunächst die Ergänzung des geometrischen Modells mit kinematischen und dynamischen Informationen notwendig. Hierzu gehören z.B. die Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsprofile.

Mittlerweile wird die Kinematiksimulation auch für die Generierung von Steuerungsprogrammen für Roboter und Maschinen verwendet. Hierzu wird die gesamte Bewegungssequenz am Rechner entworfen und visualisiert. Über einen steuerungsspezifischen Postprozessor erfolgt im Anschluss die automatische Umwandlung der Anweisungen in die Maschinensprache der verwendeten Robotersteuerung. Hierfür ist nicht nur die Kenntnis der korrekten geometrischen Beziehungen von Bedeutung, es muss vielmehr auch das Verhalten der realen Robotersteuerung im Modell nachgebildet werden. Nur wenn dies gewährleistet ist, lassen sich Kollisionen im späteren Betrieb vermeiden. In der Regel ist dabei nicht der eigentliche Montagevorgang kritisch, es sind vielmehr die Achsbewegungen zwischen den Endpunkten, die häufig zu Kollisionen führen.

Eine reine Definition der inversen Kinematik, also der geometrischen Zwangsbedingungen der einzelnen Achsen, besitzt für mehrachsige Systeme unter Umständen mehrere Lösungen (Bild 12). Aus diesem Grund bieten verschiedene Simulatoren die Möglichkeit, direkt auf die Bahnplanungsalgorithmen der simulierten Steuerungen zuzugreifen. Hierfür gibt es zwei unterschiedliche Lösungsmöglichkeiten. Bei dem als *Online* zu be-

zeichnenden Ansatz erfolgt die gesamte Bewegungsplanung und Simulation auf einer realen Robotersteuerung, die die berechneten Sollwerte nicht an die Achsregler ausgibt, sondern über eine entsprechende Schnittstelle in der Simulation visualisiert. Alternativ dazu ist natürlich auch eine direkte Visualisierung der realen Achsbewegungen möglich (z.B. [33]). Nachteilig an dieser Lösung ist, dass hierfür eine eigene Steuerung verwendet werden muss, die, je nach Leistungsfähigkeit, während des Simulationslaufs nicht anders verwendet werden kann. Somit sind die Vorteile die der Einsatz der Simulation erwarten lässt, nicht vollständig realisierbar. Im Gegenzug ist über den direkten Zugriff auf die Steuerung mit der Erstellung des Simulationsmodells gleichzeitig eine Online-Diagnose der gesamten Zelle zur späteren Laufzeit möglich.

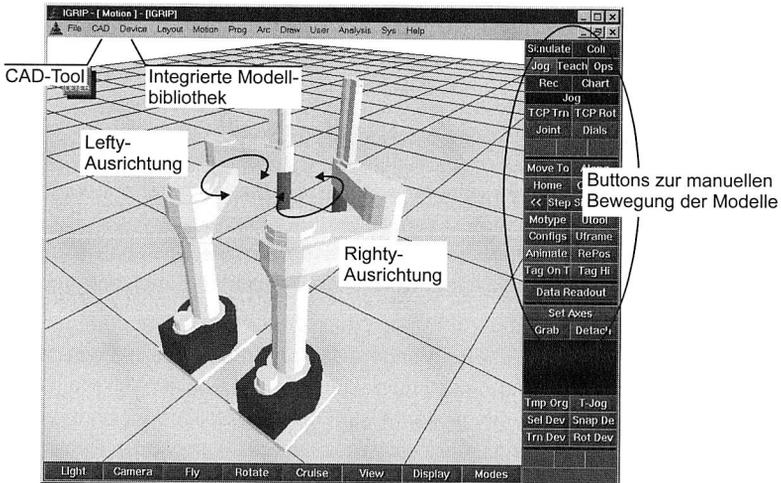


Bild 12: Unterschiedliche Achswinkel bei gleicher TCP-Koordinate durch geometrische Überbestimmung am Beispiel zweier AdeptONE-Scara-Roboter

Die zweite Gruppe von Simulatoren bildet die gesamten Bahnplanungs- und Regelalgorithmen nach. Wesentlicher Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der Möglichkeit, verschiedene Steuerungen verschiedener Hersteller gleichzeitig zu simulieren und somit eine heterogene Systemlandschaft abzubilden.

Schwingungen und Pendelbewegungen, die durch das Massenträgheitsmoment der bewegten Achsen zu Überschwingungen der Achsregler führen, sind aufgrund fehlenden Daten der Lagereger in der Simulation nicht darstellbar. Diese Problematik muss durch eine künstliche Störgröße in der Simulation nachgestellt werden. Für die überwiegende Mehrheit der Simulationsmodelle erreicht aber bereits die einfache kinematische Nachbildung der Robotersteuerung eine hinreichende Genauigkeit.

Nachdem in der Kinematiksimulation die gewünschten Programme erzeugt und mittels eines Post-Prozessors in die Maschinensprache der Robotersteuerung übersetzt und auf die Steuerung geladen wurde, führt der Roboter die zuvor programmierten Bewegungen durch. Diese Idealvorstellung ist in der Realität allerdings nur eingeschränkt realisierbar. Bedingt durch geometrische Abweichungen zwischen der virtuellen und der realen Zelle ist in der Regel ein Nachprogrammieren der Zielkoordinaten notwendig [34].

Dieses Problem ist bekannt und deshalb auch Gegenstand verschiedener Forschungsarbeiten. In [34] wird ein Verfahren zum automatischen Layoutabgleich mit einer Kinematiksimulation vorgeschlagen. Ausgehend von den eingefahrenen Roboterprogrammen soll die Lage der Bauteile zunächst auf den Roboter und von diesem auf die Zelle zurückgerechnet. Die so ermittelten Korrekturvektoren werden in das Simulationsmodell eingelesen und sollen die automatische Anpassung der Layoutkomponenten ermöglichen. Eine Umsetzung des Konzeptes ist jedoch noch nicht erfolgt.

An der TU Hamburg wurde mit ROSY (Robot Optimization System) ein Verfahren entwickelt, mit dessen Hilfe in einer vorhandenen Zelle sowohl eine Roboter-, eine Werkzeug- als auch eine Werkstückkalibrierung in kurzer Zeit durchgeführt werden kann. Neben der Verkürzung der Inbetriebnahmezeiten bei einem Tausch des Roboters erlaubt das Verfahren eine Optimierung des vorhandenen Simulationsmodells und so eine Reduzierung der Positions- und Lageabweichungen zwischen Simulation und Realität [35].

Es ist allerdings fraglich, ob diese und andere Verfahren die exakte Positionsbestimmung aller für die Durchführung der Montageaufgabe notwendigen Hilfsmittel wie Zuführeinrichtungen, Spannmittel etc. gewährleisten können. Sollte dies nicht mit absoluter Sicherheit gewährleistet sein, muss trotz der Unterstützung jeder Punkt vor dem Testlauf überprüft werden. Es ist deshalb immer im konkreten Einzelfall zu prüfen, ob die Verfahren einen Zeit- und somit Kostenvorteil mit sich bringen. Generell gilt, dass mit steigender Genauigkeit des Zellenmodells die Kosten für dessen Erfassung und Modellierung überproportional steigen, die Kosten für die Adaption an die reale Zelle jedoch bis zu einer bestimmten Genauigkeitsgrenze konstant sind.

Ungeachtet dieses Nachteils geht der Trend zunehmend zum Einsatz von Computersimulationen, da nur so eine vergleichsweise kostengünstige Möglichkeit vorhanden ist, Fertigungs- und Montageabläufe frühzeitig, also schon parallel zur Produktgrob- und -feinplanung zu testen und zu optimieren.

Ablaufsimulation

Ist die Optimierung der einzelnen Anlage Hauptziel der 3D-Simulation, so widmet sich die Ablaufsimulation größerer und komplexerer Produktionsabläufe. Mit ihr werden ganze Produktionsanlagen im Rechner abgebildet und hinsichtlich der Produktionsabläufe optimiert. Typische Anwendungsgebiete sind die Grobplanung des Layouts, der Logi-

stik, des Fertigungsprinzips und der Feststellung der Systemleistung. Weitere Anwendungsfelder liegen in der Entwicklung von Steuerungssoftware, der PPS sowie in der Optimierung von Steuerungsstrategien. [31]

Die wichtigste Unterscheidung zwischen beiden Systemen liegt in der Art der betrachteten Kennwerte. Erstere basiert auf direkt messbaren Maschinendaten wie Beschleunigungen, Geschwindigkeiten oder Reichweiten. Die so ermittelnde Taktzeit ist idealisiert, da in der Realität Maschinenstörungen und Materialengpässe auftreten können. Hier greift die Ablaufsimulation, die neben der, beispielsweise aus der Kinematiksimulation abgeleiteten, Bearbeitungszeit, die Anlagenverfügbarkeit als weiteren Parameter verwendet. Durch eine statistische Verteilung der empirisch ermittelten Werte für die MTBF und MTTR ergibt sich ein realistisches Bild der Gesamtverfügbarkeit des betrachteten Systems und somit auch eine Abschätzung der zu erwartenden Ausbringungsleistung [31]. Um dies zu erreichen, laufen die Abläufe in der Ablaufsimulation mit einer höheren Geschwindigkeit als in der Realität.

Aufgrund der höheren Abstraktionsebene erfolgt in der Ablaufsimulation normalerweise keine 3D-Visualisierung der einzelnen Bearbeitungsstation, geschweige denn der dort laufenden Prozesse. Die Komponenten werden als Black-Box betrachtet, die definierte Ein- und Ausgabeparameter und Systemeigenschaften besitzt. Je nach Systemgrenze kann diese ein Roboter, ein Montagesystem oder sogar eine ganze Fabrikationsstätte sein.

2.4.2 Standardisierung von Programmiersprachen durch IEC 1131-3

Speicherprogrammierbare Steuerung stellen die Grundlage für die meisten Automatisierungsaufgaben dar. Zur Sicherung der Marktanteile entwickelten die großen Hersteller wie Siemens, Bosch und Allen-Bradley proprietäre, zueinander inkompatible Systemlösungen, die sich in der Gestaltung der Peripherieanschlüsse und Rückwandbusse zeigten. Der Wechsel von einem Steuerungshersteller zu einem anderen war jedoch nicht nur durch Hardware-Restriktionen problematisch, auch die Programmiersprachen waren zueinander inkompatibel.

Diese für den Kunden unbefriedigende Situation sollte mit der Normung von insgesamt vier verschiedenen Programmiersprachen in der IEC 1131-3 verbessert werden. Neben den klassischen SPS-Sprachen Anweisungsliste (AWL), Funktionsplan (FUP), und Kontaktplan (KOP) stellt insbesondere die Normierung des Pascal-Dialekts ST (Structured Text), eine Trendwende und ein Bekenntnis zu den Hochsprachen dar. Mit ST ist eine Sprache normiert, die einen sehr hohen Funktionsumfang (u.a. Arrays, Strukturen, mathematische und String-Funktionen) bietet [36]. Bedingt durch die unterschiedlichen Funktions- und Leistungsumfänge ist zwar nach wie vor kein direkter Austausch der Programme zwischen den einzelnen Steuerungsherstellern möglich, mit geringen Anpassungen kann aber zumindest der Quellcode wieder verwendet werden. Darüber hinaus bieten manche Hersteller die Möglichkeit, verschiedener Programmteile in unterschiedliche Sprachen zu entwickeln und so bestehende Routinen ohne Anpassung di-

rekt zu übernehmen. Eine Konvertierung zwischen den genormten Sprachen untereinander ist aufgrund der unterschiedlichen Sprachumfänge nicht möglich. So gibt es beispielsweise für die von ST unterstützten Arrays keine Entsprechung in AWL [37].

Die Verwendung einer IEC 1131-3 konformen Steuerung stellt die Erweiterung der Flexibilitätserfordernisse dar. Zur Steigerung der Nachfolge- und externen Flexibilität ist die Verwendung eines einheitlichen Steuerungskonzeptes notwendig. Hier bietet die Verwendung einer gemeinsamen Programmiersprache vielfältige Vorteile.

2.4.3 OPC - OLE for Process Control

Aktuell ist ein Trend weg von klassischen speicherprogrammierbaren Steuerungen hin zu PC-basierten Lösungen erkennbar. Erste Umsetzungen bestanden aus einem, in den PC integrierten, separaten Steuerrechner. Mittlerweile ist die Leistungsfähigkeit der verwendeten Hardware so hoch, dass auch Echtzeitanwendungen wie Achsregler mit PC-basierten Steuerungen realisiert werden. Ein wesentlicher Vorteil dieser Systeme ist die Möglichkeit, Prozessdaten direkt am Bildschirm zu visualisieren, in Office-Anwendungen wie MS-Excel weiterzuverarbeiten oder über standardisierte Datenbank-schnittstellen wie JDBC und ODBC für eine spätere Dokumentation zu sichern.

Für Anbieter von Systemen zur Prozess- und Anlagenvisualisierung (HMI, SCADA, etc.) bestand ursprünglich das Problem, dass unterschiedlichste Geräte mit der Visualisierungs- und Archivierungssoftware Daten austauschen mussten, es hierfür aber kein einheitliches Schnittstellenmodell gab. Nahezu jedes Gerät verlangte nach spezifischen Treibern, die unter Umständen nicht kompatibel zu denen anderer Geräte waren. Somit war es erforderlich, für jede Kombination von Gerät und Anwendung einen speziellen Treiber zu entwickeln. Dies bedingte nicht nur einen erheblichen Entwicklungsaufwand, auch die Kompatibilität zwischen verschiedenen Treibern war teilweise nicht gegeben. Dieser Zustand war aber nicht nur für die Anbieter unbefriedigend, er hatte auch Nachteile für die Anwender. Sie legten sich oft auf einen einzigen Anlagenanbieter fest, da der Aufwand für die Schulung der eigenen Mitarbeiter und der Einsatz unterschiedlicher Steuerungen nicht wirtschaftlich war. Es lag deshalb im Interesse beider Seiten, eine einheitliche Schnittstelle zum Austausch von Prozessdaten zu schaffen.

1995 gründeten die Firmen Fisher-Rosemount, Intellution, Intuitive Technologie, Opto22 und Rockwell Software die OPC Task Force, die das Ziel hatte, einen herstellerunabhängigen Zugriff auf Daten beliebiger Automatisierungskomponenten zu ermöglichen (Bild 13). OPC ist die Abkürzung für OLE for Process Control und verdeutlicht somit schon in seinem Namen die Fixierung auf die Microsoft-Technologie OLE und somit zwangsläufig auch auf Microsoft-Windows als Betriebssystem. Bereits im Dezember des gleichen Jahres veröffentlichte die Task Force einen ersten Entwurf der Spezifikation [38]. Damit ging die interne Strategie auf, unter Umgehung der Standardisierungsgremien in kürzester Zeit einen einheitlichen Standard zu definieren.

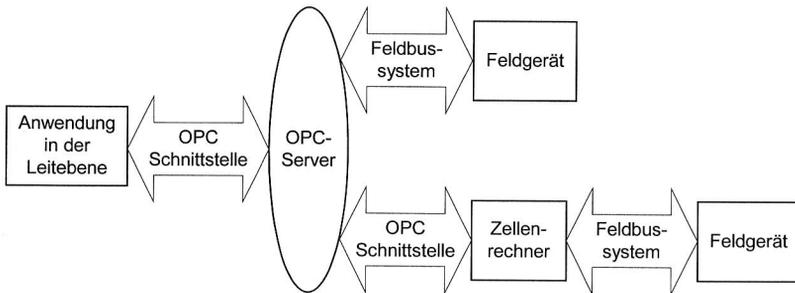


Bild 13: Einsatzmöglichkeiten eines OPC-Servers - Direkte Verbindung zum Feldgerät oder über einen Zellenrechner

Ziel von OPC ist der herstellerunabhängige Zugriff auf Daten aus beliebigen Automatisierungskomponenten (Bild 13). Es wurde hierfür eine Spezifikation geschaffen, die für den Datenaustausch zwischen einer Datenquelle (OPC-Server) und einer Datensenke (OPC-Client) eine einheitliche COM-Schnittstelle definiert. Da sowohl alle modernen Applikationen als auch Programmiersprachen diese Schnittstellendefinition unterstützen, ist eine einfache Möglichkeit geschaffen, von klassischen Microsoft Office Applikationen wie Word oder Excel auf Prozess- und Programmvariablen in PC-basierten Steuerungen zuzugreifen. Eine von einer Fachzeitschrift durchgeführte Befragung ergab, dass 55% Prozent der Teilnehmer gerade in dieser Offenheit den Vorteil PC-based Control sehen [39].

OLE (mittlerweile erfolgte die Umbenennung in ActiveX) ist eine von Microsoft entwickelte Technologie, die auf den Komponentenmodellen COM (Component Object Model) bzw. auf DCOM (Distributed-COM) aufbaut. Durch die Verwendung von DCOM ist OPC automatisch netzwerk- und multiclientfähig. Dies bedeutet, dass die Datenquellen und -senken nicht auf einem einzigen Rechner installiert sein müssen, sondern sich beliebig im Netzwerk befinden können. Insbesondere die außerordentlich komplexen Themen Zugriffsrechte und Authentifizierung, die die Automatisierungstechnik nach wie vor Probleme stellt, werden dem Entwickler hierdurch komplett abgenommen.

Zusammengefasst bietet OPC folgende Vorteile für Anbieter und Anwender (Bild 14):

- Wegfall von Hersteller- und Geräteabhängigkeiten,
- Multi-Client-Zugriff,
- Netzwerkfähigkeit.

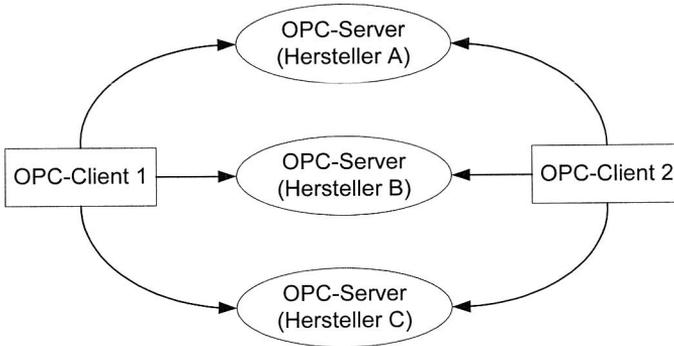


Bild 14: OPC erlaubt einen herstellerunabhängigen und synchronen Zugriff mehrerer Clients auf mehrere Server (n:m)

Durch die hohe Bedeutung und die vielfache Verwendung, die OPC für das, im Rahmen dieser Arbeit entwickelte, Steuerungskonzept besitzt, erfolgt nachfolgend eine etwas detailliertere Betrachtung der OPC-Technologie.

Der Zugriff auf einen Prozesswert, in der OPC-Syntax *Item* genannt, erfolgt über die in Bild 15 dargestellte dreistufige Objekthierarchie. Will ein Client auf einen bestimmten Prozesswert zugreifen, so muss er sich zunächst mit dem zugeordneten Server verbinden. Das Server-Objekt, das mit einem lokal-eindeutigen Namen z. B. `4Control.OnlineServer` gekennzeichnet ist, steht an der obersten Stelle der Objekt-Hierarchie. Da diese Kennung vom Hersteller vergeben wird, besitzen verschiedene Rechner unter Umständen den gleichen Server-Namen. Für den Zugriff über ein Netzwerk ist jedem OPC-Server daher zusätzlich eine weltweit eindeutige Class ID (CLSID) zugeordnet [40].

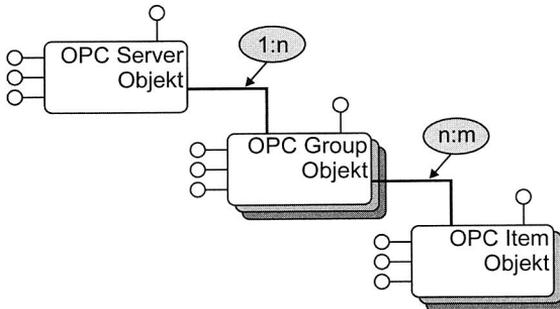


Bild 15: Die dreistufige OPC-Objekthierarchie (nach [41])

Theoretisch wäre nun der Zugriff auf einzelne Prozessvariablen möglich. Für die Prozessüberwachung und -steuerung ist jedoch nicht ein einzelner Wert ausreichend, son-

dem, es müssen z.B. bei SCADA-Systemen hunderte von Einzelwerten ausgewertet werden. Eine sequentielle Abfrage würde aufgrund des notwendigen Protokoll-headers nur mit erheblichen Zeitverzögerungen möglich sein. Die Spezifikation von OPC sieht deshalb vor, dass einzelne Items zunächst zu Gruppen zusammengefasst und diese jeweils komplett an den Client übertragen werden. Eine Gruppe kann sowohl vom Server angeboten, als auch vom Client erzeugt werden. Die Identifizierung erfolgt dabei über einen lokal-eindeutigen Namen. Ein besonderer Vorteil von OPC ist, dass die gesamte Verwaltung der Gruppen und Items dynamisch zur Laufzeit erfolgt. Es können somit neue Items hinzugefügt oder gelöscht werden, ohne dass ein Neustart des Servers oder der Clients notwendig wäre. Durch die Multi-Server-Fähigkeit kann ein Item Mitglied mehrerer Gruppen sein.

Neben dem schon erwähnten, klassischen Client/Server-Modell ist in der Spezifikation auch ein Publisher/Subscriber-Modell definiert. Bei dieser Methode meldet der Server automatisch jede Änderung des beobachteten Prozesswertes an alle „Abonnenten“ ([engl.] to subscribe = abonnieren). Die Verwendung dieses Modells ist bei sich zeitlich diskret ändernden Prozesswerten, wie sie beispielsweise in der Materialflusssteuerung vorkommen, sinnvoll. Durch die Ereignisorientierung muss der Client nicht permanent den Server pollen, was zu einer erheblichen Netzlast und somit zu Performanceeinbußen führen würde.

Die Leistungsfähigkeit einer Softwarelösung ist jedoch nicht primär von der Implementierungsseite zu untersuchen, sondern von der Seite des Realbetriebes. Denn nur wenn sich hier eine Technologie performant zeigt, dann ist sie auch geeignet, die potentiellen Anbieter und Anwender zu überzeugen. Eine Untersuchung zur Leistungsfähigkeit von OPC hinsichtlich einer deterministischen Datenübertragung in verteilten Rechnerarchitekturen hat die sehr gute Eignung dieser Technologie auch für die Verarbeitung großer Datenmengen bestätigt [42].

Ein noch bestehender Schwachpunkt von OPC ist die Beschränkung auf einfache Variablen-Typen wie String oder Integer. Dieser ist von der OPC-Foundation bewusst in Kauf genommen worden, um zunächst so schnell wie möglich eine funktionierende Grundlage zu schaffen. Derzeit arbeitet die so genannte Complex Data Working Group der OPC Foundation an einer Erweiterung des OPC-Standards, um die Übertragung von Feldern und Strukturen zu erlauben. Betrachtet man die herstellerübergreifende Akzeptanz von OPC (mittlerweile sind in der OPC Foundation über 270 Unternehmen Mitglied) so ist dieses Manko scheinbar, verglichen mit den Vorteilen, nicht relevant. [38]

Das Programmiermodell von OPC unterstützt sowohl direkte COM-Aufrufe, wie sie beispielsweise mit VC++ erzeugt werden können, als auch so genannte Automation-Klassen, die eine einfache Integration in die mittlerweile sehr populäre Sprache Visual Basic erlauben.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass mit OPC eine bisher einmalige, weit verbreitete Schnittstelle geschaffen wurde, die sich durch ihre leichte Implementierung und gute Performance auszeichnet. Deshalb wird diese Technologie in der entwickelten Komplettmontagezelle überall dort eingesetzt, wo es gilt, über Rechner- und Systemgrenzen hinweg Daten auszutauschen.

2.5 Auswirkungen neuer Materialien und Füge-technologien

Aktuelle Veränderungen im Bereich der Montagetechnik sind nicht durch wirtschaftliche Gesichtspunkte bedingt, auch gesetzliche Vorgaben wirken sich auf die Gestaltung der Montagesysteme aus. Ein Beispiel hierfür ist der so genannte Flottenverbrauch, also die Festlegung des maximalen Durchschnittsverbrauchs der Fahrzeuge eines Herstellers. Bereits im Jahre 1990 haben sich die Automobilhersteller gegenüber der damaligen Bundesregierung verpflichtet, die Gesamt-CO₂-Emission bis zum Jahr 2005 um 25% bezogen auf den Wert von 1990 zu reduzieren [3]. Neben technologischen Optimierungen an den Motoren verspricht insbesondere der konsequente Leichtbau signifikante Einsparungen im Kraftstoffverbrauch. Als Daumenwert gilt, dass eine Gewichtseinsparung von 100 kg den Kraftstoffverbrauch um 1 l pro 100 km senkt [43].

Der Begriff Leichtbau fasst die verschiedenen Aspekte des gewichtsoptimierten Gestaltens und Konstruierens zusammen. Übergeordnetes Ziel ist dabei, aus funktionalen oder ökonomischen Gründen das Gewicht zu reduzieren oder zu minimieren, ohne die Tragfähigkeit, die Steifigkeit oder andere Funktionen der Konstruktion zu schmälern [43]. In der Literatur werden mehrere Leichtbaustrategien unterschieden, wobei die Einteilung nach Form-, Stoff- und Strukturleichtbau die weitesten Verbreitung hat [44].

Eine ganzheitlich optimierte Produktgestalt ist aber nur durch eine Kombination aller drei Leichtbaustrategien möglich. Beispielhaft hierfür sind Kunststoff-Metall-Hybrid-Verbunde, bei dem Metallbleche in das Spritzgusswerkzeug eingelegt werden und eine formschlüssige Verbindung der Kunststoffschmelze mit dem Metallträger stattfindet. Die höhere Festigkeit des Metalls erlaubt die Integration von Funktionsträgern wie Gelenken und Befestigungselementen ohne die hervorragenden Möglichkeiten des Urformens, Nachbearbeitens und Färbens des Grundwerkstoffes zu beeinträchtigen.

Die auf diese Weise entstandenen Integralbauteile weisen neben der hohen Funktionsintegration auch erhebliche Vorteile im Produktionsbereich auf. Einer Studie zufolge konnte durch den Einsatz eines hybriden Frontends beim Audi A4 fast 50% der erforderlichen Produktionsfläche eingespart werden [45].

Diese neuen Fertigungstechnologien erfordert jedoch auch angepasste, hochflexible Montagesysteme, da die großflächigen Module, die annähernd die Fahrzeugbreite aufweisen, von Systemlieferanten auftragspezifisch vormontiert und einbaufertig an das Endmontageband angeliefert werden müssen.

3 Konzeption der Komplettmontage als innovativer Ansatz für die Montage flächiger Bauteile

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die allgemeinen wirtschaftlichen und technologischen Trends im Bereich der Montagetechnik beleuchtet wurden, liegt der Fokus im folgenden auf der Produktgruppe der flächigen Teile, deren Entwicklung und Marktdurchdringung neben den schon angesprochenen neuen Materialien insbesondere durch neue Produktionskonzepte und der Reduzierung der Fertigungstiefe begünstigt wird. Bevor das Konzept der Komplettmontage vorgestellt wird, soll zunächst eine Übersicht über den Stand der Montagetechnik mit Bereich flächiger Bauteile gegeben werden. Nach einer Bewertung schließt sich die Definition des Begriffs Komplettmontage an.

3.1 Definition des Begriffes *flächig*

Bedingt durch die Komplexität unterschiedlicher Bauteile gibt es bislang noch keine verbindliche Definition des Begriffes *flächig*. Einen ersten Anhaltspunkt liefert die VDI-Richtlinie 3237 Blatt 1 [46]. In dieser ist die Klassifikation von Bauteilen anhand ihrer geometrischen Form und Ausdehnung festgelegt. Flachteile sind in die vier Unterkategorien ‚dünne unregelmäßige Flachteile‘, ‚dicke unregelmäßige Flachteile‘, ‚dünne Ronden‘ und ‚dicke Ronden‘ eingeteilt, die wiederum in Abhängigkeit ihrer größten Koordinate in vier Subkategorien unterteilt sind. Die für die Montage relevanten Bauteilgrößen besitzen die Kennungen 516 und 518: Dünne, unregelmäßige Flachteile mit mittleren ($100\text{mm} < x < 1000\text{mm}$) und großen ($x > 1000\text{mm}$) maximalen Koordinaten [46]. In der Richtlinie sind allerdings keine Festlegungen zu den zulässigen Seitenverhältnissen der Bauteile vorgegeben.

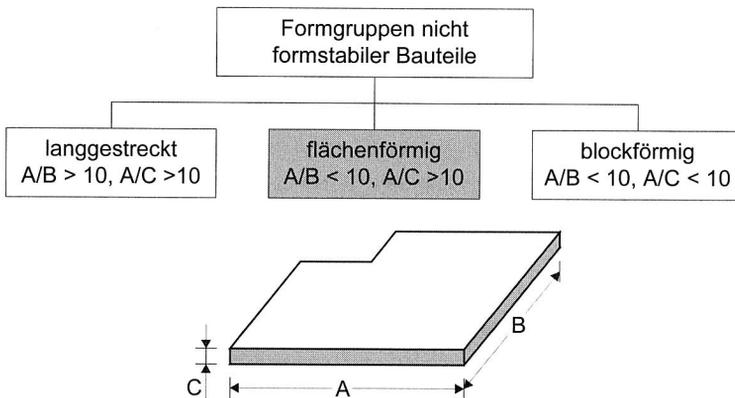


Bild 16: Klassifizierung flächiger Bauteile nach ihren Längenverhältnissen (nach [47])

Eine andere Definition findet sich in [47]. Dort erfolgt eine Klassifizierung nicht-formstabiler Teile nach dem Verhältnis ihrer Hauptabmessungen (vgl. Bild 16). Nach dieser besitzen flächenförmige Bauteile ein L/B-Verhältnis von maximal 10. Unberücksichtigt bleibt dabei allerdings die absolute Bauteilabmessung, so dass streng genommen auch ein Geldstück als flächig zu bezeichnen ist. Dies entspricht jedoch nicht dem Allgemeinverständnis des Begriffes.

Um eine eindeutige Begrifflichkeit für den weiteren Verlauf der Arbeit zu schaffen, wird im folgenden eine Kombination aus der VDI-Richtlinie 3237 und der Definition von [47] geschaffen:

Definition 1: flächiges Bauteil

Ein flächiges Bauteil ist ein dünnwandiges, offenes Werkstück (Flachteil), das die Voraussetzungen der VDI-Richtlinie 3237 Blatt 1 erfüllt und für dessen Seitenlängen A, B und C zusätzlich folgende Beziehungen gelten:

$$A, B > 100 \text{ mm}$$

$$A/B < 10$$

$$A/C > 10$$

Auf dem Werkstück eingebrachte oder befestigte Funktionsträger wie Gelenkaufnahmen, Sicken etc. finden in dieser Definition keine Berücksichtigung, da sie das grobe Erscheinungsbild und somit die Struktur des Bauteils nicht beeinflussen.

3.2 Bauformen flächiger Produktstrukturen

Die Herstellung des flächiges Teils an sich stellt meist nur den ersten Schritt im gesamten Produktionsprozess dar. Zur Komplettierung ist es erforderlich, entweder weitere Funktionsträger und Komponenten auf oder in das Bauteil einzubringen oder aber das Bauteil in eine größere Funktionseinheit zu montieren. Deshalb ist es nötig die Definition 1 zu erweitern:

Definition 2: flächiges Basisteil

Ein flächiges Basisteil besteht aus einem oder mehreren flächigen Bauteilen, die durch Anwendung von Fügeverfahren zu einer Baugruppe komplettiert wurden. In dieses können weitere flächige oder nicht-flächige Bauteile und Baugruppen gefügt werden.

Betrachtet man die in Bild 17 dargestellten Baugruppen, so lassen sich diese, bezogen auf ihren Aufbau in drei Gruppen aufteilen. Zur Verdeutlichung werden typische Bauteile aus dem Bereich der Automobiltechnik als Beispiele angeführt:

- Aufbau aus nicht flächigen Bauteilen und -gruppen**
 Zu dieser Kategorie zählt beispielsweise das Lamellenschiebedach der Mercedes A-Klasse. Es ist aus einzelnen, nicht flächigen Bauteilen zusammengesetzt, muss aber bei der Montage am Band als flächiges Bauteil gehandhabt werden [48].
- Flächiges Basisteil mit nicht-flächigen Bauteilen und -gruppen**
 Aufgrund der Variantenvielfalt, die im Bereich der Türbedienelemente existiert, werden diese Komponenten auf dem so genannten Türmodul vormontiert. Dieses flächige Blechteil trägt zum einen die gesamte Türmechanik, die u.a. aus Fensterheber und Türschloss besteht. Zum anderen befinden sich die elektrischen Bauteile und variantenspezifischen Kabelbäume für den Anschluss von Fensterheber und Zentralverriegelung auf dem Türmodul. Je nach gewünschter Ausstattungsvariante wird diese Baugruppe beim Zulieferer vormontiert und am Montageband in die Fahrzeugtür eingesetzt.
- Aufbau aus flächigen Bauteilen und -gruppen**
 Die letzte Aufbauform stellt die Kombination flächiger Bauteile zu einer flächigen Baugruppe dar. Dieses Vorgehen findet sich beispielsweise bei der Montage der Heckklappen und Fahrzeugtüren. Neben dem Verkleben der Heckscheibe sind weitere mechanische und elektrische Komponenten auf dem Grundträger zu befestigen.

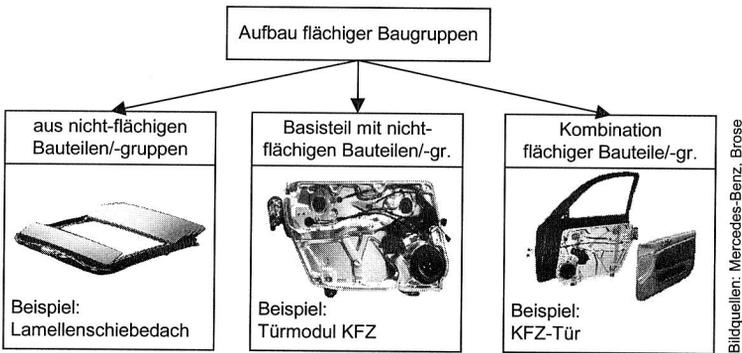


Bild 17: Einteilung flächiger Bauteile nach ihrem Aufbau

In der Konsumgüterindustrie finden sich weitere Beispiele für flächige Bauteile und -gruppen. Zu den wichtigsten Bereichen neben der Automobilindustrie zählen die Artikel der so genannten ‚weißen Ware‘, also die Haushaltstechnik wie Kühlschränke, Herde, etc. Darüber hinaus sind auch die Luftfahrt, die Bau- und die Möbelbranche Industriebereiche in deren Bereiche flächige Bauteile auftreten [49, 50, 51, 52].

3.3 Marktpotentiale flächiger Produkte

Die Marktpotentiale flächiger Bauteile, oder genauer die Forderung nach deren Herstellbarkeit stiegen in den letzten Jahren signifikant. Ausschlaggebend hierfür waren zwei Entwicklungen. Zum einen die Entwicklung von immer leistungsfähigeren Werkstoffen und zum anderen der Trend weg vom einfachen Zulieferer hin zum Systemlieferanten.

Wurden in den 70er und 80er Jahren Kraftfahrzeuge mit einer hohen Eigenfertigungs- und Montagetiefe hergestellt, so führte der Kostendruck in den letzten Jahrzehnten zu einer deutlichen Reduzierung der Produktionstiefe [53]. In einer ersten Stufe fertigten die Zulieferer Kunststoff- und Stanzteile mit Werkzeugen, die sich weiterhin im Eigentum des KFZ-Herstellers befanden. Dies hatte den Vorteil, dass dieser das Know-How der Werkzeugherstellung nicht aus dem Haus gab und nur geringe Abhängigkeiten zum Zulieferer existierten. Bei Problemen mit diesem konnte das Werkzeug zu einem Wettbewerber verlagert werden und die Produktion lief weiter. Die zweite Stufe dieser Entwicklung führte zu einer engeren Bindung des Zulieferers an den Kunden. Sie entwickelten eigenständig Komponenten als Black-Box. Der Kunde gab die Einbauverhältnisse und Schnittstellen vor, die restliche Entwicklung erfolgte beim Zulieferer.

Die logische Fortsetzung dieser bilateralen Beziehung stellt die Entstehung von Systemlieferanten dar. Hier fertigt der Zulieferer nicht mehr lediglich ein Bauteil, das am Montageband in das KFZ eingebaut wird, sondern er liefert komplette Baugruppen am Band an. Diese, mitunter sehr komplexen Module werden häufig mit einer nur sehr kurzen Vorlaufzeit variantengenau („Just in Sequenz“) an das Montageband angeliefert. Schätzungen gehen davon aus, dass spätestens im Jahr 2010 die Zulieferer 50% des Entwicklungsumfangs bei der KFZ-Entwicklung tragen werden [53].

Insbesondere das so genannte Türmodul als Träger der gesamten Türelektronik und -mechanik [54] und das Front-End [45] mit der Beleuchtungstechnik, dem Kühler und anderer Komponenten sind sehr gute Beispiele für die Komplexität und Variantenvielfalt der Baugruppen, deren gesamte Entwicklung oft an Systemlieferanten vergeben wird. Insbesondere in [45] sind anhand eines Front-Ends die enormen Kostenpotentiale dargestellt, die in dem Einsatz flächiger, vormontierter Module liegen.

3.4 Bisherige Lösungsansätze für die Montage flächiger Baugruppen

Bei der Montage von flächigen Baugruppen ist, wie in den anderen Bereichen auch, prinzipiell zwischen der manuellen, der hybriden und der automatisierten Montage zu unterscheiden. Dabei ist zum einen festzustellen, dass in der Industrie in diesem Bereich nach wie vor die manuelle Montage dominiert. Zum anderen wurden bislang auch nur wenige Konzepte für die Automatisierung von Teilbereichen veröffentlicht. Nachfol-

gend werden exemplarisch verschiedene realisierte Lösungsansätze aus Industrie und Forschung vorgestellt.

3.4.1 Manuelle Montage

Der Vorteil der manuellen Montage liegt neben der hohen Flexibilität der Werker auch in der Komplexität der Montageaufgaben, die zum Teil nur schwer und wenn, dann nur mit einem erheblichen Kostenaufwand zu automatisieren sind. Steigende Anforderungen hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Montageverbindungen und deren Überwachung und Dokumentation unterstützten jedoch den Trend hin zur Automatisierung [55].

Aufgrund der Bauteilabmessungen flächiger Teile ist die manuelle Montage in vielen Fällen als Werkstatt- oder Baustellenmontage realisiert, bei der die Baugruppe für die Montagedauer nicht zwischen den verschiedenen Montagestationen bewegt wird. Auch wenn die Problematik der ungünstigen Ergonomie durch eine geschickte Gestaltung der Arbeitsumgebung reduziert werden kann, so ist die Handhabung der montierten Baugruppen ein nach wie vor bestehendes Problem. Nach §5 des Arbeitsschutzgesetzes (ArbSchG) besteht eine grundsätzliche Pflicht des Arbeitgebers zur Beurteilung der Arbeitsbedingungen in seinen Unternehmungen. Muss ein Mitarbeiter manuell Lasten heben, so hat der Arbeitgeber Maßnahmen zu treffen, dass die gesundheitliche Gefährdung so gering wie möglich bleibt. Beschäftigt der Betrieb mehr als 10 Mitarbeiter, so sind die Untersuchungen die daraus abgeleiteten Maßnahmen und insbesondere deren Wirksamkeit zu dokumentieren [56]. Hierfür hat das Bundesamt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin einen Leitfaden veröffentlicht, der die Beurteilung von manuellen Hebevorgängen ermöglicht. So kann es bereits beim 40-maligen, täglichen Heben einer Last von 10 kg bei Männern zu einer gesundheitlichen Beeinträchtigung kommen. Eine geeignete, jedoch kostenintensive Gegenmaßnahme sind Hebehilfen, die die gewünschte Flexibilität des Werkers und des Arbeitsplatzes insofern einschränken, als dass am Werkstück geeignete Greifpunkte vorhanden sein müssen.

Eine Montagelinie für die manuelle Montage von Türmodulen ist in [57] beschrieben (Bild 18). Sie ist für acht verschiedene Grundtypen mit insgesamt ca. 100 Varianten ausgelegt, die von bis zu sieben Werkern montiert werden. Zusammen mit den Prüfplätzen besteht das System aus 14 verschiedenen Stationen, die konform zu den Arbeitsschutzrichtlinien über ein deckengebundenes Transportsystem miteinander verkettet sind. Die Einführung dieser Transport- und Hebehilfen wirkt sich jedoch direkt auf die Flexibilität und das Investitionsvolumen aus.

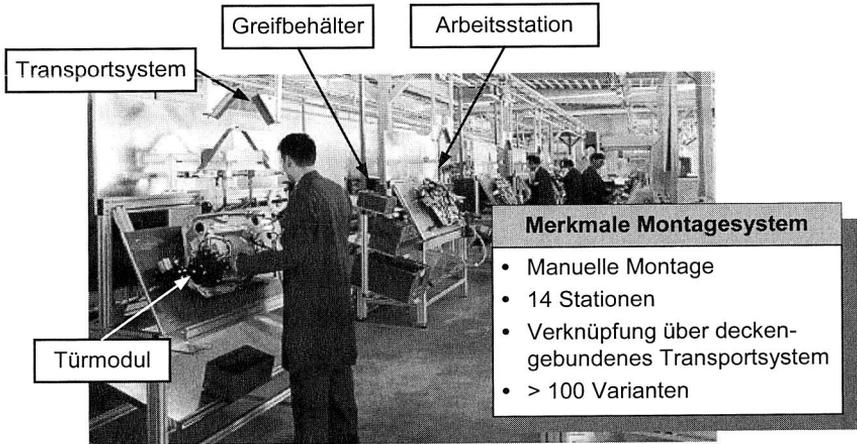


Bild 18: Beispielhaftes Montagesystem für die manuelle Montage von Türmodulen als ein Vertreter der zweiten Aufbauform flächiger Baugruppen [57]

Wesentlich größere Bauteile, wenn auch nicht zwangsweise flächiger Natur sind im Flugzeugbau zu montieren. Auch in diesem Umfeld dominiert die manuelle Montage, wobei verschiedene Anlagen als hybride Systeme ausgeführt sind. Diese Vermischung bereitet nach [4] erhebliche Probleme. Die Autoren schlagen aus diesem Grund eine strikte Trennung der manuellen und automatischen Arbeitsinhalte vor, wobei „alle wirtschaftlich zu automatisierenden Arbeitsgänge in einer Montagezelle“ [4] zusammengefasst werden sollen. Über die Struktur und die Anforderungen an eine solche Zelle sind in dem Beitrag keine Aussage enthalten.

3.4.2 Automatisierte Montage

In der Literatur sind bislang wenige Arbeiten zur Montageautomatisierung flächiger Bauteile zu finden. So konnten beispielsweise nur zwei industrielle Applikationen gefunden werden. Alle anderen Arbeiten kamen über eine prototypenhafte Umsetzung im Labor nicht hinaus.

In [49] ist der Aufbau einer vollautomatischen Beschlagmontage im Fensterbau beschrieben. Die zu montierenden Fensterrahmen besitzen maximale Abmaße von 2500 mm x 4000 mm. Die Herausforderung der Anlage besteht neben der Realisierungen von Losgröße 1 in der variablen Position der Beschläge. Durch die Anbindung der Robotersteuerung an einen übergeordneten Leitreechner lassen sich die Roboterprogramme dynamisch erzeugen und müssen nicht in der Robotersteuerung vorgehalten werden. Die Zuführung der für die Montage benötigten Bauteile ist zweigeteilt. C-Teile wie Schrauben und Beschläge werden über Sortierförderer zugeführt, während A- und B-Teile mittels KLT-Paletten sortiert angeliefert und bereitgestellt werden. Die Positio-

nierung der Fensterrahmen im Arbeitsraum der eingesetzten Vertikal-Knickarmroboter ist über einen Drehtisch realisiert.

Ein weiterer Einsatzbereich liegt nach [58] im automatisierten Schweißen von Industrieschiebetoren. Zur Vergrößerung des Arbeitsraums wurde in diesem Beispiel ein Kuka KR125 um drei externe, numerisch gekoppelte Achsen erweitert. Das flexible Anlagenkonzept erlaubt eine auftragsbezogene Einzelfertigung verschiedenster Abmaße. Eine vergleichbare Applikation ist in [59] beschrieben. Thema ist die Einsatzmöglichkeit zweier Handhabungsgeräten zum parallelen Schweißen bei der Herstellung von Schiffsrümpfen.

Im Bereich der Montage und Demontage von Kraftfahrzeugen beschäftigten sich Forschungsarbeiten mit Problemstellungen der Montage von Dichtgummis für Fahrzeugtüren [60] und der automatisierten Demontage von Fahrzeugdächern [51]. Durch den Einsatz mehrerer Industrieroboter wurde eine Auseinandersetzung mit der Größe des benötigten Arbeitsraumes vermieden. Es ist deshalb mit erheblichen Investitionskosten für die redundante Ausstattung mit Handhabungsgeräten zu rechnen. Das wichtige Thema der Programmierung der idealen (De-) Montagesequenz in Verbindung mit einer Kollisionsvermeidung findet sich in der Arbeit nicht.

Götz [47] geht in seiner Arbeit „Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montage-systeme für flächige Bauteile“ insbesondere auf die Gestaltung so genannter Flächen-greifer ein, die für die Handhabung flächiger, forminstabiler Komponenten wie Abdicht-folien und Teppichböden in der PKW-Endmontage Einsatz finden können. Darüber hin-aus gibt er eine Anleitung für die strukturierte Planung von automatisierten Montagean-lagen. Er begrenzt sich in diesem Zusammenhang aber auf die theoretische Beschrei-bung der Planung und klammert wichtige Themen wie Steuerung, Auswahl der Hand-habungsgeräte und Anlagenlayout aus. Wie im Verlauf der Arbeit noch gezeigt werden wird, ist diese für flächige Bauteile jedoch von entscheidender Bedeutung.

Weitere Arbeiten widmen sich lediglich Teilproblemen wie der Handhabung (z.B. [61, 62, 63, 64]), Kompensation von Toleranzen bei der Montage [65] beziehungsweise der Herstellung [50] flächiger Bauteile.

3.4.3 Bewertung der Montagelösungen

Es konnte gezeigt werden, dass die bislang realisierten Montageanlagen für flächige Teile in der Regel speziell für genau eine Montageaufgabe ausgelegt sind. Aspekte wie Mengen- oder Variantenflexibilität der Produkte spielen in diesem Zusammenhang ein lediglich untergeordnete Rolle. In der Literatur finden sich vergleichsweise wenige Ar-beiten, die sich mit der automatisierten Montage von flächigen Bauteilen beschäftigen. Zusammenfassend ergeben sich bei den betrachteten Anlagen folgende Schwach-punkte:

- *Materialfluss/Logistik*

Der zelleninterne Transport flächiger Bauteile ist aufgrund ihrer Abmessungen und der teilweise vorhandenen geringen Biegesteifigkeit problematisch. Erfolgt der Transport flurgebunden, so werden wertvolle Bodenflächen für den nicht-wertschöpfenden Transportvorgang benötigt. Auch eine deckengebundene Lösung wie in [57] ist nicht optimal, da zum einen geeignete Befestigungsmerkmale auf dem Bauteil ausgeprägt sein müssen, zum anderen durch arbeitsschutzrechtliche Bestimmungen entsprechende Sicherungen gegen herunterfallende Teile vorgeschrieben sind.

- *Automatisierungsgrad*

In der industriellen Praxis existieren bislang keine durchgängigen Konzepte für die Montageautomatisierung flächiger Bauteile, obwohl durchaus ein Bedarf festzustellen ist [55]. Bedingt durch die notwendigen großen Arbeitsräume und resultierenden Gewichtskräfte sind klassische Handhabungsgeräte und Industrieroboter nur bedingt für die Montage geeignet.

- *Flexibilität*

Die in der Literatur beschriebenen Ansätze zur automatisierten Montage zeichnen sich durch eine sehr geringe Variantenvielfalt aus und haben darüber hinaus das Forschungsstadium noch nicht verlassen. Dies ist auch daran zu sehen, dass lediglich die Methodik dargestellt wird und die Anpassungsfähigkeit der Systemlösung nur einen geringen Stellenwert besitzt.

3.5 Komplettmontage - Begriffsdefinition und Anforderungen

Die Bewertung der bisherigen Ansätze für die automatisierte Montage von flächigen Bauteilen zeigt, dass auf diesem Gebiet erhebliche Defizite hinsichtlich der Flexibilität der angebotenen Lösungen bestehen. Dies ist um so erstaunlicher, als doch die erheblichen Potentiale des Leichtbaus und der innovativen Materialkombinationen zu einer Modulbildung in der Zuliefererkette führen, die mit konventionellen Montagesystemen nicht mehr rationell herstellbar sind.

Aus diesem Grund wurde mit der so genannten *Komplettmontage* ein neuer Ansatz entworfen, der die automatisierte Montage dieser Bauteile mit einer hohen Varianten- und Stückzahlflexibilität erlaubt. In der Literatur erscheint der Begriff *Komplettmontage* insbesondere im Zusammenhang mit den traditionell von manuellen Tätigkeiten geprägten Baustellen- und Werkstattmontagen. Diese Montageform wird überall dort eingesetzt, wo große, schwer zu transportierende Produkte zu fertigen und zu montieren sind, die sich aufgrund der Stückzahlen und/oder der Anzahl der Varianten nicht für eine Automatisierung eignen. Komplettmontage bezeichnet in diesem Kontext die Durchführung aller Montagetätigkeiten ohne dass das Produkt von einem Arbeitsplatz zum nächsten bewegt wird. Die gesamte Montage des Bauteils erfolgt an einer zentra-

len Stelle, zu der die benötigten Komponenten in der entsprechenden Stückzahl angeliefert werden.

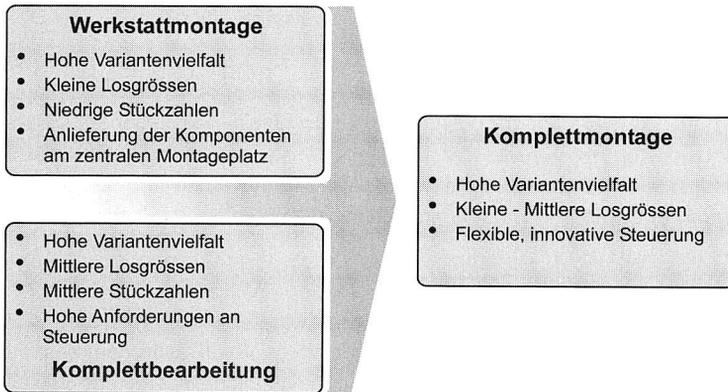


Bild 19: Ableitung der Komplettmontage aus der Werkstattmontage und der Komplettbearbeitung

Ein ähnlicher Begriff existiert in der spanenden Fertigung mit der *Komplettbearbeitung*. Vergleichbar mit der Montage wird darunter die Durchführung aller, für die Fertigstellung eines Bauteils nötigen *spanenden* Verfahren wie Drehen, Fräsen oder Bohren innerhalb einer einzigen Maschine beschrieben [66]. Die Herausforderung bei der Entwicklung dieser Maschinen liegt in der mechatronischen Integration verschiedenster Technologien und Prozesse. Je mehr Antriebe in die Maschine zu integrieren sind, desto exakter muss der gesamte Aufbau des Maschinenbetts und der Führungen sein, um die sehr hohen Genauigkeiten, welche die Kunden bei der spanenden Fertigung fordern, erfüllen zu können. Darüber hinaus werden auch an die Steuerung erhöhte Ansprüche gestellt, da die Maschinen möglichst von niedrig qualifiziertem Personal bedienbar sein müssen. Die Komplettbearbeitung stellt somit sehr hohe Anforderungen an die gesamte mechatronische Gestaltung der Maschine.

Nachfolgende Definition stellt eine Kombination der Begriffe *Komplettbearbeitung* und *Werkstattmontage* dar:

Definition 3: Komplettmontage

Komplettmontage bezeichnet die automatisierte Montage eines flächenhaften Produktes in einer Aufspannung innerhalb einer Montagezelle ohne zusätzliche Zwischentransporte. Das Bauteil verlässt die Zelle erst nach Abschluss aller Montagevorgänge.

Die Komplettmontage stellt also die Kombination der aus der Werkstattmontage bekannten Konzepte und Verfahren mit den hohen Automatisierungsgraden der spanen-

den Fertigung dar. Nachfolgende Forderungen sind von einem geeigneten Systemkonzept zu erfüllen:

Forderung F1: Hohe Varianten- und Stückzahlflexibilität

Die Montagezelle soll eine hohe Varianten- und Stückzahlflexibilität aufweisen. Umrüstvorgänge sollen so weit wie möglich reduziert werden, damit auch die Montage von kleinen Stückzahlen bis hin zur Losgröße 1 wirtschaftlich realisierbar ist. Dies stellt die Voraussetzung für den Einsatz der Montagezelle in Industriebereichen wie der Kfz-Zulieferindustrie dar, die die Baugruppen Just-In-Sequence anliefern und somit nur sehr schwer größere Losgrößen vormontieren können.

Forderung F2: Geringe Taktzeit

Ausschlaggebend für den wirtschaftlichen Einsatz der Komplettmontage ist die Realisierung möglichst hoher Stückzahlen. Durch den Wegfall von Zwischentransporten und Wartezeiten an den einzelnen Stationen ist die reine Durchlaufzeit eines Bauteils durch die Komplettmontage tendenziell geringer als bei einer klassischen Linienfertigung. Anders sieht es bei der Betrachtung der Durchlaufzeit eines gesamten Loses aus. Hier ist bei der Komplettmontage die Gesamtdurchlaufzeit des kompletten Loses direkt proportional zu der Losgröße. Bei einer starr getakteten Linienmontage hingegen ist die Taktzeit durch den langsamsten Teilprozess bestimmt.

Forderung F3: Flexible, offene Steuerung

Ein wesentlicher Anspruch der Komplettmontage ist, dass das Konzept für die Montage unterschiedlichster flächiger Produktstrukturen eingesetzt werden kann. Dies ist aber nur dann gewährleistet, wenn die entwickelten Komponenten lediglich eine geringe produktspezifische Ausprägung aufweisen.

Im Bereich der Steuerungssoft- und -hardware ist deshalb darauf zu achten, dass ausschließlich verbreitete Technologien wie Feldbussysteme, Protokolle wie TCP/IP oder Programmierstandards wie die IEC 61131-3 Verwendung finden. Nur auf diese Weise kann eine effiziente und kostengünstige Adaption an verschiedene Montageaufgaben und Robotersteuerungen erfolgen. Die Entwicklung einer eigenen Steuerungshardware bzw. die Modifikation bestehender Hardware führt zu einer Abkopplung von den Innovationszyklen der Hersteller und somit zu untauglichen, proprietären Lösungen.

3.6 Merkmale des Systemkonzepts

Eine Analyse dieser Forderungen führt zu vier Merkmalen, die ein geeignetes Montagekonzept charakterisieren.

Merkmal M1: *Kein Zwischentransport des flächigen Bauteils*

Zur Vermeidung der aufwendigen und kostenintensiven anlageninternen Materialflüsse soll die gesamte Montage in nur einer Zelle, in einer Aufspannung erfolgen. Nur die komplettierte, formstabile Baugruppe verlässt die Montagezelle. Diese Vorgehensweise reduziert zum einen den statischen Flächenbedarf der Anlage und vermindert zum anderen die Zeitanteile nicht-wertschöpfenden Tätigkeiten wie Transport, Positionierung und Spannen. Als Nebeneffekt sind Kosteneinsparungen bei den Spann- und Haltevorrichtungen möglich, da die Baugruppe außer den Fügekräften keinen weiteren dynamischen Kräften ausgesetzt sind, wie sie beispielsweise beim Auflaufen des Werkstückträgers auf einen Vereinzeler auftreten. Zusätzlich reduziert sich die Beschädigungsgefahr biegeschlaffer oder nicht formstabiler Bauteile.

Das Merkmal M1 ist das wichtigste Anlagenmerkmal, aus dem die folgenden Merkmale abgeleitet werden können:

Merkmal M2: *Bauteilzuführung*

Der Wegfall von Zwischentransporten erfordert jedoch ein geändertes Konzept für die Bauteilbereitstellung. Bei einer klassischen Linienfertigung erfolgt diese entweder geordnet in Magazinen oder ungeordnet als Schüttgut. Durch die Aufteilung der Arbeitsinhalte auf mehrere Stationen ist eine räumliche Entzerrung der Bereitstellungsplätze und somit die hierfür notwendigen Bereitstellungsflächen vorhanden. In der Regel werden nur jene Komponenten in jeder einzelnen Zelle zugeführt, die dort für den Montageschritt benötigt werden. Nur in Ausnahmefällen, beispielsweise um den Arbeitsinhalt einer Station zu erhöhen, werden auf dem durchlaufenden Werkstückträger Bauteile aufgebracht, die erst in einem späteren Montageschritt benötigt werden.

Dies ist in der Komplettmontagezelle nicht möglich. Alle benötigten Komponenten und Baugruppen müssen innerhalb des gemeinsamen Arbeitsraums zugeführt werden. Bedingt durch die Forderung F1 nach der Realisierbarkeit von Losgröße 1 sind darüber hinaus manuelle Rüstvorgänge nicht zu vertreten.

Als Lösung bietet sich ein zweistufiges Zuführ- und Bereitstellungskonzept an. C-Teile wie Schrauben oder Klipse, die bei der überwiegenden Anzahl der Varianten und in gleich bleibenden Stückzahlen verbaut werden, werden direkt in der Zelle vereinzelt und bereitgestellt. A- und B-Teile hingegen werden auftragsspezifisch in einer externen Kommissionierzelle vorkommissioniert und parallel zu dem Basisteil in die Montagezelle transportiert. Die Vorkommissionierung kann hierbei sowohl manuell, teil- oder auch vollautomatisiert erfolgen.

Durch die Zusammenfassung aller Arbeitsschritte in einer Montagezelle ergeben sich zwangsläufig hohe Arbeitsinhalte. Dies wirkt sich zumindest auf die Kommissionierung positiv aus, da aus den höheren Taktzeiten geringere Anforderungen an die Vorgabezeiten in der Kommissionierung resultieren.

Merkmal M3: Kooperierende Handhabungsgeräte

Für die Montagezelle hingegen bedeuten die hohen Arbeitsinhalte zwangsweise hohe Taktzeiten. Für die Auslegung von Montageanlagen stellt diese jedoch eines der wichtigsten Kriterien dar. In einer klassischen, starrverketteten Linienfertigung ist der Zeitbedarf T_L für die Herstellung einer bestimmten Losgröße x näherungsweise gegeben durch¹:

$$T_L(x) = \left(\sum_{i=1}^n (t_i) + \sum (t_{i,i+1}) \right) + (x - 1) \cdot \max(t_i)$$

Mit:

- t_i Zeitbedarf an der Station i
- $t_{i,i+1}$ Transportzeit zwischen zwei Stationen
- n Gesamtzahl der Stationen

Es ist zu sehen, dass nach dem Volllaufen der Linie, dargestellt durch den ersten Summanden, im weiteren Verlauf die Taktzeit durch die langsamste Station bestimmt ist. Die Taktzeit ist somit unabhängig von der produzierten Losgröße. Die Zeit zur Herstellung der Losgröße x ist nach der Einschwingphase der Anlage direkt proportional zu der langsamsten Station.

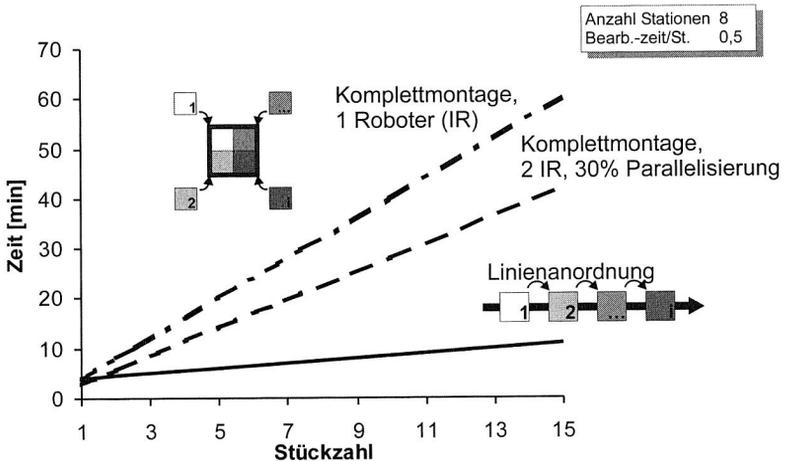


Bild 20: Gegenüberstellung des Zeitbedarfs für unterschiedliche Losgrößen mittels Linienfertigung und Komplettmontage

Wie oben schon dargelegt, steigt durch die Integration verschiedenster Arbeitsschritte in eine Zelle, wie es bei der Komplettmontage vorgesehen ist, die Taktzeit unweigerlich an. Nachfolgende Berechnungsformel bringt dies zum Ausdruck:

$$T_{KM}(x) = \left(\sum_{i=1}^n t_i \right) \cdot x$$

Mit steigender Losgröße steigt die Gesamtzeit linear an. Dieser Effekt wird in Bild 20 verdeutlicht. Je größer die zu produzierende Losgröße ist, desto schlechter schneidet die Komplettmontage (KM) mit einem Handhabungsgerät im Vergleich zu einer starr verketteten Linie ab.

Zur Reduktion dieses unerwünschten Effekts ist der Einsatz von mehreren Handhabungsgeräten möglich. Ein Maß hierfür ist der Parallelisierungsgrad, der angibt, wie viele Prozent des gesamten Zeitbedarfs des Montagevorganges parallel durchgeführt werden und somit direkt zu einer Reduktion der Montagezeit führen.

Bei einem Parallelisierungsgrad von 30% beträgt der Zeitbedarf (bezogen auf eine starrverkettete Linie und der in Bild 20 angegebenen Randbedingungen) bei Losgröße fünf ca. die doppelte Zeit im Vergleich zu der mehr als dreifachen Zeit bei der Lösung mit nur einem Handhabungsgerät.

Dieser Lösungsansatz wird durch die Abmessungen der Komplettmontagezelle zusätzlich unterstützt. Bei der Kleingerätemontage sind, bedingt durch den kleinen, montagerlevanten Arbeitsraum nur wenige Arbeiten parallel durchführbar. Der zur gegenseitigen Absicherung von zwei Handhabungsgeräten notwendige Schutzraum würde den gemeinsamen Arbeitsraum zu oft blockieren, als dass signifikante Zeiteinsparungen realisierbar wären. Bei der Montage flächiger Bauteile ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass zwei Industrieroboter gleichzeitig Montagearbeiten durchführen, oder zumindest ineinander verzahnt arbeiten können, so dass beispielsweise der erste Roboter einen Fügevorgang durchführt, während der zweite Roboter in dieser Zeit parallel ein Bauteil aufnimmt. Die mit 50% maximal theoretisch erreichbare Zeiteinsparung durch den Einsatz von zwei Industrierobotern ist in der Praxis sehr unwahrscheinlich, da es bedingt durch den Raumbedarf der Roboterachsen unweigerlich zu gegenseitigen Behinderungen kommt.

Gleiches gilt auch für den Einsatz von mehr als zwei Handhabungsgeräten. Bisher bekannte Arbeiten zu kooperierender Handhabung und Montage gehen deshalb auch in der Regel von zwei Handhabungsgeräten aus (z.B. [59, 67, 68]). Eine kommerziell erhältliche Roboterzelle mit insgesamt vier Armen für den In-Circuit-Test von Leiterplatten mit einem Arbeitsraum von 330mm x 250mm ist in [69] dargestellt. Jeder Arm befindet sich in einer Ecke und kann nur ein bestimmtes Segment bedienen, wobei diese nicht überlappend sind. Durch eine geschickte Anordnung benötigen die Greifer nur sehr wenig Platz, so dass keine Kollisionen auftreten können.

¹ Zur Vereinfachung der Zusammenhänge wird jeweils von einer Anlagenverfügbarkeit von 100% ausgegangen

Eine feste Trennung des Arbeitsraumes ist für die flexible Montage flächiger Teile nicht sinnvoll, da im Voraus nicht bekannt ist, ob die Montageinhalte gleichmäßig auf den gemeinsamen Arbeitsraum verteilt sind. Da darüber hinaus die Investitionskosten für „richtige“ Industrieroboter sehr hoch sind, ist das Konzept der Komplettmontage durch den Einsatz zweier kooperierend arbeitender Roboter mit gemeinsamen Arbeitsraum gekennzeichnet.

Definition des Begriffs kooperierende Industrieroboter

Obwohl an einer Vielzahl von Forschungseinrichtungen auf dem Gebiet der kooperierenden Systeme gearbeitet wird (z.B. [59, 70, 71, 72, 73]) hat sich noch keine einheitliche Begriffswelt ergeben. Dies mag daran liegen, dass es zum einen ein vergleichsweise junges Forschungsgebiet ist, zum anderen aber auch verschiedenste Fachrichtungen wie die theoretische Informatik und der informatik-geprägte Maschinenbau unabhängig an den verschiedenen Fragestellungen arbeiten. Neben dem bereits eingeführten Begriff *kooperierende Roboter* wird insbesondere von Münch [72] der Begriff *redundante Kinematik* verwendet. In der englischsprachigen Literatur finden sich die Begriffe *cooperating robots* und *multiple robots*. Verstanden wird darunter aber immer die Durchführung von Operationen, die mit einem einzelnen Handhabungsgerät nicht oder nur beschränkt möglich wären.

Im folgenden soll unter kooperierenden (Industrie-) Robotern die von Schönherr eingeführte Definition Verwendung finden:

Definition 4: Kooperierende Industrieroboter ([71])

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

Der Vorteil dieser Definition ist in ihrer Offenheit zu sehen. Es erfolgen keinerlei Einschränkungen hinsichtlich der Art und Anzahl der beteiligten Roboter, ihrer Steuerung oder ihrer räumlichen Anordnung. Darüber hinaus ist die Gestaltung der Arbeitsräume frei. Kooperierende Roboter müssen also nicht zwangsläufig über identische oder überlappende Arbeitsräume verfügen.

Wichtig für das weitere Verständnis ist jedoch, dass eine rein *zeitlich* koordinierte Bewegung für eine *Kooperation* nicht hinreichend ist. Schweißroboter in der Automobilfertigung sind zwangsweise zeitlich koordiniert, sie arbeiten deshalb jedoch nicht zusammen. Die unabhängigen Steuerungen erhalten lediglich ein Signal, das den Start eines bestimmten Programms auslöst. Erst wenn sie sich auch räumlich koordinieren, also eine dynamische Bahnplanung anstelle von vordefinierten Trajektorien durchführen, ist von Kooperation zu sprechen. Aber auch in der Literatur finden sich viele Stellen, an denen der Begriff falsch verwendet wird. So ist in [74] eine Applikation mit zwei Knick-

armrobotern beschrieben, bei der die „Kooperation“ über digitale Ein- und Ausgänge realisiert ist. Der Ablauf ist nur dann kollisionsfrei möglich, wenn beide Roboter mit der zuvor geteachten Geschwindigkeit verfahren. Abweichungen führen bei dieser Methode zwangsweise zur Kollision. Auch in [70] erfolgt die Koordination zweier Industrieroboter lediglich über Semaphoren, die die unabhängigen Steuerungen synchronisieren.

Als Merkregel gilt, dass Bewegungen mehrerer Roboter nur dann *kooperierend* sind, wenn sie mit *variabler Geschwindigkeit* durchführbar sind. Alle anderen sind lediglich als *koordinierte* Bewegungen zu bezeichnen. Eine Detaillierung dieser Betrachtung findet im Kapitel 6 (S. 95) statt.

Merkmal M4: Entlastung des Planers beim Entwurf der Montageprogramme

Dem Vorteil der niedrigeren Taktzeit beim Einsatz kooperierender Roboter steht auf der anderen Seite eine erhebliche Komplexitätssteigerung bei der Planung und Programmierung des Montageablaufes gegenüber. Die manuelle Programmierung unabhängiger Programme führt in der Regel zu ineffizienten und fehlerträchtigen Lösungen, die in der realen Zelle optimiert werden müssen. Die hierfür benötigte Zeit geht zu Lasten der Systemverfügbarkeit und ist deshalb nicht akzeptabel. Idealerweise erfolgt deshalb die Generierung der Bewegungssequenzen offline, also ohne Belegung der Anlagenressourcen. Hierfür ist ein entsprechendes Konzept für die Anforderungen der Komplettmontage zu entwerfen.

3.7 Zusammenfassung

Die Reduzierung der Eigenfertigungstiefen in vielen Industriebereichen führt zur Bildung von großen, vormontierten Einheiten, so genannten Modulen. Dies konnte unter anderem an Beispielen aus der Automobilindustrie gezeigt werden. Die meist flächenhaften Produktstrukturen stellen jedoch besondere Herausforderungen an die zugeordneten Montagesysteme. Aufgrund der Bauteilabmessungen und -gewichte besitzen sowohl manuelle Montagesysteme, als auch bisherige Automatisierungskonzepte eine zu geringe Flexibilität, um den Anforderungen des Marktes nach geringen Losgrößen und hohen Variantenzahlen zu genügen.

Das vorgestellte Montagekonzept reduziert zum einen den Flächenbedarf und vermeidet darüber hinaus die problematischen Transporte flächiger Teile durch deren *Komplettmontage* in einer Zelle. Zur Vermeidung der sich durch die hohen Arbeitsinhalte ergebenden Taktzeiten wird die Verwendung von zwei kooperierenden Industrierobotern vorgeschlagen. Zur Erhöhung der Variantenflexibilität erfolgt die Bauteilbereitstellung über ein zweistufiges Kommissioniersystem. A- und B-Teile werden in einem entkoppelten Bereich kommissioniert und auftragsspezifisch zugeführt. Lediglich die Vereinzelnung und Zuführung von C-Teilen wie Schrauben erfolgt direkt im Arbeitsraum der Handhabungsgeräte. Dadurch eignet sich die Komplettmontage insbesondere für die Fertigung kleiner Losgrößen, da keinerlei Rüstvorgänge erfolgen müssen.

4 Auswahl und Konfiguration eines Komplettmontagesystems

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die grundlegenden Anforderungen, Eigenschaften und Vorteile der Komplettmontage erläutert wurden, erfolgt in diesem Kapitel die Darstellung der Vorgehensweise bei der Auswahl der bestgeeigneten Systemkomponenten. Vor der eigentlichen Anforderungsanalyse des Modellproduktes soll zunächst die prinzipielle Vorgehensweise bei der Planung von Montageanlagen erläutert werden.

4.1 Methodik bei der Planung automatischer Montagezellen

Der Begriff Montage bezeichnet die Gesamtheit aller Vorgänge, die zum Zusammenbau von geometrische bestimmten Körpern dienen. Zu den Hauptfunktionen der Montage zählen somit das Handhaben und Fügen der Bauteile und Baugruppen. Das Justieren, das Kontrollieren sowie Sonderfunktionen wie Reinigen etc. stellen die Nebenfunktionen der Montage dar (Bild 21).

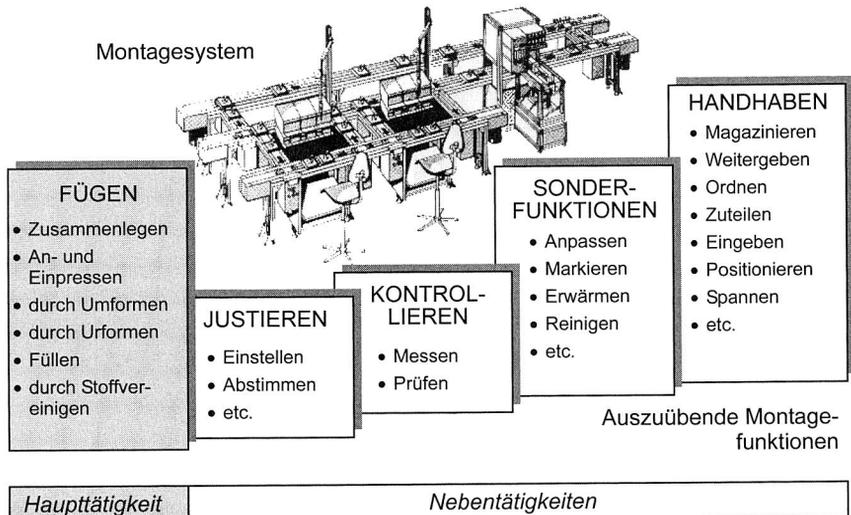


Bild 21: Funktionen eines Montagesystems eingeteilt nach Haupt- und Nebentätigkeiten (nach [75])

Während das Herstellen einer definierten Bauteilorientierung Aufgabe der Handhabungstechnik ist, ist nach DIN 8593 unter dem Begriff „Fügen“ das Schaffen einer Verbindung durch Zusammenlegen, An- und Einpressen, also die im allgemeinen

unter dem Begriff Montage zusammengefassten Vorgänge zu verstehen. Die Beherrschung aller Funktionen, sowohl der Haupt- als auch der Nebenfunktionen ist die Voraussetzung für eine technologisch und qualitativ hochwertige Ausführung der Montageaufgabe.

Handelt es sich, wie im vorliegenden Fall, bei der Planungsaufgabe um ein automatisches Montagesystem, ergeben sich zusätzliche Funktionsanforderungen, die das zugeordnete Steuerungssystem betreffen. Hierbei ist zwischen der physikalischen Vernetzung der unterschiedlichen Anlagenkomponenten zum einen und der softwaregestützten Ablaufsteuerung des Montagevorgangs zu unterscheiden.

Bedingt durch die komplexen Zusammenhänge zwischen Produkt, Montageprozess und Produktionssystem, die unterschiedliche Lösungsalternativen ermöglichen, ist die Vorgehensweise bei der Planung von Montageanlagen ist nur bedingt durch allgemeingültige Definitionen und Richtlinien beschreibbar [47]. Einen Anhaltspunkt, wie die Planung erfolgen kann, liefert die VDI-Richtlinie 2221. In dieser ist ein sechsstufiges, objektorientiertes Vorgehen beschrieben (vgl. Bild 22):

1. Analyse der Ausgangssituation,
2. Konkretisierung der Planungsaufgabe,
3. Grobplanung,
4. Feinplanung,
5. Ausführungs- (bzw. Systemeinführungs-) Planung und
6. Systembetrieb. [76]

Grundlage für eine erfolgreiche Projektdurchführung stellt immer eine exakte Analyse der Ausgangssituation dar. Nur wenn alle Anforderungen und eventuell bestehende Schwachpunkte eindeutig bestimmt sind, kann ein geeigneter Ansatz für die Planung gefunden werden. In diesem Zusammenhang ist auch der zweite Aufgabenpunkt zu sehen, der eng mit der Analyse verbunden ist. Abgeleitet von den Defiziten bestehender Lösungen ist das Anforderungsprofil zu definieren. Nachdem diese Punkte geklärt sind, kann mit einer Grobplanung begonnen werden. In dieser Phase werden verschiedene, alternative Systemlösungen in einem groben Detaillierungsgrad ausgearbeitet.

Unter Zuhilfenahme verschiedener Bewertungsmethoden wie der Nutzwert- oder der Kosten-Nutzenanalyse erfolgt die Auswahl einer oder mehrerer Alternativen, die in der sich anschließenden Feinplanungsphase eine weitere Konkretisierung erfahren. Falls zu diesem Zeitpunkt noch mehrere Alternativen „im Rennen“ sein sollten, erfolgt die endgültige Festlegung der zu realisierenden Alternative in diesem Planungsabschnitt. Die Ausführungsplanung fasst alle Arbeitsschritte zusammen, die für die Umsetzung des Konzeptes in eine lauffähige Anlage nötig sind.

Die Anforderungen des Marktes und auch neue Erkenntnisse, die erst während der unterschiedlichen Konkretisierungsstufen eintreten, erlauben in der Regel keine strikte Einhaltung der in der VDI-Richtlinie vorgegebenen Reihenfolge. Es ist vielmehr ei-

ne Verkettung im Sinne eines Regelkreises zwischen den verschiedenen Stufen erkennbar, die sich auch durch das Verwischen der Grenzen zwischen den Planungsstufen manifestiert. Diese Erkenntnis zeigt sich auch durch die steigende Verbreitung der Methoden des Simultaneous Engineering (SE).

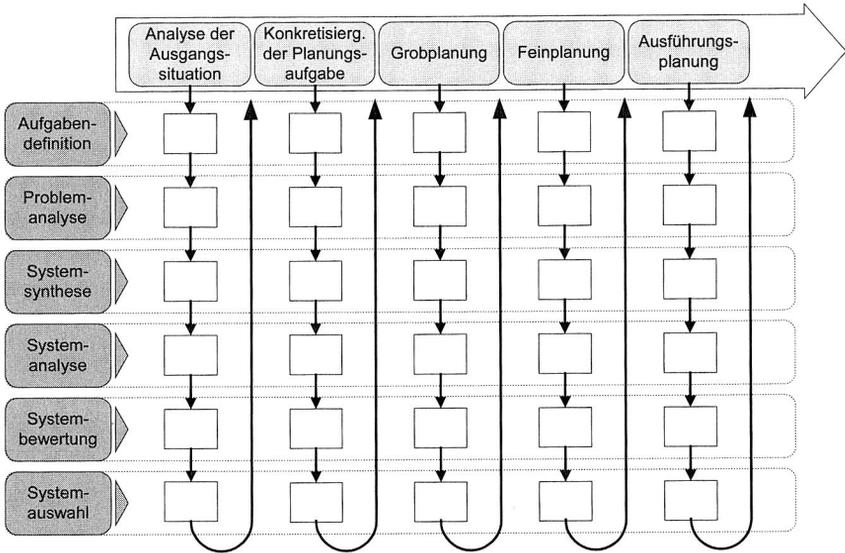


Bild 22: Überlagerung von objekt- und vorgehensorientierter Planung [47]

SE stellt die (eigentlich logische) Forderung dar, den Produktentwicklungsprozess nicht isoliert von der Planung der Fertigungs- und Montageeinrichtungen zu sehen. Nur durch eine parallele Durchführung der Schritte ist eine möglichst frühe Markteinführung realisierbar. Ein weiterer Vorteil liegt in der Möglichkeit, von Seiten der Anlagenplaner korrigierend in die Produktgestaltung einzugreifen und eventuell notwendige Anpassungen so früh und somit so kostengünstig wie möglich zu erwirken.

Eine Voraussetzung für die Entwicklung optimierter Lösungen ist das Vorliegen möglichst vieler Lösungsideen. Hierbei ist zwischen schlecht strukturierten und wohlstrukturierten Problemstellungen zu unterscheiden [76]. Letztere sind beispielsweise Planungsaufgaben für Maschinenelemente wie Getriebe, bei denen auf bereits bekannte Umsetzungen und Lösungsansätze wie Konstruktionskataloge und Gestaltungsregeln zurückgegriffen werden kann.

Die Problemstellungen, die sich bei der Planung der Komplettmontagezelle ergeben sind so vielfältig, dass hierfür noch keine bekannten Lösungen bestehen, die ihren Niederschlag in allgemeingültigen Regeln gefunden hätten. Es handelt darüber hin-

aus um ein schlechtstrukturiertes, nicht algorithmisierbares Problem. Für deren Lösung schlägt die VDI-Richtlinie 2221 verschiedene, so genannte Kreativitätstechniken vor. Hierzu zählen Techniken wie Brainstorming, Methode 66, Methode 635 und Provokation [76]. Allen diesen Methoden liegt die Idee zugrunde, dass unter Ausnutzung der Gruppendynamik Lösungsansätze aus der Gruppe geboren und verbessert werden. Bei komplexen und vielschichtigen Problemen bietet der so genannte Morphologische Kasten einen Ansatzpunkt, ein Problem in seine unabhängigen Teilaspekte zu zerlegen. Dadurch wird deren Struktur und Funktion analysierbar [77].

4.2 Methoden zur Bewertung von Lösungskonzepten

Zur Beurteilung der entwickelten Konzepte sind diese nach technologisch-wirtschaftlichen Kriterien zu bewerten. Bei bereits realisierten Anlagen lassen sich einfach Daten wie Taktzeit, Verfügbarkeit, Wartungskosten etc. ermitteln und mit Alternativlösungen vergleichen („Benchmarking“). Die Schwierigkeit für ein Planungsteam besteht darin, diese Daten bereits vor der eigentlichen Realisierung des Projektes abzuschätzen und in Relation mit anderen Lösungsansätzen zu bringen. Insbesondere die Bewertung von weichen Faktoren, also nicht-quantitativ erfassbaren Merkmalen ist sehr schwer und teilweise für Außenstehende nicht nachvollziehbar. [78]

Es ist deshalb ein objektives und insbesondere nachvollziehbares Bewertungsschema zu entwickeln, das die Entscheidungsfindung transparent macht. Die für die Entscheidung relevanten Werte der Zielkomponenten müssen jedoch mit einem Aufwand ermittelbar sein, der in Relation zur Bedeutung der Entscheidung steht [79]. Da diese Probleme im Bereich der Konstruktion und Planung von Bauteilen und Anlagen häufig vorkommen, sind in der VDI-Richtlinie 2221 verschiedene Bewertungsverfahren genannt [76].

4.2.1 3-Stufen-Auswahl

Die 3-Stufen-Auswahl bietet die Möglichkeit, eine erste Bewertung der erarbeiteten Lösungsansätze zu erreichen. Es erfolgt hierbei eine Klassifizierung nach dem Schema *Geeignet* - *Vielleicht geeignet* - *Ung geeignet*. Durch diese grobe Unterteilung ist die 3-Stufen-Auswahl insbesondere bei heuristisch gefundenen Lösungen sinnvoll anwendbar. Grundlage für die sinnvolle Anwendung ist allerdings eine umfassende Sachkenntnis und Erfahrung.

Im Gegensatz zu den nachfolgend vorgestellten Bewertungsmethoden ist die Reproduzierbarkeit der gefundenen Ergebnisse nur sehr eingeschränkt möglich, da keine Bewertungskriterien angegeben werden. Je nach Betrachtungswinkel und Kenntnisstand können unterschiedliche Bewerter zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen, ohne, dass ein Ergebnis richtig oder falsch sein muss.

4.2.2 Nutzwertanalyse

Eines der namentlich bekanntesten Bewertungsverfahren ist die ursprünglich in den USA entwickelte und Anfang der 70er Jahre in Deutschland eingeführte Nutzwertanalyse (NWA). Ziel der Nutzwertanalyse ist die Bestimmung des relativen Nutzens einer Alternative. Sie eignet sich somit für eine systematische Entscheidungsvorbereitung bei der Auswahl komplexer Handlungsalternativen [78]. Im Gegensatz zur Kosten-Nutzen-Analyse wird die NWA bei nicht monetären Fragestellungen angewandt.

Grundlage der Methode stellt die Annahme dar, dass sich ein übergeordnetes Gesamtziel in mehrere unabhängige Einzelziele aufspalten lässt. Jedes dieser Einzelziele besteht wiederum aus einer Anzahl unabhängiger Unterziele. Der eigentliche Ablauf der Nutzwertanalyse gliedert sich in sieben Schritte. Zunächst erfolgt die Definition eines Oberziels. Dieses wird in unabhängige, hierarchisch gruppierte Einzelziele aufgespalten. Die Anwendung der Methode erzeugt eine baumartige Struktur des Zielproblems, die eine systematische Bewertung auch komplexer Varianten ermöglicht.

Lediglich qualitativ bewertbare Eigenschaften wie Design werden mit Dezimalzahlen zwischen eins (Minimum) und zehn (Optimal) bewertet. Erfüllt eine Variante ein bestimmtes Zielkriterium nicht (K.O.-Kriterium), so ist diese mit Null zu bewerten. Um quantitativ messbare Werte (z. B. Leistung) in die Bewertung einfließen zu lassen, sind diese ebenfalls auf den Zahlenraum von null bis zehn zu normieren. Wichtig hierbei ist zu beachten, dass der Wertebereich nicht durch die Lösungsalternativen vorgegeben wird, sondern sich aus den Systemanforderungen ableitet. Beträgt zum Beispiel die notwendige Antriebsleistung für einen Motor 10kW so erhält ein Antrieb, der 15kW leistet, ebenso die volle Punktzahl wie ein Antrieb der 12kW leistet, da beide die ursprüngliche Anforderung übertreffen. Eine Übererfüllung der Forderungen führt somit nicht zu einer Verschiebung der Bewertungsskala.

Die Schwierigkeit bei der Durchführung der Nutzwertanalyse liegt zunächst in der Identifikation der unabhängigen Problemkomponenten. Diesen wird im Anschluss eine Gewichtung gegeben, die der Präferenzenordnung entspricht. Je wichtiger eine Eigenschaft für die Erfüllung der Aufgabenstellung ist, desto höher ist deren Gewichtung. Idealerweise sollte diese Festlegung vor der Betrachtung möglicher Lösungsansätze erfolgen, da die sonst Gefahr der unbewussten Manipulation besteht.

Hauptkritik- und somit zwangsläufig Angriffspunkt bei der Verwendung der Nutzwertanalyse ist die Wahl der Gewichtung. In Ermangelung objektiver Präferenzen erfolgt diese meist subjektiv. Dies führt je nach Erwartungshorizont zu unterschiedlichen Präferenzen.

Nutzwertanalyse der zweiten Generation

Im Unterschied zur klassischen Nutzwertanalyse, bei der der Wertebereich der Wertefüllung zwischen 0 und 10 stetig ist, ist bei der NwA der zweiten Generation nur die Verwendung ganzer Zahlen erlaubt. Der Übergang zu dem eigentlich schlechteren, weil größeren Bewertungsschema liegt die Erkenntnis zu Grunde dass der Mensch nicht in der Lage ist, seine Präferenzen „auf eine Nachkomma-Stelle“ genau anzugeben [80].

4.3 Anforderungsanalyse zur Montage des Modellproduktes

Um eine praxisingerechte Auslegung der Komplettmontagezelle zu erreichen, wurde ein flächiges Modellprodukt ausgewählt, das sich insbesondere durch eine hohe Variantenzahl bei gleichzeitig sehr kleinen Losgrößen auszeichnet. Es handelt sich dabei um ein so genanntes KFZ-Türmodul, das als vormontierte Baugruppe vom Systemlieferanten direkt an das Montageband angeliefert wird. Das Türmodul besteht aus einem flächigen Träger (-blech), auf das die anderen Bauteile je nach Ausstattungswunsch montiert werden. Hierzu gehören beispielsweise die mechanische Führung der Seitenscheibe, das Türschloss oder auch der Türlautsprecher. Darüber hinaus sind Klipse für die Befestigung der Kabelbäume auf dem Modul anzubringen (Bild 23). Das Türmodul zählt somit zur dritten Aufbauform flächiger Baugruppen (vgl. Bild 17).

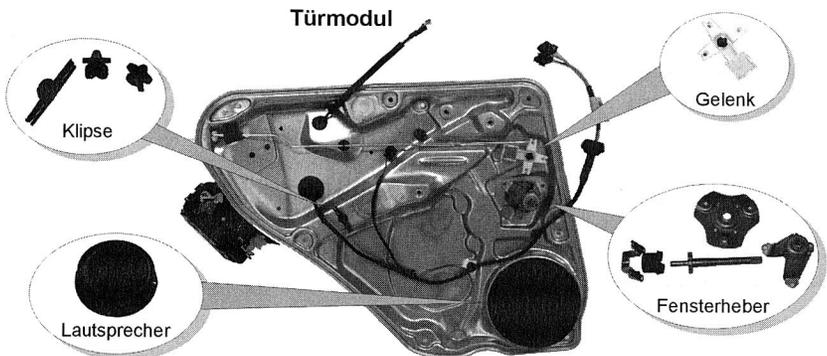


Bild 23: Beispielprodukt Türmodul mit den zu montierenden Komponenten (Bildquelle: Brose)

Der Variantenmix der in der Automobilproduktion gefahren wird, verlangt vom Montagesystem höchste Flexibilität. Aufgrund der steigenden Kundenorientierung sind für einen einzelnen Fahrzeugtyp mehrere hundert verschiedene Varianten von Türmodulen möglich [81, 82]. Diese unterscheiden sich sowohl in ihren mechanischen Komponenten wie Fensterheber und Türschloss, als auch zwangsläufig in den hierfür

notigen mechatronischen und elektrischen Komponenten. Die unterschiedlichen Ausstattungsvarianten bedingen darüber hinaus unterschiedliche Varianten des flächigen Basisteils. So sind bei dem verwendeten Modellprodukt sind aufgrund des unterschiedlichen Aufbaus von manuellen und elektrischen Fensterhebern unterschiedliche Stanzungen im Trägerblech notwendig.

Bezeichnung	Hauptabmessung [mm]	Gewicht [g]	Material	Verbindungstechnik
Trägerblech	685 x 510 x 65	1300	Stahlblech	x
Lautsprecher	Ø145x61	650	Mix	Nieten
Fensterheber			Stahlblech	Nieten
- Welle	Ø11 x 136	83		
- Platte	Ø100 x 14	73		
- Führung	Ø94 x 71	88		
Gelenk	80 x 64 x 29	47	Kunststoff	Stecken
Befestigungs- klipse	Zwischen 55 x 16 x 14 u. 23 x 20 x 12	1-2	Kunststoff	Stecken
...				

Tabelle 1: Übersicht der zu montierenden Bauteile für ein repräsentatives Türmodul

Ein weiteres Merkmal dieser Produktgruppe ist die Produktlebensdauer und die damit verbundene Verpflichtung des Herstellers, die Lieferfähigkeit über einen bestimmten Zeitraum, in der Regel 10 bis 15 Jahre nach dem Auslauf der Modellreihe sicherzustellen. Die hierfür erforderliche Ersatzteilproduktion ist gekennzeichnet durch niedrigere Gesamtstückzahlen bei einer wesentlich höheren Variantenzahl, die mehrere Tausend Stück betragen kann. Diese Zahl verdeutlicht das Potential und gleichzeitig die Herausforderung, durch eine geeignete Automatisierung sowohl den hohen Qualitätsansprüchen der Automobilkonzerne gerecht zu werden, als auch flexibel und kostengünstig auf die Marktanforderungen zu reagieren. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die technischen Daten der Baugruppen, die für ein repräsentatives Türmodul montiert werden müssen.

4.4 Grobplanung der automatischen Komplettmontagezelle

Entsprechend der in der VDI-Richtlinie 2221 vorgeschlagenen Vorgehensweise werden im folgenden die optimalen Komponenten für das spezifizierte Modellprodukt ausgewählt werden. Analog zu Bild 24 lassen sich diese in die Planungsbereiche Grobplanung und Feinplanung einteilen. In der Grobplanungsphase ist zunächst die Systemgestalt mit den Handhabungsgeräten und dem Materialfluss und der Bauteil-

zuführung zu definieren. Die in dieser Planungsphase untergeordneten Themenstellungen wie die Gestaltung der Greifer der Handhabungsgeräte, die Steuerung der Anlage sowie deren interne Kommunikationsstruktur sind Gegenstand der sich anschließenden Feinplanungsphase.

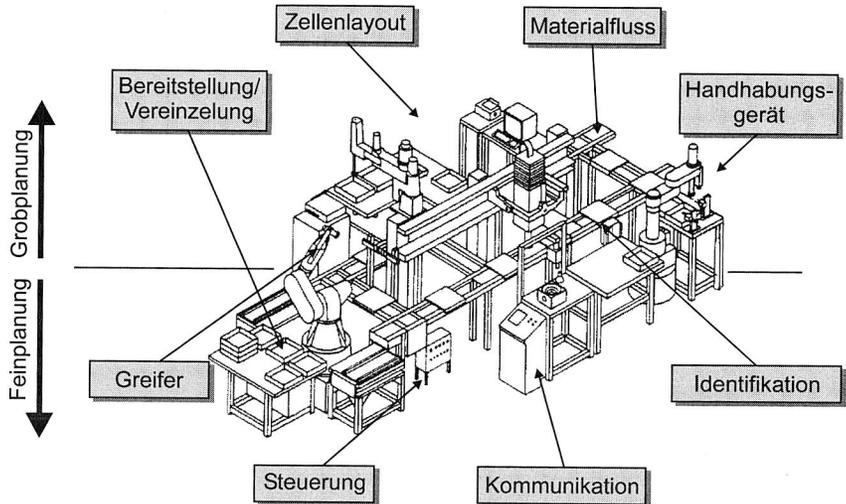


Bild 24: Einteilung der Komponenten eines allgemeinen automatischen Montagesystems in die Grob- und Feinplanungsphase (in Anlehnung an VDI 2860 Bl. 1) [83]

Die erstgenannten Punkte der Grobplanungsphase, hier insbesondere die Wahl der Handhabungsgeräte und der Materialfluss innerhalb der Zelle, bedingen sich gegenseitig. Es ergibt sich somit eine iterative Vorgehensweise, da die benötigte Bereitstellungsfläche die Minimalgröße der Arbeitsräume der Handhabungsgeräte bedingt, deren Geometrie aber wiederum die Anordnung der Bauteilbereitstellung festlegt.

Auf Grundlage der Anforderungsdefinition und den in Kapitel 3.6 aufgestellten Merkmalen der Komplettmontagezelle wurden mit der Methode des morphologischen Kastens zunächst die unabhängigen Systemkomponenten wie Handhabungsgerät, Materialfluss etc. identifiziert (Bild 24) und im Anschluss mittels Brainstorming in ihre technologischen Merkmale aufgespalten. Dies sind für das Beispiel Handhabungsgeräte der Robotertyp, die Anzahl der Roboter und ihrer Freiheitsgrade usw. Einen Auszug aus dem aufgestellten morphologischen Kasten gibt Bild 25. Aufbauend auf dessen Struktur erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln der Darstellung der bei der Realisierung des Montagesystems zur Auswahl stehenden Alternativen.

Grobplanung				
Handhabungsgerät				
<i>Robotertyp</i>	Linearroboter	SCARA		Knickarmroboter
<i>Anzahl Roboter</i>	1	2		>2
<i>Freiheitsgrade</i>	4	5	6	>6
...				
Materialfluss				
<i>Zellenintern</i>	1 Band		2 Bänder	
<i>Zellenübergreifend</i>	Doppelgurtband	FTS		Manuell
...				
Bauteilzuführung/-bereitstellung				
<i>Basisteil</i>	Auf WT		Gestapelt	
<i>Komponenten</i>	Vorkommissioniert		Vereinzelung in Zelle	
...				
Feinplanung				
Greifer				
<i>Anzahl Greifer</i>	1 (Multifunktion)		Mehrere	
<i>Greifprinzip</i>	Mechanisch	Pneumatisch	Magnetisch	Elektrisch
...				
Steuerung				
<i>Materialfluss</i>	SPS	Slot-SPS	PC-basierte Steuerung	
<i>Montageablauf</i>	Master-Slave	Multimaster		
...				
Kommunikation				
<i>Feldbussystem</i>	CAN	Interbus-S	Profibus/AS-i	...
...				
Identifikation				
<i>Prinzip</i>	Mechanisch	Optisch	Elektrisch	Magnetisch
<i>Datenhaltung</i>	Zentral		Dezentral	
...				

Bild 25: Auszug aus dem morphologischen Kasten zur systematischen Auswahl der Systemkomponenten der Komplettmontagezelle

4.4.1 Auswahl einer geeigneten Kinematik

Für die Wahl einer passenden Kinematik für die Durchführung der Komplettmontage sind mehrere Kriterien ausschlaggebend. Zum einen ist es die Anzahl der Freiheitsgrade, die der Roboter besitzt. Das zu montierende Modellprodukt ist, aus montage-technischer Sicht betrachtet, nicht ideal aufgebaut, da die Bauteile auch auf geeigneten Flächen montiert werden müssen. Der Roboter muss somit mindestens fünf Frei-

heitsgrade besitzen. Zur Erhöhung der Flexibilität ist ein sechster Freiheitsgrad sinnvoll.

Ein weiteres Kriterium stellt die Größe des vom Roboter erreichbaren Raumes dar. Dieser so genannte Arbeitsraum ist die Gesamtheit aller Punkte, die mit dem freien Ende des Roboters (TCP= Tool Center Point) erreicht werden können [84]. Die VDI 2861 unterteilt den festen Bewegungsraum, also der Raum der vom Endeffektor des Industrieroboters erreichbar ist, in den eigentlichen Arbeitsraum und den so genannten nicht nutzbaren Raum (Bild 26).

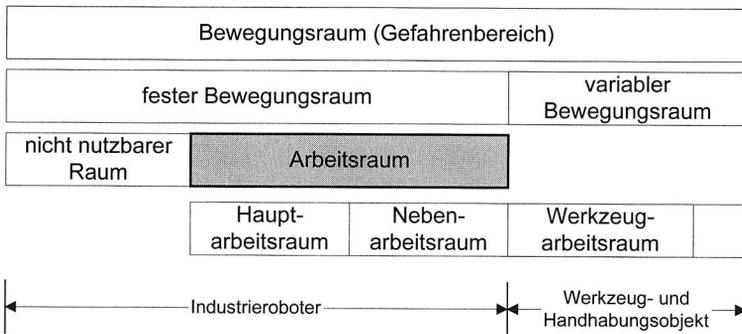


Bild 26: Übersicht über die Raumaufteilung eines Industrieroboters mit Werkzeug und Handhabungsobjekt (VDI 2861) [85]

Wie im vorangegangenen Kapitel bereits gezeigt wurde, handelt es sich bei dem Modellprodukt um ein flächiges Bauteil der zweiten Aufbauform. Nicht-flächige Komponenten werden also in ein flächiges Basisteil gefügt. Der minimale Arbeitsraum ist somit durch die Größe des Basisteils bzw. des für den Transport verwendeten Werkstückträgers, der die Abmaße 800mm x 600mm besitzt, bestimmt. Da im Voraus nicht vorhersehbar ist, wo auf dem Werkstückträger Montageoperationen durchgeführt werden müssen, stellt die Abdeckung der gesamten WT-Fläche ein notwendiges Kriterium für die Größe des Roboters dar.

Allerdings ist nicht nur die reine, zahlenmäßige Größe des Arbeitsraumes relevant, sondern auch dessen geometrische Form. Aus diesem Grund soll eine feinere Unterteilung des Begriffes Arbeitsraum gefunden werden. Da die Montage flächiger Teile in einem hauptsächlich zwei-dimensionalen Raum stattfindet, der Begriff Arbeitsfläche in der Robotik jedoch nicht gebräuchlich ist, soll der Begriff Arbeitsraum die nutzbare, horizontale Fläche in Montagehöhe bezeichnen.

Im folgenden soll unter dem Begriff *nutzbarer Arbeitsraum* (A_N) die Fläche bezeichnet sein, die ein maximales Rechteck der Seitenverhältnisse

$$\frac{l}{b} \leq \frac{4}{3}$$

umschließt und innerhalb des Arbeitsraumes des Handhabungsgerätes liegt.

Neben der eigentlichen Montagefläche ist im Arbeitsraum eines Roboters in der Regel auch die Bereitstellung zusätzlicher Bauteile notwendig. Dieser so genannte *Bereitstellungsraum* (A_B) ist definiert als die Differenz der Fläche des nutzbaren Arbeitsraums und des allgemeinen Arbeitsraums. Da die Mechanik der Zuführung einen gewissen Platzbedarf aufweist, sollen nur solche Flächenelemente Berücksichtigung finden, die eine minimale Kantenlänge von 10 cm *10 cm besitzen.

Bild 27 veranschaulicht am Beispiel des festen Bewegungsraumes eines SCARA-Roboters die Notwendigkeit, den gegebenen Arbeitsraum in den nutzbaren Arbeitsraum als Ort der eigentlichen Montageoperation und den optionalen Bereitstellungsraum zu unterteilen. Durch die serielle Anordnung der Rotationsachsen entsteht der typische, nierenförmige Arbeitsraum, der von der absoluten Fläche sehr groß ist. Wird dieser allerdings im Verhältnis zu der Fläche eines Werkstückträgers gesetzt, auf den der SCARA-Roboter zugreifen kann, so ist erkennbar, dass nur ein kleiner Prozentsatz nutzbar ist. Dies stellt im besonderen bei der Montage flächiger Bauteile ein Problem dar. Der größte Teil kann lediglich zur Bereitstellung von benötigten Komponenten genutzt werden.

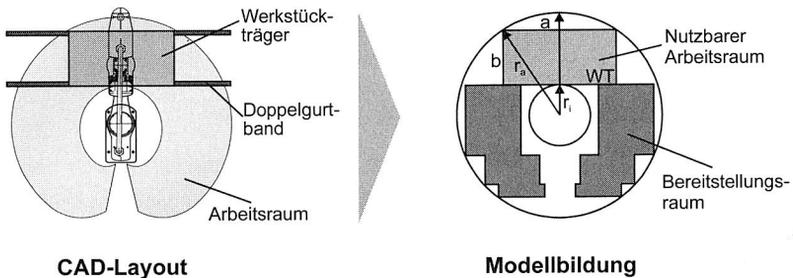


Bild 27: Vergleich zwischen Arbeitsraum, nutzbarem Arbeitsraum und Bereitstellungsraum am Beispiel eines SCARA-Roboters

Nachfolgende Formel ermöglicht die Berechnung der minimal zulässigen Armlänge eines SCARA-Roboters um die Bearbeitung einer gegebenen Fläche zu ermöglichen.

$$r_a = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + (b + r_i)^2}$$

Für einen Werkstückträger mit den Abmessungen 800x600mm und einem minimalen Radius („nicht nutzbarer Raum“ nach VDI 2861, Bild 26) von 200mm ergibt sich eine notwendige Armlänge von 890mm. Soll auf eine Fläche von 800mm x 800mm zugegriffen werden, so ist bereits eine Armlänge von fast 1100mm notwendig. Eine im Rahmen der Arbeit durchgeführte Marktrecherche ergab, dass lediglich die Herstel-

ler ReisRobotics und Yamaha SCARA-Roboter dieser Baugröße im Lieferprogramm haben.

Ein weiteres Kriterium bei der Wahl der geeigneten Kinematik ist die maximale Last, die der Industrieroboter bewegen kann. Die VDI-Richtlinie 2861 definiert hierfür den Begriff der Nennlast als Summe von Werkzeuglast und Nutzlast, die ein Industrieroboter ohne Einschränkung der für die Achsen angegebenen kinematischen und geometrischen Kenngrößen handhaben kann [85]. Entsprechend dem Anforderungsprofil beträgt dieser Wert bei der Komplettmontagezelle 15 kg.

Aufgrund der notwendigen Armlänge und der für typische SCARA-Roboter sehr hohen Nennlast scheidet dieser Robotertyp für die Verwendung in der Komplettmontagezelle aus. Zwar existieren auf dem Markt Modelle, die den hier notwendigen nutzbaren Arbeitsraum besitzen, allerdings ist die Übertragbarkeit des Systemkonzeptes auf beliebige, größere flächige Bauteile nicht gewährleistet.

	Gew.	Scara		Knickarm		Linearroboter	
		Bewertung	Nutzen	Bewertung	Nutzen	Bewertung	Nutzen
Arbeitsraum	60%	4,32		4,8		6	
Freiheitsgrade ²	50%	10	5	10	5	10	5
nutzb. Arb.-raum	40%	4	1,6	6	2,4	10	4
Bereitstell.-raum	10%	6	0,6	6	0,6	10	1
Genauigkeit	10%	0,6		0,6		0,6	
Wdh.-genauigk.	80%	6	4,8	6	4,8	5	4
Pos.-genauigk.	20%	6	1,2	6	1,2	10	2
Geschwindigkeit	10%	0,78		0,7		0,54	
PTP	80%	8	6,4	7	5,6	5	4
Linear	20%	7	1,4	7	1,4	7	1,4
Traglast	20%	0,6		2		2	
Traglast	100%	3	0,6	10	2	10	2
Ergebnis		6,3		8,1		9,14	

Tabelle 2: Beispielhafte Bewertung der alternativen Handhabungsgeräte mittels der Nutzwertanalyse

Vertikal-Knickarm-Roboter als zweithäufigste Kinematikbauform besitzen zumindest im Bereich der Nennlast erhebliche Vorteile. Die größten Bauformen können Lasten von 500kg handhaben [86]. Darüber hinaus sind Armlängen von 2m und mehr keine Seltenheit. Der sich daraus ergebende Arbeitsraum besitzt eine kugelige Form, die

² Sowohl Scara-Roboter, als auch Linearroboter erhalten bei der Bewertung der Freiheitsgrade die volle Punktzahl, da diese durch die Integration zusätzlicher Achsen erweiterbar sind

wiederum nicht optimal für die gegebene Montageaufgabe ist. Vergleichbar der SCARA-Roboter stellt auch hier der nutzbare Arbeitsraum nur einen Bruchteil des eigentlichen Arbeitsraumes dar. Für das vorgesehene Einsatzkonzept ist dieser zwar hinreichend, die Übertragbarkeit auf größere Bauteile stößt aber auch hier schnell auf Grenzen.

Die in Tabelle 2 beispielhaft dargestellte Nutzwertanalyse verdeutlicht den Vorteil den die Linearroboter vor den beiden anderen Kinematiktypen besitzen. Zum einen besitzen sie eine ausreichend hohe Tragkraft und zum anderen sind sie in fast beliebiger Größe, zumindest was die ersten beiden Hauptachsen betrifft, lieferbar. Darüber hinaus hat der Arbeitsraum durch seine kubische Form die ideale Voraussetzung für die Montage flächiger Teile [50]. Der nutzbare Arbeitsraum ist somit identisch zu dem nominellen Arbeitsraum. Problematisch an der Kinematik von Linearrobotern ist, dass diese Bauform lediglich drei Freiheitsgrade durch ihre Hauptachsen und maximal einen weiteren durch eine Rotationsachse im Handgelenk besitzt.

Erweiterung der Freiheitsgrade

Dies ist für komplexe Montageaufgaben nicht hinreichend und stellt somit eigentlich ein K.O.-Kriterium dar. Um trotzdem die vielfältigen Vorteile dieser Kinematik nutzen zu können, erfolgte die Identifikation verschiedener Ansätze, die Anzahl der zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade in der Zelle zu steigern (Tabelle 3).

	Integration	Differenzierung
Flexibilität	-	+
Genauigkeit	-	0
Nutzlast	-	++
Kosten	-	0

Tabelle 3: Gegenüberstellung der Möglichkeiten zur Integration zusätzlicher Freiheitsgrade in der Komplettmontagezelle

Der erste Ansatz erweitert die Anzahl der Freiheitsgrade durch die Integration zusätzlicher, angetriebener Achsen am Roboter. Demgegenüber steht jedoch zum einen die Reduzierung der Nutzlast des Roboters, da er zusätzliche Achsen zu tragen hat und zum anderen die Reduzierung der Genauigkeit, insbesondere der Positioniergenauigkeit durch Fertigungs- und Montagetoleranzen. Für die Komplettmontage kommt erschwerend hinzu, dass diese Aufrüstung für beide Roboter erfolgen müsste, da sie sonst nicht substituierbar in ihren Aufgaben wären.

Die Differentialbauweise als zweite Lösungsalternative vermeidet den Nachteil der reduzierten Nutzlast durch die Aufspaltung der kinematischen Kette in zwei unabhängige Geräte. Zum einen der unveränderte Roboter mit seinen vier Freiheitsgra-

den, und zum anderen eine Einrichtung zur Ausrichtung des Bauteils unabhängig vom eigentlichen Handhabungsgerät. Zwei verschiedene Lösungsansätze sind in Bild 28 dargestellt. Bei der links dargestellten Alternative handelt es sich um eine kardanisch gelagerte Plattform, auf der das zu manipulierende Bauteil gespannt ist. Eine solche Bauform ist beispielsweise in [87] für die Bestückung dreidimensionaler Leiterplatten beschrieben.

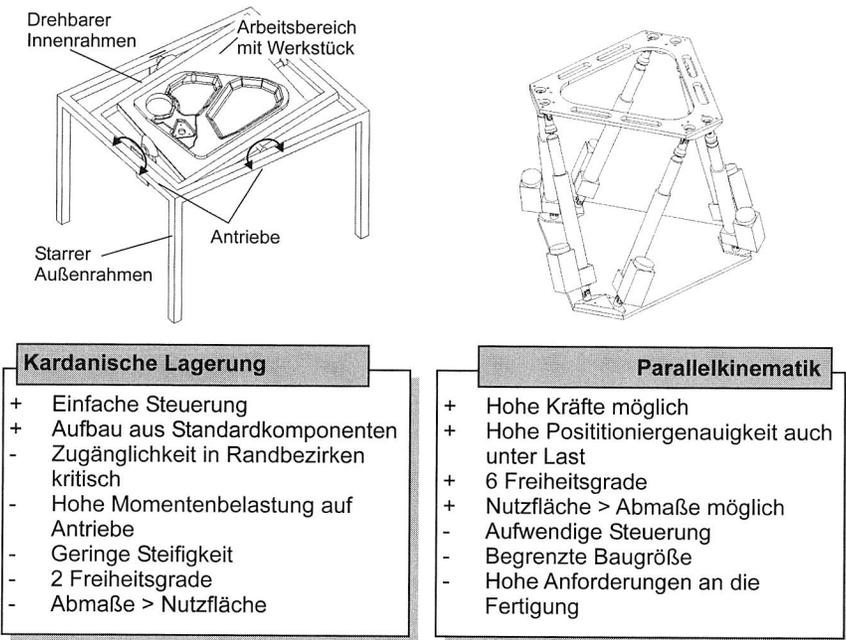


Bild 28: Vergleich kardanischer Manipulatoren mit Parallelkinematiken zur Erweiterung der Freiheitsgrade von Linearrobotern

Der Vorteil liegt insbesondere in einer einfachen Gestaltung der Transformationen und damit auch einer einfachen Steuerung, die als Zusatzachsen in der Robotersteuerung abbildbar ist. Das Konzept besitzt jedoch signifikante Nachteile, die besonders mit steigender Bauteilgröße an Bedeutung gewinnen. Die zwei wesentlichsten Nachteile sind zum einen der Flächenbedarf, der wesentlich größer als die zur Verfügung stehende Nutzfläche ist, zum anderen bewirken die auftretenden Fügekräfte bei einer Montageoperation eine hohe Momentenbelastung der Antriebe und Lager, die zur einer Verschiebung des Montagepunktes führen kann.

Der zweite Lösungsansatz basiert auf dem Prinzip von Parallelkinematiken. Im Gegensatz zu konventionellen Industrierobotern müssen bei diesen keine gewichtsinintensiven Antriebseinheiten mitbewegt werden. Der gesamte Aufbau kann dadurch

bei gleicher Steifigkeit leichter konstruiert werden, ist aber trotzdem in der Lage, hohe Kräfte aufzunehmen (Bild 29). Bereits Anfang des 19. Jahrhunderts wurde diese Kinematikform von Maxwell [88] und Mannheim [89] beschrieben. Aufbauend auf diesen theoretischen Arbeiten entwickelte Stewart 1965 die nach ihm benannte Stewart-Plattform oder auch Hexapod, dessen prinzipieller Aufbau in Bild 28 dargestellt ist [90]. Im Gegensatz zu der kardanischen Lagerung bietet ein Hexapod insgesamt sechs Freiheitsgrade bei einer wesentlich kompakteren Bauweise, die von den Stellmaßen auch kleiner als die eigentliche Arbeitsfläche sein kann.

Aufgrund der hohen Anforderungen an die Steuerungstechnik konnten erst in den letzten Jahren verschiedene Handhabungs- und Bearbeitungsgeräte auf der Basis von Parallelkinematiken auf dem Markt eingeführt werden. Insbesondere im Bereich der spanenden Fertigung (Fräsmaschinen) erscheint das Konzept Erfolg versprechend (vgl. [91, 92, 93]), auch wenn bislang nur wenige Systeme im Produktiveinsatz zu finden sind [94]. Aber auch im Bereich Handhabung und Messen sind mittlerweile kommerzielle Systeme verfügbar. Eine Übersicht aktueller Entwicklungen in Forschung und Anwendung gibt das Robotool-Projekt der Universität Hannover [95].

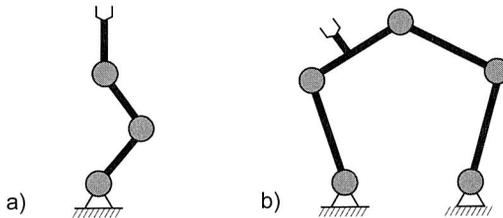


Bild 29: Vergleich zwischen serieller (a) und paralleler Kinematik (b)

Entsprechende der in Bild 28 dargestellten Bewertung stellt die Kombination aus kooperierend arbeitenden Linearrobotern in Verbindung mit einem Hexapod für die Bauteilmanipulation die beste Lösung für eine flexible Montagezelle dar. Lediglich bei sehr großen Bauteilen mit Ausdehnungen über mehrere Meter sollte eine erneute Betrachtung der vorgestellten kardanischen Lagerung erfolgen.

4.4.2 Bauteilzuführung und -bereitstellung

Nachdem die Kinematik der Handhabungsgeräte ausgewählt ist, gilt es, die bestgeeignete Bereitstellungsform für die Bauteile zu finden. Es bietet sich an, die Zweiteilung in flächiges Basisteil und zu montierende Komponenten auch bei der Bauteilzuführung beizubehalten, da die Transportbänder für das Basisteil einen sehr hohen Platzbedarf aufweisen, der nur dort reserviert werden sollte, wo er unbedingt notwendig ist.

Das gewählte Beispielprodukt zeichnet sich durch sehr geringe Losgrößen (bis hin zu Losgröße 1) mit damit verbundener hoher Variantenzahl aus. Diese werden zum ei-

nen durch unterschiedliche Basisteile, als auch durch die zu fügenden Komponenten gebildet. Bedingt durch das Zellenkonzept ist es erforderlich, alle Bauteile in den Arbeitsraum der Linearroboter zuzuführen, dieser sollte jedoch aus Kostengründen so klein wie möglich sein. Eine Bereitstellung aller Komponenten benötigt jedoch zu viel Platz, da neben der Bereitstellung auch Einrichtungen für die Vereinzelung und Orientierung, unter Umständen sogar redundant, vorhanden sein müssen.

Das im Rahmen der Arbeit entwickelte Bereitstellungskonzept beschreibt einen zweistufigen Ansatz. C-Teile wie z.B. Schrauben oder Klipse, die zumindest bei der überwiegenden Anzahl von Varianten benötigt werden, werden direkt in der Komplettmontagezelle vereinzelt und zugeführt. A- und B-Teile, also Teile die nur bei einzelnen Varianten zum Einsatz kommen und einen höheren Wert besitzen, werden zunächst auftragsspezifisch auf spezielle Werkstückträger vorkommissioniert und im Anschluss in den Arbeitsraum transportiert.

Dieses Konzept, das auch von der Boston Consulting Group in einer aktuellen Studie aus dem Jahr 2002 zur Lösung der Platz- und Zuführprobleme in der Automobilendmontage vorgeschlagen [96] wird, dient der Reduzierung des statischen Platzbedarfs. Die anspruchsvolle Aufgabe der Materialflusssteuerung ist somit die synchrone Bereitstellung der vorkommissionierten Werkstückträger zusammen mit dem passenden Basisteil.

4.4.3 Materialfluss und Zellenlayout

Wie in der Montagetechnik üblich, soll der Materialfluss mittels Doppelgurtbändern und hierfür passender Werkstückträger erfolgen, die mit ihren festgelegten Abmaßen eine standardisierte Schnittstelle zu den Transportbändern, Stoppern und Vereinzelern bieten. Auf den Werkstückträgern aufgebrauchte Formnester positionieren die A- und B-Teile während der Transport- und Fügevorgänge. Aufgrund der verschiedenen zuzuführenden Bauteile bietet sich ein modularer Aufbau der Formnester an. Andernfalls verschlechtern die erforderlichen Umbauten die Wirtschaftlichkeit des Systemkonzeptes durch eine Reduzierung der Ausbringungsleistung bei gleichzeitig höherem Investitionsvolumen.

Die Gestaltung des eigentlichen Materialflusses erfolgte mittels einer kommerziellen Kinematiksimulation. In vergleichsweise kurzer Zeit lassen sich mit diesem Werkzeug beliebige Anordnungen der Handhabungsgeräte und Materialflussbänder untersuchen und hinsichtlich der Greifbereiche optimieren. Die auszuwählende Konfiguration hatte mehreren Randbedingungen zu genügen. Wichtigstes Kriterium war, dass beide Roboter den gesamten nutzbaren Arbeitsraum abdecken, da nur so eine flexible Montage möglich ist. Dies bedingt zusätzlich, dass auch die Werkstück- und Werkzeugbereitstellungen so angeordnet sind, dass ein gleichberechtigter Zugriff erfolgen kann.

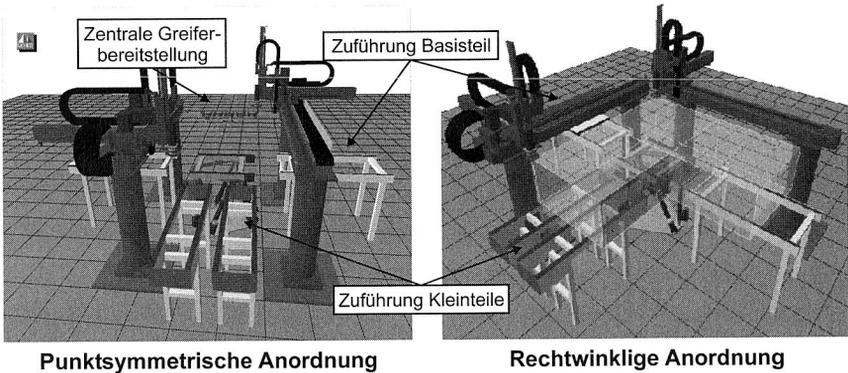


Bild 30: Darstellung alternativer, räumlicher Anordnungen der Linearroboter und der Zuführbänder

Das ausgewählte Layout (Bild 30, links) ist gekennzeichnet durch eine punktsymmetrische Anordnung der beiden Linearroboter. Die Zuführung des flächigen Basisteils erfolgt seitlich, unter der ersten Hauptachse eines Roboters. Der Abtransport kann wahlweise in der gleichen Richtung, oder aber geradlinig unterhalb des zweiten Roboters erfolgen. Über zwei, parallel zu den Hauptachsen, gerichtete Bänder werden die variantenspezifischen Komponenten in den Arbeitsraum transportiert. Zur Realisierung einer einfachen Materialflusssteuerung bietet es sich an, ein Band für die Bauteilver- und das andere für die Bauteilentsorgung zu verwenden. Über kurze Stichstrecken ist eine materialflussunabhängige Abarbeitung der Werkstückträger gewährleistet. Je nach Größe des Arbeitsraumes, respektive der Länge der zweiten Hauptachse besteht die Möglichkeit, zusätzliche Bänder in das Konzept zu integrieren.

Die auf der rechten Seite dargestellte Alternative ermöglicht eine einfachere Koordination der Handhabungsgeräte, da die überlappenden Arbeitsräume wesentlich kleiner sind. Wesentlicher Nachteil des Layout ist jedoch die zwangsweise Trennung der Bauteil- und Greiferbereitstellung, die zu einer geringeren Flexibilität bei gleichzeitig höheren Systemkosten führt.

Da die Montage variantenreicher Bauteile in der Regel eine Vielzahl an unterschiedlichen Greifern erfordert, sollten die beiden Roboter mit Greiferwechselsystemen ausgerüstet sein. Multifunktionsgreifer eignen sich aufgrund der umfangreichen Anforderungen für diese Aufgabe nicht. Eine gemeinsame Greiferbereitstellungszone, die von beiden Robotern erreichbar ist, hilft die notwendigen Investitionskosten zu begrenzen. Je nach Anzahl der benötigten Greifer kann dieser Bereich als Karussell, vergleichbar der Ausführung bei Werkzeugmaschinen oder als statischer Greiferbahnhof ausgeführt sein.

4.5 Identifikation im Materialfluss

Die sichere Identifikation der zu montierenden Bauteile bzw. der sie transportierenden Werkstückträger ist für eine variantenreiche, automatisierte Montage unabdingbar. Das gilt im gleichen Maße natürlich auch für die Komplettmontage. Es ist deshalb nötig, ein geeignetes System für die Montagezelle auszusuchen, das insbesondere die Forderungen nach einer großen Offenheit und Herstellerunabhängigkeit erfüllt.

Grundlagen für die Identifikation im industriellen Umfeld

Im industriellen Umfeld werden in der Regel Identifikationssysteme auf Basis von Barcodes oder elektronischen Datenträgern eingesetzt. Bei der Auswahl der geeigneten Kennzeichnungsmethode sind verschiedene Kriterien von Belang. Die wichtigsten sind in Bild 31 aufgeführt. Weitere Kriterien, wie Chemikalienbeständigkeit, Empfindlichkeit auf elektrische Felder etc. sind hier nicht betrachtet, da sie im normalen Montageumfeld nicht auftreten.

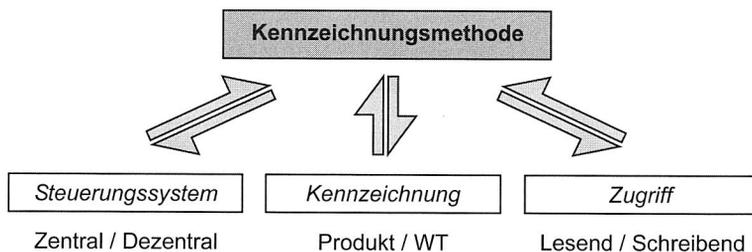


Bild 31: Kriterien bei der Auswahl des geeigneten Kennzeichnungssystems

Zunächst ist zu unterscheiden, ob innerhalb der Montagelinie das spezifische Produkt oder lediglich der Werkstückträger, auf dem das Erzeugnis sich befindet, gekennzeichnet wird. In der Regel erfolgt die indirekte Kennzeichnung bei Produkten der Konsumgüterindustrie, die in Serie, ohne Kundenauftrag gefertigt werden. In diesem Fall erfolgt am so genannten I-Punkt die logische Zuordnung zwischen Produkt (-variante) und spezifischem Werkstückträger. Ist hingegen die Identifikation des einzelnen Erzeugnisses über verschiedene Fertigungsstufen hinweg von Bedeutung, erfolgt die Anbringung des Codes meist direkt. Bei dieser Methode spielen im Besonderen die Kosten für die Herstellung und Montage der Datenträger eine bedeutende Rolle. Häufig ist es kostengünstiger, wenn die Codierung am fertigen Produkt verbleibt und nicht mehr entfernt wird. Darüber hinaus ist auch die Positionierung von Bedeutung, da sie zum einen nicht auf Sichtflächen erfolgen darf, zum anderen aber für die Lesegeräte erreichbar sein muss.

Barcode

Barcodes stellen in diesem Zusammenhang die bislang am weitesten verbreitete Kennzeichnungsmethode dar. Insbesondere die kostengünstige Erstellung mittels Laser- und Tintenstrahldrucker sowie die weitreichende Standardisierung sprechen für diese Codierungsmethode. Allerdings ist zum einen die Speichermenge klassischer, eindimensionaler Barcodes sehr begrenzt, zum anderen besitzen diese nur schwache Fehlerkorrekturmechanismen [97]. In den letzten Jahren wurden aus diesem Grund zweidimensionale Barcodes entwickelt, die eine wesentlich höhere Informationsmenge auf einer sehr kleinen Fläche speichern können. Potentielle Einsatzgebiete für diese neue Art sind z.B. Leiterplatten, die aufgrund der Miniaturisierung nur sehr wenige freie Flächen aufweisen [98]. Die meiste Verbreitung im Bereich der zweidimensionalen Codes hat der Data Matrix Code erreicht, der in der ISO 16022 definiert ist [99].

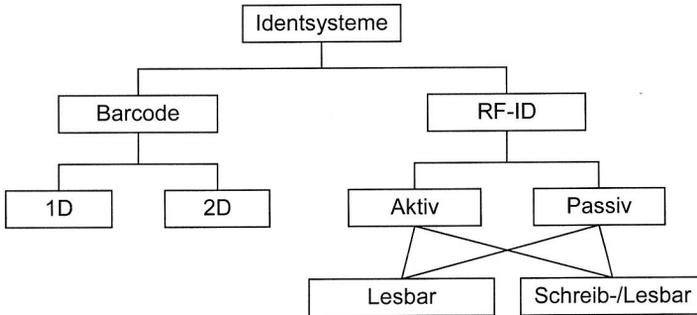


Bild 32: Gebräuchliche Identensysteme in der Produktion

Aufgrund der optischen Abtastung sind alle Barcodes sowohl anfällig gegen Verschmutzung, und, je nach Trägermaterial, gegen mechanische Zerstörung. Ein weiterer, auf den ersten Blick nicht erkennbarer Nachteil ist die Tatsache, dass der Barcode für das Lesegerät sichtbar sein muss. Diese an und für sich triviale Randbedingung kann sich im Montageprozess als sehr schwerwiegend erweisen, da Spann- und Hilfsvorrichtungen die freie Sicht auf das Bauteil verhindern können.

Elektronische Datenträger - Transponder

Der Einsatz von Barcodes zur Identifikation von kontinuierlich im Fertigungs- und Montageprozess umlaufenden Werkstückträgern ist deshalb selten zu finden. Hier eignen sich die teureren, aber quasi unbegrenzt haltbaren elektronischen Identifikationssystemen (Transponder). Diese bestehen im wesentlichen aus einer Spule, die mit einem Chip verbunden ist. Die Leseantenne induziert in diese Spule eine Spannung, die ihrerseits den Chip mit Energie versorgt. Dieser überträgt die gespeicherten Daten zurück an die Leseantenne und die damit verbundene Auswerteeinheit.

Bei der Bau- und Funktionsweise der Transponder ist zunächst zwischen aktiven und passiven Systemen zu unterscheiden. Erstere beschreiben generell batteriebetriebene Datenträger, die sich im Unterschied zu den batterielosen (passiven) Datenträgern durch einen größeren maximalen Leseabstand zwischen Datenspeicher und Leseinheit auszeichnen. Von der Funktionsweise sind beide Typen gleich. Unterschiede ergeben sich bei der Zugriffsart auf die gespeicherten Daten. Es sind sowohl nur-lesbare (read only), als auch beschreibbare (read/write) Transponder erhältlich. Die Verwendung eines aktiven oder passiven Transponders sagt nichts über die Zugriffsart aus. Es existieren auf dem Markt sowohl passive Transponder die beschreibbar sind, als auch aktive Transponder die nur einen lesenden Zugriff erlauben [100].

Die Bauart des verwendeten Transponders hat einen direkten Einfluss auf die Gestaltung der Informationslogistik im Montageumfeld. Die industriell eingesetzten aktiven, beschreibbaren Transponder besitzen eine Speicherkapazität von bis zu 32 kByte, was für die Speicherung mittlerer Datenmengen ausreicht. Insbesondere lassen sich so neben den spezifischen Produkt- und Varianteninformationen aktuelle Informationen zum Fertigungsfortschritt, sowie Qualitätsdaten speichern. Durch die eingearbeitete Batterie ist ihre Lebenszeit allerdings auf ca. 5 Jahre und eine bestimmte Anzahl von Schreib-/Lesezyklen begrenzt. Eine dritte Kategorie von Transpondern funktioniert nach dem WORM (Write Once, Read Many) Prinzip, bietet jedoch für den vorliegenden Einsatzfall keine signifikanten Vorteile.

Gegenüberstellung zentrale - dezentraler Datenhaltung

Befinden sich alle Informationen, die für eine Steuerung des Produktes durch die Montage nötig sind auf dem Datenträger, so spricht man von einer dezentralen Steuerung. Im Gegensatz zu einer zentralen Steuerung, bei der an jeder Entscheidungsstelle in der *zentralen* Datenbank die aktuell benötigten Informationen abgefragt werden, werden diese bei der dezentralen Steuerung am Anfang des Prozessdurchlaufes auf den Datenträger geschrieben (Bild 33). Im Anschluss ist somit keine weitere Kommunikation mit der zentralen Fertigungssteuerung bis zum Abschluss der Montageschritte notwendig. An den Entscheidungsstellen werden die lokal gespeicherten Informationen aus dem Datenspeicher ausgelesen und entsprechend die benötigten Montagestationen angefahren.

Bei einem Ausbau des Systems, der z.B. im Speichern von erweiterten Qualitätsdaten liegen kann, sind bei einer dezentralen Steuerung unter Umständen erhebliche Investitionen notwendig, da die bereits bestehende Infrastruktur (Datenspeicher, Schreibgeräte) erweitert werden muss. Hier liegt der klare Vorteil zentraler Steuerungen. Bedingt durch das Systemkonzept sind alle Datenquellen und -senken mit dem zentralen Leitsystem verbunden. Die Übertragung und Speicherung erweiterter Informationen stellt somit nur einen kleinen Eingriff in das System dar, der unkompliziert und kostenminimal durchführbar ist.

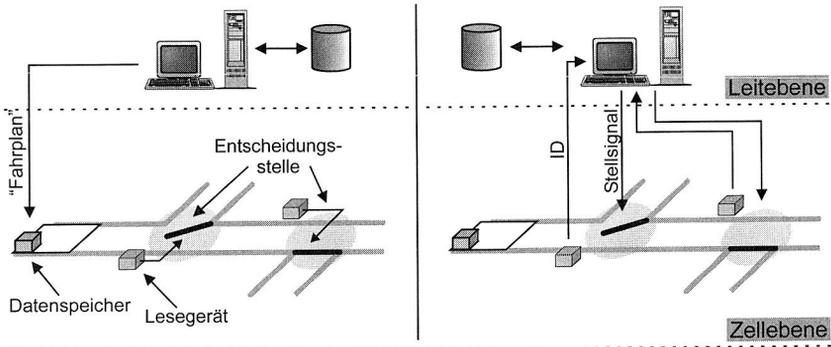


Bild 33: Unterscheidung zwischen dezentraler (linke Bildhälfte) und zentraler Steuerung (rechte Bildhälfte)

Aufgrund des beschränkten Speicherplatzes auf den beschreibbaren Transpondern und der mittlerweile gestiegenen Verfügbarkeit von Ethernet-Anschlüssen im Fertigungsumfeld bietet sich der Einsatz der zentralen Steuerung an. Ein weiterer Vorteil dieser Variante sind die wesentlich niedrigeren Kosten für Transponder und Lesegeräte.

Bewertung

Zur Erreichung einer maximalen Flexibilität im Bereich der Bauteilidentifikation bietet sich die Einführung einer zentralen Datenhaltung auf Basis von passiven, read-only-Transpondern an. Die benötigten Leseantennen werden über eine serielle Schnittstelle (RS 232) mit dem Zellenrechner verbunden. Prinzipiell ist auch eine Anbindung der Leseinheit an das zelleninterne Feldbussystem denkbar. Diese ergibt sich sogar zwingend, sobald die Montagezelle gewisse Abmessungen überschreitet und so die Übertragung mit einer seriellen Leitung nicht mehr möglich ist. Nach Norm beträgt die maximale Leitungslänge für serielle Leitungen 20m [101]. Externe Störungen im industriellen Umfeld (z.B. Magnetfelder von Maschinenantrieben) reduzieren die Leitungslänge zusätzlich. Bedingt durch die kompakte Struktur der Komplettmontagezelle ist eine Ausrüstung mit seriellen Leitungen hinreichend. Die Verwendung der RS 232-Schnittstelle anstelle einer Profibus/DP-Anbindung hat zwei weitere Gründe. Zum einen ist eine Unabhängigkeit von der verwendeten Busstruktur der Zelle erreicht, zum anderen ergibt sich durch diese Lösung ein Kostenvorteil von Faktor 5-10 [102].

4.6 Zusammenfassung

Durch eine systematische Betrachtung der Freiheitsgrade und der damit verbundenen Arbeitsräume konnte gezeigt werden, dass eine Komplettmontagezelle idealer-

weise aus zwei punktsymmetrisch angeordneten Linearrobotern aufgebaut sein sollte. Der Vorteil dieser Kinematiken liegt insbesondere in ihrer nahezu beliebigen Baugröße und hohen Nennlast. Allerdings sind die typischerweise vorhandenen vier Freiheitsgrade nicht hinreichend für die Durchführung komplexer Montageaufgaben. Aus den sich ergebenden Lösungsmöglichkeiten wird die Aufspaltung der kinematischen in zwei Teile, nämlich den unveränderten Robotern zum einen und einem Hexapoden zur Manipulation der Bauteile favorisiert.

Zur Steigerung der Flexibilität der Zelle muss der zelleninterne Materialfluss so gestaltet sein, dass beide Roboter einen gleichberechtigten Zugriff sowohl auf die bereitgestellten Bauteile als auch auf die unterschiedlichen Greifer haben. Ersteres ist durch eine zentrale Bauteilver- und -entsorgung über mindestens zwei Doppelgurtbänder, zweites durch eine zentrale Greiferbereitstellung mit Greiferwechselsystemen erreicht. Hierfür wurden zwei alternative Bauformen aufgezeigt, die je nach Anzahl der benötigten Greifer realisierbar sind.

Die, im Rahmen der Grobplanung, festgelegte Systemgestalt wird im folgenden Kapitel um die noch fehlenden Aspekte der Feinplanung; also der eigentlichen Greifer, der Kommunikations- und Steuerungsstruktur ergänzt. Dies erfolgt spezifisch an den aktuellen Herausforderungen des Beispielproduktes. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Grobplanung, sind diese montagespezifisch und können sich bei einer anderen Montageaufgabe durchaus von der hier vorgestellten Lösung unterscheiden.

5 Realisierung einer flexiblen Zelle für die Komplettmontage

Die Komplettmontage bedingt durch ihre komplexen Funktionen auf dem beengten Arbeitsraum eine angepasste Systemperipherie, die von der Bauteilkommissionierung über die -zuführung bis hin zur Manipulation und Montage der Bauteile reicht. Entsprechend Bild 34 ergibt sich dabei eine sinnvolle Aufteilung in die Kommissionierzelle und die eigentliche Komplettmontagezelle als Ort der Montagedurchführung. Diese ist wiederum in die eigentliche Hardware, also der Handhabungsgeräte und der Zellenperipherie sowie die hierarchisch darüber angeordnete Koordinierungssteuerung unterteilt, die Inhalt des Kapitels 6 ist.

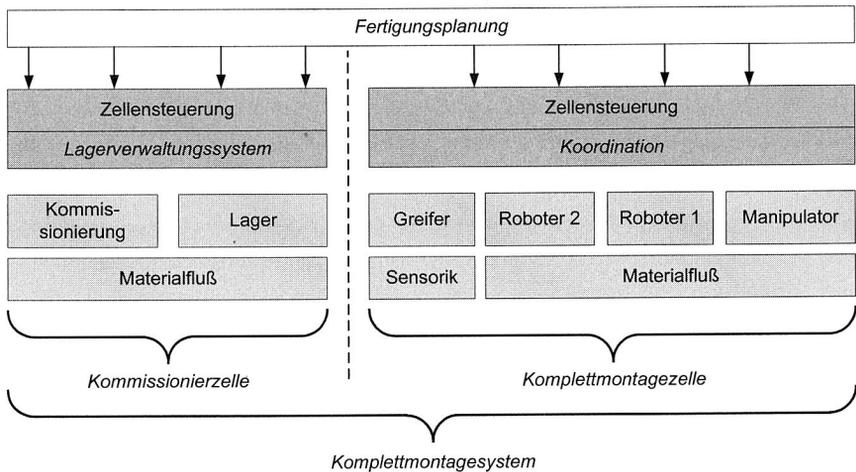


Bild 34: Differenzierung des Komplettmontagesystems in die Komplettmontagezelle und der vorgelagerten Kommissionierung

5.1 Auftragspezifische Vorkommissionierung

Entsprechend dem in Kapitel 4.4.2 vorgeschlagenem Konzept erfolgt die Kommissionierung der A- und B-Teile in einer separaten Kommissionierzelle. Hierfür wurde ein automatisches Kleinteilelager (AKL) um einen Kommissionierbereich erweitert. Das Lager bietet 50 Stellplätze für Werkstückträgern des Typs Bosch WT2. Durch die Verwendung der gleichen Werkstückträger sowohl im Lager, als auch im weiteren Materialfluss entsteht kein Bruch in der Transportkette.

Der zugeordnete Materialfluss ist derart gestaltet, dass je nach Art der Anforderung vom Leitrechner, sowohl der gesamte WT, als auch nur eine bestimmte Anzahl von

Werkstücken ausgelagert werden kann (Bild 35). Der WT, der die gewünschten Bauteile enthält, wird vom Regalbediengerät (RBG) an Band 2 angeliefert. Von dort erfolgt der Transport über den Querförderer auf die rechte Schleife. Zur Minimierung der Kommissionierzeit ist der verwendete SCARA-Roboter (Bosch-SR8) so angeordnet, dass zwei Werkstückträger gleichzeitig im Zugriff sein können. Über die am unteren Bildrand dargestellte Schleife werden gleichzeitig die Werkstückträger angeliefert, auf die die Kommissionierung erfolgt. Die abgearbeiteten Werkstückträger werden über Band 1 an das Regalbediengerät übergeben und eingelagert. Die Realisierung der notwendigen Identifikation der Werkstückträger (insbesondere bei Verwirbelung) ist Inhalt des Kapitels 5.3.

Der in dieser Zelle realisierte Materialfluss ist ein denkbarer Lösungsansatz. Je nach Anzahl und Häufigkeit der Kommissionierung existieren jedoch sicherlich effektivere Lösungsansätze, die insbesondere die Anzahl der Lagerspiele durch eine Erweiterung der Pufferplätze reduzieren.

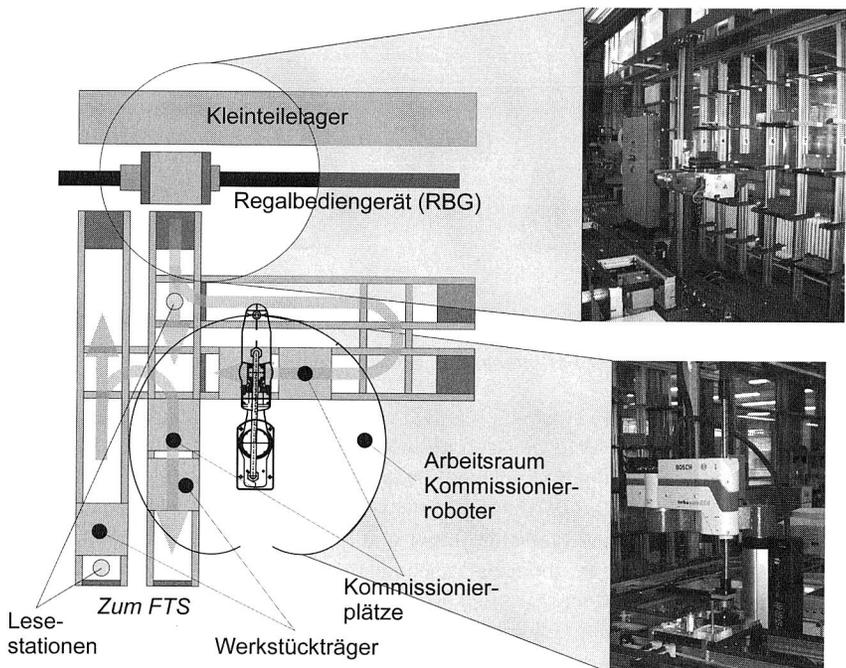


Bild 35: Kommissionierzelle zur auftragspezifischen Vorkommissionierung der benötigten Komponenten

Allerdings stellt alleine die Realisierung einer automatischen Kommissionierung variantenreicher Produkte ein umfangreiches Forschungsgebiet dar [103]. Das im Rah-

men dieser Arbeit verfolgte Ziel war deshalb nicht die vollständige Bearbeitung dieser Fragestellung, sondern die Umsetzung und Darstellung eines möglichen Lösungsansatzes für dieses Teilproblem.

Flexible Formnester

Integraler Bestandteil des Konzepts der Vorkommissionierung ist die Bereitstellung flexibler Werkstückträger. Deren Aufgabe ist der Transport und die Positionssicherung der darauf befindlichen Bauteile. Bedingt durch die Vielzahl und Größenunterschiede der zuzuführenden Bauteile sind die im produzierenden Gewerbe häufig anzutreffenden tiefgezogenen Formnester nicht hinreichend. Es bestand im Gegensatz die Notwendigkeit nach einem modularen, schnell rüstbaren und kostengünstigen Werkstückträgerkonzept.

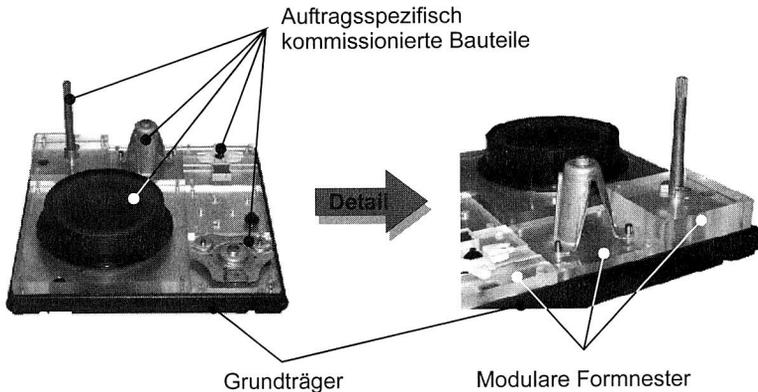


Bild 36: Einsatz modularer Formnester zur Steigerung der Umrüstflexibilität von Werkstückträgern

Die hierfür modifizierten WTs besitzen steckbare Formnester, die durch ihr einheitliches Rastmaß von 31 mm Kantenlänge verschiedenste Anordnungen zulassen. Ein umlaufender Rand um den WT führt zu einem einfachen und ohne Hilfsmittel lösba- ren Formschluss zwischen Werkstückträger und Formnester. Dies ermöglicht neben eines sicheren Transports ohne zusätzliche mechanische Fixierungen, eine hohe Flexibilität durch kurze Rüstzeiten (Bild 36).

Universell einsetzbares Lagerverwaltungssystem

Um so mehr lag der Fokus in der Entwicklung eines offenen, herstellerunabhängigen Steuerungs- und Logistikkonzeptes, das die Einbindung und den Betrieb solcher Kommissionierläger in die Produktionslandschaft ermöglicht.

Erforderten Lagerverwaltungssysteme (LVS) vor einigen Jahren noch Großrechner, auf denen die speziell für den jeweiligen Kunden entworfene Lagerverwaltungssoftware lief, bieten mittlerweile viele Hersteller ihre Software auch für herkömmliche PCs an. Dies liegt neben den niedrigeren Anschaffungskosten dieser Hardware-Architektur in der steigenden Leistungsfähigkeit und besseren Wartbarkeit begründet. Trotzdem sind Grenzen der PCs insbesondere in der Datensicherheit vorhanden, die bei Großanwendern die Forderung nach klassischen Client-Server-Rechnerverbunden bestehen lassen. Dies führt für die Entwickler von Lagerverwaltungssystemen zu einer Vielzahl von Programmversionen, die gewartet und gepflegt werden müssen [103].

Ein weiterer Schwachpunkt in vielen Lagerverwaltungssystemen ist der hohe Anteil kundenspezifischer Anpassungen. Zum Zeitpunkt der Entwicklungsarbeiten des nachfolgend beschriebenen LVS gab es nur eine geringe Modularisierung der Teilmodule. Die genannten Punkte gaben den Ausschlag für die Entwicklung eines eigenen LVS, das die genannten Nachteile vermeidet.

Grundlage der beschriebenen Entwicklung stellt der Bedarf nach einer größtmöglichen Plattformunabhängigkeit dar. Nur auf diese Weise ist eine Integration der breiten Spanne unterschiedlicher Betriebssysteme und Datenbanken im Produktionsumfeld möglich. Durch die Verwendung der betriebssystemunabhängigen Programmiersprache JAVA besteht die Möglichkeit, dieses Problem elegant zu umgehen. JAVA wurde 1995 von der Firma SUN Microsystems entwickelt und erlaubt die Ausführung identischer Binärdateien auf unterschiedlichsten Rechnersystemen. Dies reicht vom Handheld-PC über klassische PC bis hin zu Großrechnern. Der Entwickler muss sich also nicht mehr mit betriebssystem-spezifischen Fragestellungen auseinandersetzen, sondern kann sich rein auf die Programmierung der Funktionalität konzentrieren. Lediglich die so genannte JAVA-Runtime, vergleichbar mit der Funktionalität eines Postprozessors, muss spezifisch auf jede Rechnerarchitektur angepasst werden. Dies ist jedoch nicht Aufgabe des einzelnen Programmierers, sondern z.B. des Betriebssystemherstellers.

Ein weiteres Kriterium für eine funktionale Lagerverwaltung ist die Möglichkeit, die verschiedenen Teilaufgaben verteilt auf unterschiedlichen Rechnern laufen zu lassen (Bild 37). Hier bietet sich die von Java unterstützte Corba-Architektur (Common Object Request Brokerage Architecture) an. Diese erlaubt die Entwicklung verteilter Applikationen, die für den Anwender völlig transparent über Ethernet miteinander kommunizieren. Details zu dieser Technologie finden sich unter [104].

Das zu entwickelnde LVS sollte darüber hinaus in der Lage sein, unterschiedlichste Lagerbauformen bis hin zu einer mehrfachtiefen und -hohen Einlagerung abbilden zu können. Bild 37 zeigt die Aufteilung der unterschiedlichen Funktionen, die für die Konfiguration und den Betrieb der Lagerverwaltung nötig sind. Durch die Verwendung der Corba-Architektur können die Teilmodule sowohl auf einem einzigen Rechner, als auch verteilt im Netzwerk betrieben werden.

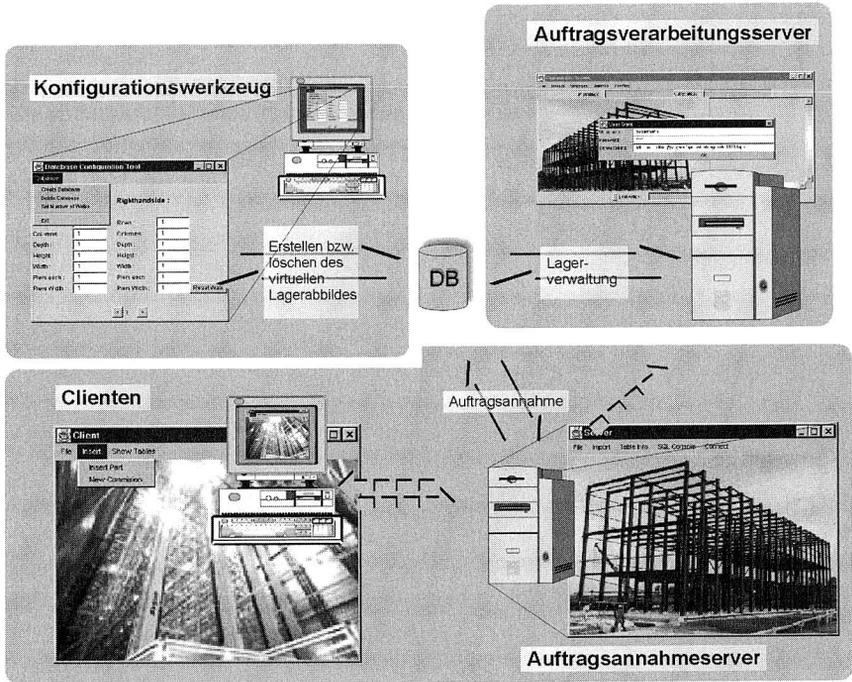


Bild 37: Struktur des entwickelten Lagerverwaltungssystems als Client-Server-Lösung mit zentraler Datenbank

Ein spezielles Konfigurationswerkzeug erlaubt die menügeführte Eingabe der Parameter des physischen Lagers. Hierzu gehört die Anzahl der Lagerreihen, der Fachunterteilungen, eventueller Stützen und gesperrter Lagerfächer. Aus diesen Daten generiert das LVS ein virtuelles Abbild des Lagers als Datenstruktur in einer Datenbank (Bild 38). Deren Anbindung ist über die JDBC-Schnittstelle realisiert, was den Betrieb nahezu beliebiger Datenbanken erlaubt. Für ein kleines Lager mit nur einer geringen Anzahl von Lagerspielen kann dies eine Access-Datenbank sein, für große Läger bietet sich die Verwendung von Oracle oder Ingres-Datenbanken an, die auf speziellen Datenbankservern betrieben werden. JDBC erlaubt die Verwendung einer einheitlichen Abfragesprache und bereitet die Abfrageergebnisse einheitlich auf, so dass keinerlei Änderungen am zugrunde liegenden Code notwendig sind, falls im späteren Verlauf eine Migration auf eine andere Plattform notwendig sein sollte.

Der eigentliche Betrieb, also die Verwaltung von Ein- und Auslagerungen erfolgt über mehrere Schritte. Ausgangspunkt ist der Client, der ein bestimmtes Bauteil anfordert.

Diese Anfrage wird an einen zentralen Auftragsannahme-Server gesendet, der die Anfragen der verschiedenen Clients in einer Warteschlange verwaltet.

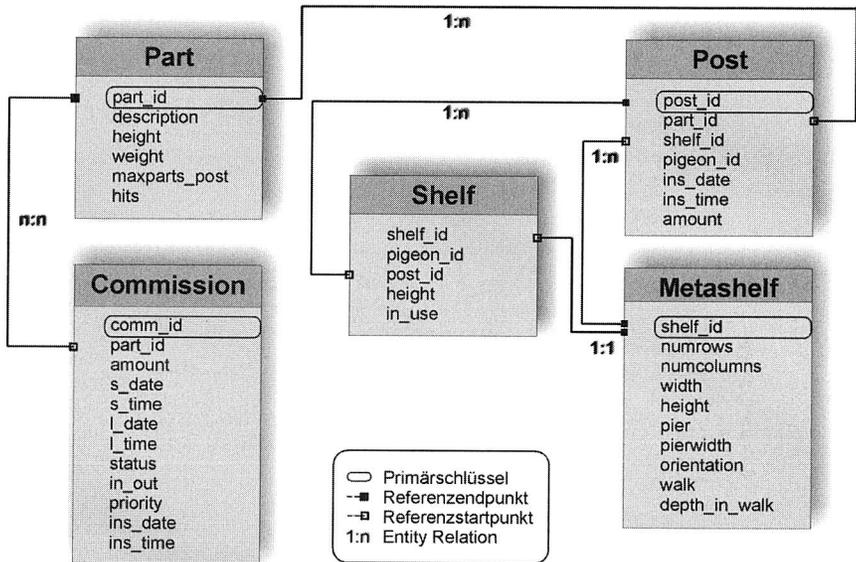


Bild 38: Darstellung der Abhängigkeiten zwischen den Tabellen des Lagerverwaltungssystems als ER-Diagramm

Zur Realisierung einer hohen Flexibilität der Kommissionierzelle erfolgt der Einsatz PC-basierter Steuerungstechnik, die im Vergleich zu konventionellen Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) die Vorteile der PC-Plattform mit denen der klassischen SPS-Programmierung verbinden. So werden die für die Kommissionierung benötigten Roboterprogramme dynamisch über TCP/IP vom Zellenrechner an die Robotersteuerung übertragen. Eine detaillierte Betrachtung der aufgebauten Kommunikationsstruktur findet sich in [103].

5.2 Aufbau einer Komplettmontagezelle mit kooperierenden Robotern

Die Komplettmontagezelle wurde bereits in den konzeptionellen Kapiteln mit ihren besonderen Merkmalen vorgestellt. Die Herausforderung lag nun darin, die gesamten Randbedingungen und Anforderungen in eine Montagezelle zu integrieren. Neben dem reinen Hardwareaufbau ist insbesondere die Gestaltung der zugeordneten Greifsysteme und auch die kommunikationstechnische Anbindung der gesamten Komponenten von großer Bedeutung.

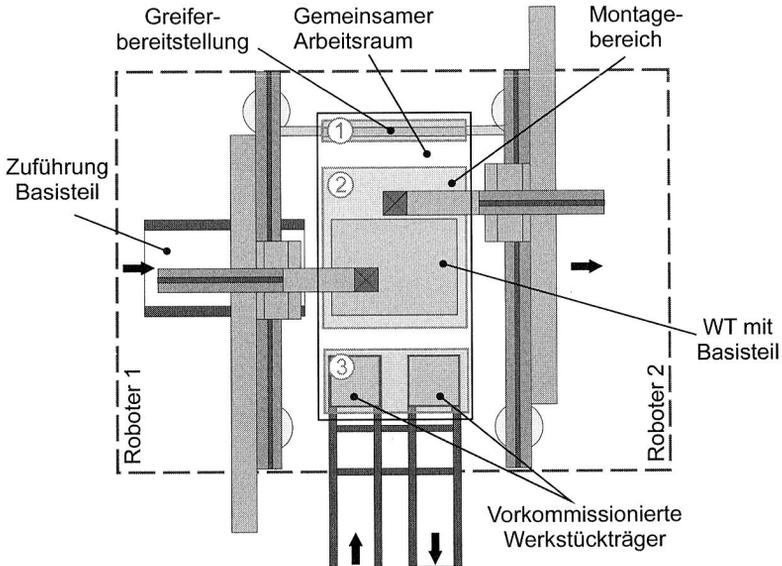


Bild 39: Materialflusslayout und punktsymmetrische Anordnung der Roboter in der realisierten Komplettmontagezelle

Wie Bild 39 zeigt, besteht die realisierte Zelle aus zwei parallel angeordneten Linearrobotern RL 16 („Flächenausleger“) der Firma ReisRobotics, die den gemeinsamen Arbeitsraum mit einer Größe von 2m x 0,9m begrenzen. Das gewählte Layout gewährleistet, dass beide Handhabungsgeräte den gesamten Arbeitsraum erfassen und somit wirklich kooperierend miteinander arbeiten können. Eine Vergrößerung des Arbeitsraumes ist durch den modularen Charakter der Roboter jederzeit möglich, ohne dass Änderungen am Zellenkonzept oder der Steuerung notwendig sind.

Der Arbeitsraum in der Zelle ist in drei logische Bereiche aufgeteilt:

1. die Greiferbereitstellung,
2. der eigentliche Montagebereich und
3. die Bauteilbereitstellung.

Für die Montage der flächigen Bauteile stehen über ein Greiferwechselsystem fünf verschiedene Greifer zur Verfügung. Sollte zusätzliche Greifer für die Montageaufgabe benötigt werden, so ist aufgrund der gewählten Anordnung im Bereich der Greiferbereitstellung die Installation eines Greiferwechsellmagazins, ähnlich den Werkzeugmagazinen in flexiblen Bearbeitungszentren möglich. Durch eine elektromagnetische Kodierung mittels Näherungsschaltern am Wechselflansch ist eine Vertauschung der Greifer und somit eine Bauteilbeschädigung ausgeschlossen. Die implementierten Greifprogramme überprüfen vor der Aktivierung, ob der korrekte Greifer am Flansch befestigt ist.

Materialfluss

Die Zuführung der flächigen Basisteile erfolgt seitlich mittels konventioneller Werkstückträger (800x600mm) unterhalb der x-Achse von Roboter 1. Im Gegensatz zu Portalsystemen, deren Gefahrenbereich durch die Portalstützen begrenzt ist, ergibt sich durch das Verfahren der y-Achse ein toter Bereich auf der Rückseite der Roboter. Dieser so genannte „nicht nutzbare Raum“ [85] im festen Bewegungsraum der Handhabungsgeräte erfährt so eine sinnvolle Nutzung.

Für die vorkommissionierten Werkstückträger stehen zwei unabhängige Spannstationen im vorderen Zellenbereich zur Verfügung, die einzeln ver- und entsorgt werden können. Über diese Schnittstelle ist eine Anbindung an den zellenübergreifenden Materialfluss möglich. Das gewählte Materialflusslayout gewährleistet, dass beide Handhabungsgeräte auf die gesamte Fläche der Werkstückträger zugreifen können.

5.2.1 Integration zusätzlicher Freiheitsgrade mittels eines Hexapoden

Zur Erfüllung der geplanten Montageaufgabe wurden folgende Forderungen an die Auslegung des Hexapoden gestellt:

- Nutzlast: 70kg (Bauteil, Prozesskräfte)
- Neigung: 20° in jede Richtung
- Positioniergenauigkeit: <0,5 mm
- Positioniergeschwindigkeit: <1 sec
- Möglichst geringe Bauhöhe und Stellfläche

Eine ausführliche Marktrecherche ergab, dass kein auf dem Markt verfügbares System die gestellten Anforderungen erfüllt. Insbesondere die Kombination aus Nutzlast und Positioniergenauigkeit wird von den Marktteilnehmern nicht erreicht. Es war deshalb erforderlich, einen Hexapod für die Manipulation der Basisteile zu entwickeln.

Nachfolgend soll zunächst die Vorgehensweise bei der Auslegung und Berechnung einer allgemeinen Stewart-Plattform aufgezeigt und diese Ergebnisse dann auf die spezifischen Anforderungen der Komplettmontagezelle transferiert werden³.

Auslegung und Konstruktion des Hexapoden

Ausgehend vom Anforderungsprofil sind zunächst die geometrischen Dimensionen, insbesondere der Hubzylinder zu ermitteln. Hierfür werden zwei verschiedene Koordinatensysteme betrachtet, das erste $\Sigma = \{x, y, z\}$ ist fest im Mittelpunkt der Basis-Oberseite angebracht. Das zweite Koordinatensystem mit der Bezeichnung

³ Die Entwicklung und Realisierung des Hexapoden erfolgte in Zusammenarbeit mit Herrn Dr.-Ing. Markus Koch

$\Sigma' = \{x', y', z'\}$ befindet sich im Mittelpunkt der Plattform-Unterseite, und lässt sich bzgl. der rotatorischen Orientierung durch die Rotationsmatrix \underline{R} in das Basis-System überführen. Die translatorische Verschiebung der Plattform gegenüber der Basis wird mit Hilfe des Vektors \vec{T} bestimmt. Die Zylinder sind im Bild 40 durch Verbindungslinien zwischen Basis und Plattform dargestellt.

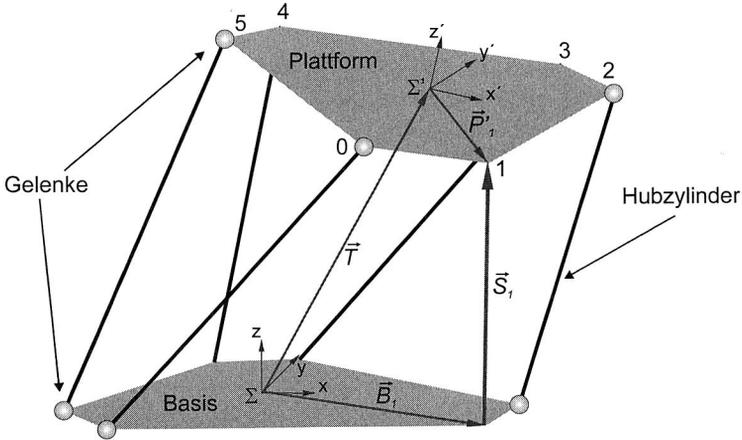


Bild 40: Struktureller Aufbau einer allgemeinen Stewart-Plattform mit sechs Freiheitsgraden

Die Berechnung der Zylinderlänge soll exemplarisch am Beispiel des Zylinders 1 durchgeführt werden, dessen Repräsentant der Vektor \vec{S}_1 ist. Unter Verwendung des Basis-Vektors \vec{B}_1 (im festen Koordinatensystem) und des Plattform-Vektors \vec{P}'_1 (im gestrichelten Koordinatensystem) ergibt sich der gesuchte Vektor dann in allgemeiner Form zu

$$\vec{S}_i = \vec{T} + (\vec{P}'_i \cdot \underline{R}^T) - \vec{B}_i. \quad \forall i = 0,1,2,3,4,5.$$

Die Bestimmung der Basis-Vektoren \vec{B}_i bzw. der Plattform-Vektoren \vec{P}'_i erfolgt entsprechend Bild 41, in dem die für eine Stewart-Plattform typische sechseckige Geometrie zu erkennen ist. Um eine optimale Beweglichkeit zu erhalten, ist die Plattform gegenüber der Basis um einen Winkel von $\phi_{PB} = 60^\circ$ verdreht.

Mit Hilfe dieser Größen ist der Basis- bzw. Plattform-Vektor definiert als:

$$\vec{B}_i = \begin{pmatrix} B_{ix} \\ B_{iy} \\ B_{iz} \end{pmatrix} = r_B \cdot \begin{pmatrix} \cos \phi_{Bi} \\ \sin \phi_{Bi} \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{bzw.} \quad \vec{P}'_i = \begin{pmatrix} P'_{ix'} \\ P'_{iy'} \\ P'_{iz'} \end{pmatrix} = r_P \cdot \begin{pmatrix} \cos \phi_{Pi} \\ \sin \phi_{Pi} \\ 0 \end{pmatrix}$$

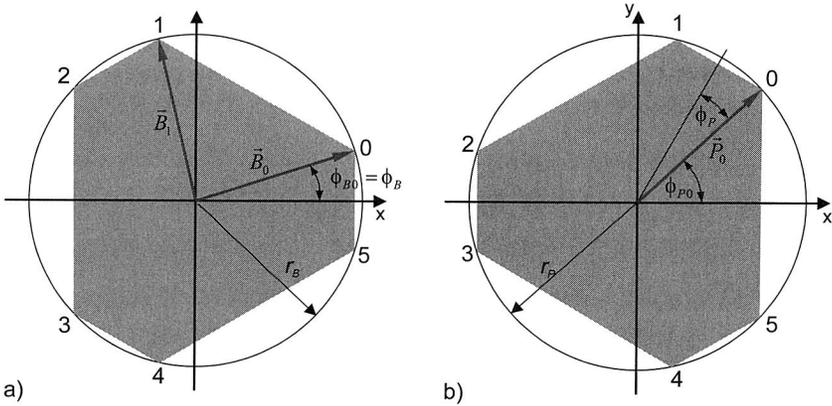


Bild 41: Geometrie der Basis (a) bzw. der Plattform (b) einer Stewart-Plattform

Eine weitere Unbekannte ist die Rotationsmatrix \underline{R} , die zur Überführung der Drehung des gestrichenen Koordinatensystems Σ' in das feste Koordinatensystem Σ notwendig ist. \underline{R} lässt sich dabei als eine orthogonale 3x3-Matrix mit den folgenden Elementen angeben [105]:

$$\underline{R} = \begin{pmatrix} \alpha_x & \beta_x & \gamma_x \\ \alpha_y & \beta_y & \gamma_y \\ \alpha_z & \beta_z & \gamma_z \end{pmatrix}$$

Eine Vereinfachung bezüglich der Vorgabe der Matrixelemente ist durch die Einführung der Euler-Winkel ψ , θ und φ erreichbar. Dazu wird zunächst das gestrichene Koordinatensystem Σ' mit dem Winkel ψ um die z' -Achse gedreht, um dann eine Drehung mit dem Winkel θ um die gedrehte x' -Achse auszuführen. Zum Abschluss der Rotation wird mit dem Winkel φ eine Drehung um die gedrehte z' -Achse vollzogen. Die Rotationsmatrix kann nun aus den drei Euler-Winkeln wie folgt berechnet werden:

$$\underline{R} = \begin{pmatrix} \cos\psi \cos\varphi - \sin\psi \cos\theta \sin\varphi & -\cos\psi \sin\varphi - \sin\psi \cos\theta \cos\varphi & \sin\psi \sin\varphi \\ \sin\psi \cos\varphi + \cos\psi \cos\theta \sin\varphi & -\sin\psi \sin\varphi + \cos\psi \cos\theta \cos\varphi & -\sin\theta \cos\psi \\ \sin\theta \sin\varphi & \sin\theta \cos\varphi & \cos\theta \end{pmatrix}$$

Eine letzte noch zu bestimmende Größe, um die entsprechenden Zylinder-Vektoren zu erhalten, ist der Verschiebungsvektor \vec{T} , mit der die Plattform translatorisch in das feste Koordinatensystem Σ überführt wird. Dies ist notwendig, da vom Anwender die Zielposition \vec{T}_{End} des Mittelpunktes der Oberseite der Plattform relativ zum festen

Koordinatensystem vorgegeben wird. Die Berücksichtigung der Materialstärke von Basis und Plattform erfolgt durch die beiden Vektoren $\vec{h}_B = (0 \ 0 \ h_B)^T$ bzw.

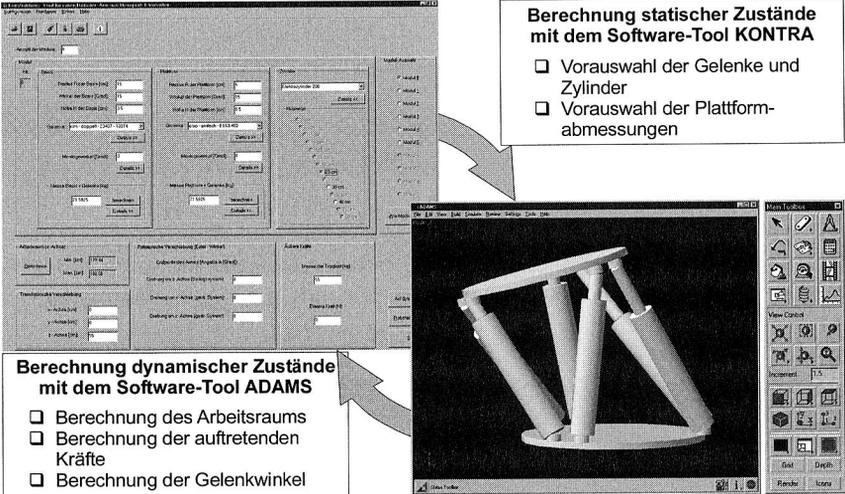
$$\vec{h}_P = (h_{Px'} \ h_{Py'} \ h_{Pz'})^T:$$

$$\vec{T}_B = \vec{h}_B \quad \text{bzw.} \quad \vec{T}_P = \vec{T}_{End} - \vec{h}_P \cdot \underline{R}^T$$

Mit den ermittelten Größen und einigen Vereinfachungen ergeben sich für die Zylindervektoren \vec{S}_i folgende Komponenten:

$$\vec{S}_i = \begin{pmatrix} S_{ix} \\ S_{iy} \\ S_{iz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{Px} + \alpha_{Px} \cdot P_{ix} + \beta_{Px} \cdot P_{iy} - \alpha_{Bx} \cdot B_{ix} \\ T_{Py} + \alpha_{Py} \cdot P_{ix} + \beta_{Py} \cdot P_{iy} - \beta_{By} \cdot B_{iy} \\ T_{Pz} - T_{Bz} + \alpha_{Pz} \cdot P_{ix} + \beta_{Pz} \cdot P_{iy} \end{pmatrix}$$

Diese vereinfachte Berechnung wird deutlich aufwändiger, wenn die räumliche Ausdehnung der Gelenke berücksichtigt werden soll. Es wird an dieser Stelle auf eine ausführliche Erläuterung verzichtet und auf die einschlägige Literatur verwiesen.



Berechnung statischer Zustände mit dem Software-Tool KONTRA

- Vorauswahl der Gelenke und Zylinder
- Vorauswahl der Plattformabmessungen

Berechnung dynamischer Zustände mit dem Software-Tool ADAMS

- Berechnung des Arbeitsraums
- Berechnung der auftretenden Kräfte
- Berechnung der Gelenkwinkel

Bild 42: Zweistufiges Vorgehen zur Auslegung einer Stewart-Plattform [106]

Für die eigentliche Auslegung und Konstruktion des Hexapoden wurde eine zweistufige Vorgehensweise gewählt. Zunächst erfolgte mit dem Konstruktionsprogramm KONTRA [107] die statische Auslegung der Zylinder- und Gelenkgeometrien (Bild 42). Nach der Eingabe der gewünschten Geometrie berechnet das Programm interaktiv die resultierenden Werte wie Zylinderkräfte und -längen, Gelenkwinkel sowie die prinzipielle Erreichbarkeit des gewünschten Punktes. Da jedoch gerade bei schnell wirkenden Zylindern (z. B. Hydraulikzylinder) die dynamischen Kräfte eine

große Rolle spielen und auch bei langsameren Bewegungen die Übergänge zwischen zwei beliebigen Arbeitspunkten zu beachten sind, erfolgte die zusätzliche Betrachtung der dynamischen Zustände der Bewegung. Hierzu wurden die Daten über eine von Koch [107] entwickelte Schnittstelle an das kommerzielle Mehrkörper-Simulationssystem *ADAMS* der Firma Mechanical Dynamics übergeben. Über eine integrierte Protokollfunktion lassen sich relevante Werte, wie die Gelenkwinkel und resultierenden Zylinderkräfte, die sich während der Bewegung ergeben, aufzeichnen und auswerten. Mit den so gewonnenen Daten ist eine Optimierung der Konstruktion in *Kontra* möglich.

Nach einer ausführlichen Marktrecherche erfolgte die Auswahl von Elektro-Hubzylindern mit Schrittmotoransteuerung, da diese zum einen eine sehr gute Dynamik aufweisen, zum anderen durch die Verwendung eines Kugelspindeltriebes selbsthemmend sind und somit auch bei einem Ausfall der Energieversorgung in Position bleiben. Pneumatische oder hydraulische Antriebe erwiesen sich als nicht geeignet, da neben der Fail-Safe-Problematik die geforderte Genauigkeit von den Herstellern nicht garantiert werden konnte.

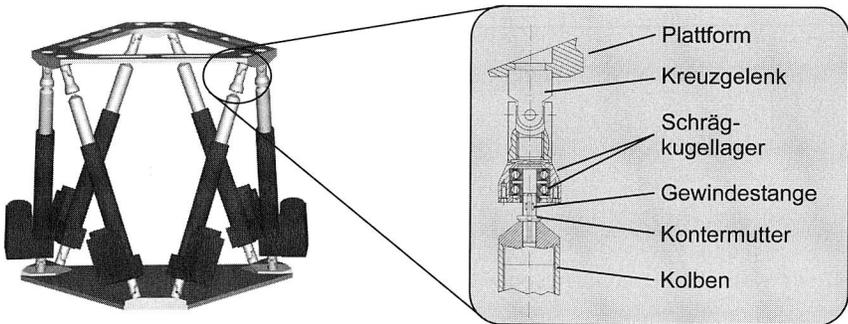


Bild 43: Digital-Mock-Up des entwickelten Hexapoden mit Schnitt durch das plattformseitige Gelenk [108]

Bild 43 zeigt einen Schnitt durch das plattformseitige Gelenk, das als Kreuzgelenk mit zwei Freiheitsgraden realisiert ist und dessen Anbindung an den Kolben. Neigungen des Hexapoden verursachen jedoch auch Tangentialkräfte, die von den Gelenken nicht aufgenommen werden können und so direkt auf den Kolben weitergeleitet werden würden. Da dies bauartbedingt nicht zulässig ist, wurden unterhalb der Gelenke jeweils zwei Schrägkugellager integriert, die durch den zusätzlichen Freiheitsgrad die entstehenden Drehmomente aufnehmen.

Steuerung des Hexapoden

Zur Ansteuerung des Hexapoden im regulären Betrieb wurden zwei verschiedene Steuerungskonzepte entwickelt, die nachfolgend erläutert werden. Die beiden Lö-

sungen sind zueinander kompatibel und bauen auf eine übergeordnete PC-basierte Steuerung auf, von der die Solldaten übertragen werden.

Die erste Lösung integriert den Hexapod als Profibus/DP-Client in das bestehende Profibus-Netz der Montagezelle. Merkmal dieser Lösung ist, dass die gesamten Vorteile, die der Profibus bietet, auch für den Hexapod gelten. Hierzu zählen die einfache Anbindung und die problemlose Übertragung der Prozessdaten auch über weite Entfernungen. Die eigentliche Steuerung läuft auf einem Embedded-PC unter dem Echtzeitbetriebssystem VxWorks. Der Rechner ist für die Anbindung an den Feldbus mit einer Profibus-Karte der Firma Hilscher ausgerüstet. Die Steuerungssoftware wertet das Protokoll mit der übertragenen Zielkoordinate aus und berechnet die resultierenden Stellgrößen für die angeschlossenen Hubzylinder. Entsprechend Bild 44 sind diese über eine einzige RS 232/485-Schnittstelle mit dem Steuerrechner verbunden. Ein in die Leitung integrierter Konverter erledigt die Signalumsetzung von der klassischen seriellen Schnittstelle auf die in der Automatisierungstechnik häufig verwendete Stromschnittstelle RS485.

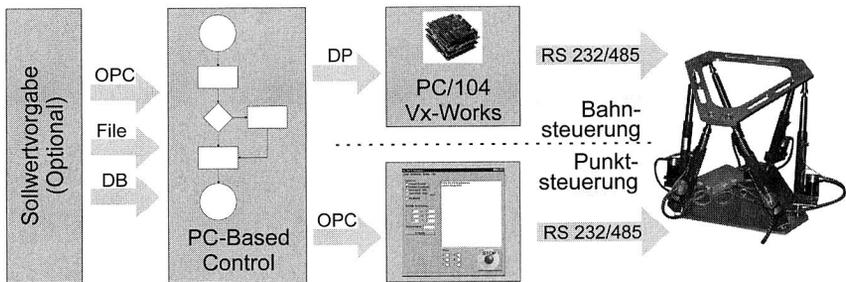


Bild 44: Realisierte Lösungen für die Ansteuerung des Hexapoden [109]

Die seriell geschalteten Zylinder-Antriebe besitzen eindeutige Adressen, über die eine Zuordnung der Steuerbefehle und Antwortcodes erfolgt. Nach dem Erreichen der Zielposition, das der Steuerrechner durch einen speziellen Befehl von jedem Antrieb sequentiell abfragen muss, wird ein Antworttelegramm über den Profibus an die übergeordnete Steuerung gesendet.

Der Vorteil dieses Lösungsansatzes liegt in der Transparenz für den Anwender. Der Hexapod ist zusammen mit dem Embedded-PC als eine Black-Box zu sehen, die direkt an den Feldbus angeschlossen und betrieben werden kann, ohne dass er sich mit den komplexen Transformationen beschäftigen muss. Der gewählte Embedded-PC benötigt darüber hinaus eine sehr kleine Stellfläche und eignet sich deshalb besonders gut für eine Schaltschrankmontage.

Die Fixierung auf den Profibus/DP als Übertragungsprotokoll widerspricht allerdings der Forderung nach einer möglichst herstellerunabhängigen Gesamtlösung. Aus die-

den Schrittmotor berechnet werden und deshalb bei einem Neustart nicht bekannt sind.

- *Manuelle Positionierung (Manuell)*

Die manuelle Positionierung erlaubt das Anfahren einer bestimmten Koordinate, die wahlweise im kartesischen Koordinatensystem oder in Eulerwinkeln vorliegen kann. Ist die Position außerhalb des Arbeitsraumes des Hexapods, so erfolgt im Ausgabefenster eine entsprechende Meldung. Zusätzlich zur Position lässt sich die Bewegungsgeschwindigkeit einstellen. Ohne Angabe beträgt sie aus Sicherheitsgründen 10% der Maximalgeschwindigkeit.

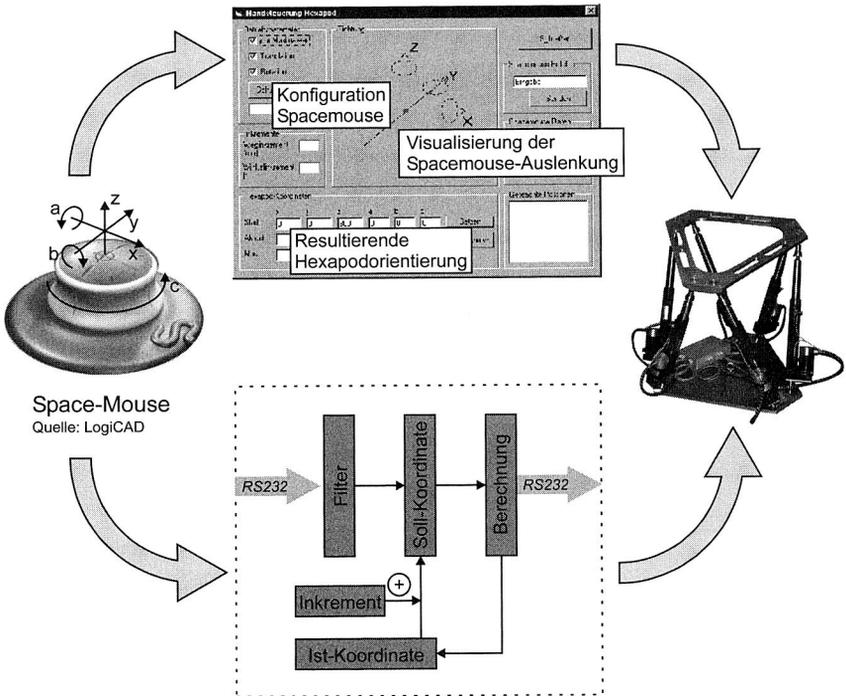


Bild 46: Intuitive Manipulation des Hexapods in allen sechs Freiheitsgraden mittels einer Space-Mouse

- *Teachen mittels Spacemouse (Manuell)*

Das Anfahren einer neuen Position unter unmittelbarer Angabe der korrekten Koordinate ist bei einer komplexen Kinematik, wie es insbesondere ein Hexapod darstellt, sehr schwer. Deshalb wurde mit dieser Option eine komfortable Möglichkeit geschaffen, den Hexapod wie einen konventionellen Roboter zu teachen. Als Handbediengerät wird eine so genannte Spacemouse verwendet.

det. Dieses Gerät, das ursprünglich für die einfache und intuitive Manipulation von Objekten in 3D-CAD-Systemen entwickelt wurde, erlaubt das Bewegen des Hexapoden in allen sechs Freiheitsgraden mit nur einem Bedientknopf (Bild 46).

Da die Spacemouse eine hohe Empfindlichkeit aufweist, kommt es insbesondere bei ungeübten Personen sehr leicht zu ungewollten Bewegungen. Aus diesem Grund lassen sich für alle sechs Achsen Filter definieren, die den Schwellwert festlegen, der überschritten werden muss, bevor eine Verarbeitung des Ereignisses erfolgt. Die Berechnung der resultierenden Zielkoordinate erfolgt entsprechend nachfolgender Formel:

$$\vec{S} = \begin{cases} v \cdot \vec{i} + \vec{I} & \text{für } v \geq \text{Filter} \\ \vec{I} & \text{für } v < \text{Filter} \end{cases} \quad \text{mit} \quad \begin{cases} v = \text{Verstärkungsfaktor} \\ \vec{i} = \text{Inkrementvektor} \\ \vec{I} = \text{Istvektor} \end{cases}$$

\vec{S} = Sollvektor

Überschreitet der Wert der Auslenkung nicht den eingestellten oder Schwellwert, so kommt es zu keiner Änderung der Ist-Koordinate.

- *Einlesen aus Datei (Automatik)*

Nachdem die bislang vorgestellten Bewegungsmethoden immer eine Schnittstelle zum Benutzer realisiert haben, existieren auch zwei unterschiedliche Methoden für den Automatikbetrieb. Die erste besteht im Einlesen von Koordinaten- und Geschwindigkeitswerten aus einer ASCII-Datei. Die Steuerung liest die Datei sequentiell ein und fährt die gespeicherten Positionen nacheinander an. Diese Vorgehensweise bietet sich insbesondere bei der Messung der Positionier- und Wiederholgenauigkeit an, da der gesamte Ablauf automatisch, ohne Benutzereingriff erfolgt. Die anzufahrende Soll-Koordinate kann dabei sowohl in Euler-Winkeln, als auch in kartesischen Koordinaten vorliegen (Bild 47).

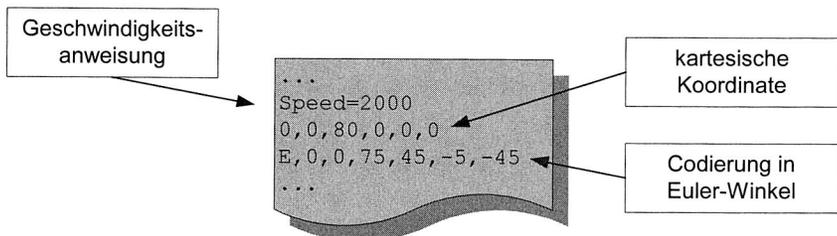


Bild 47: Aufbau der ASCII-Datei zum Einlesen von Koordinaten

- *Steuerung mittels OPC (Automatik)*

Das interessanteste Feature der Steuersoftware ist die Möglichkeit, als OPC-Client die Sollkoordinaten von einem beliebigen OPC-Server zu empfangen. In

der realisierten Montagezelle verbindet sich die Software mit der übergeordneten OPC-fähigen Steuerung. Der Datenaustausch erfolgt über zuvor definierte Variablen des Typs `wstring` (vgl. Bild 45). Da OPC das Publisher-Subscriber-Modell unterstützt, erhält die Hexapod-Steuerung automatisch die geänderten Variablenwerte übermittelt. Dieser Mechanismus bietet den Vorteil, dass der Client beim Server nicht pollen muss, um die Änderungen zu erhalten.

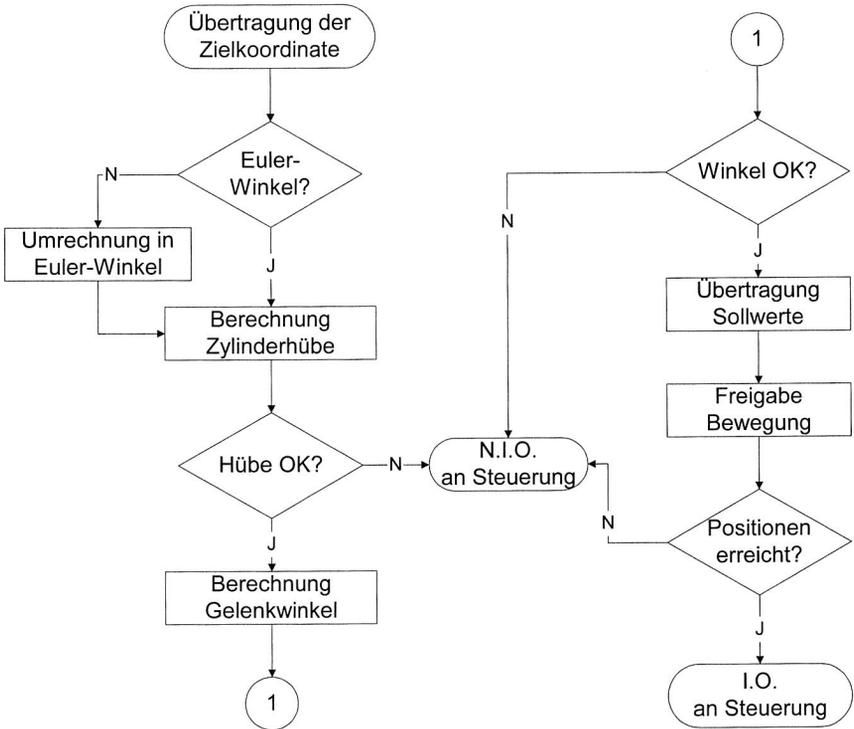


Bild 48: Vereinfachtes Ablaufdiagramm zur Steuerung des Hexapoden

Nach erfolgter Übertragung und einer Umrechnung kartesischer Koordinaten in Euler-Winkel erfolgt die Berechnung der resultierenden Zylinderhübe (Bild 48). Falls die Position erreichbar ist, schließt sich in einem zweiten Schritt die Berechnung der aus der Position resultierenden Gelenkwinkel an. Diese Prüfung ist notwendig, da ein Überschreiten der zulässigen Winkel zu einem Verklemmen und im schlimmsten Fall zu einer Beschädigung der Gelenke bzw. der Gelenkböcke führt. Nach erfolgreicher Prüfung werden die berechneten Soll-

werte über eine RS323/RS485-Leitung an die in Serie geschalteten Antriebsregler übertragen.

Aufgrund der Latenzzeit bei der Datenübertragung ist bei einer sequentiellen Übertragung mit einer ungleichmäßigen Bewegung der Zylinder zu rechnen. Aus diesem Grund wird über ein herstellerspezifisches Protokoll zunächst der neue Sollwert für jeden einzelnen Zylinder übertragen und im Anschluss quasi-synchron gestartet (vgl. Bild 48).

Sobald der Hexapod positioniert ist, erfolgt die Quittierung des Auftrags durch den Client. Analog zu dem oben beschriebenen Mechanismus greift dieser, in diesem Fall allerdings schreibend, auf eine projektierte Variable im OPC-Server zu.

Abgerundet wird die Software durch eine umfangreiche, dialoggeführte Konfiguration der benötigten Parameter. Hierzu gehören neben den projektierten Item-Namen (siehe 2.4.3 und Bild 45) die seriellen Schnittstellen für die Anbindung der Achsregler und der Spacemouse. Zur Vereinfachung einer späteren Offline-Programmierung der gesamten Zelle ist eine Verschiebung des lokalen Koordinatensystems auf den Nullpunkt des Weltkoordinatensystems der Zelle möglich.

	Profibus	OPC
Flexibilität	o	++
Offenheit	o	++
Anforderungen an übergeordnete Steuerung	Profibus fähig	Beliebige Steuerung (Voraussetzung OPC-Server)
Kosten	-	++
Verdrahtung	+	-
Max. Signallänge [m]	< 1200 [110]	Theor. unbegrenzt

Tabelle 4: Gegenüberstellung der realisierten Ansteuerungen für den Hexapoden

Tabelle 4 enthält eine abschließende Zusammenstellung der beiden Steuerungsoptionen. In einer weiteren Ausbaustufe ist auch die Integration der beiden Konzepte denkbar. So könnte das Teachen nach wie vor mittels der Spacemouse und der Windows-Software erfolgen, die Übertragung der Positions-Sollwerte jedoch nicht direkt über die serielle Schnittstelle, sondern via OPC an die Steuerung, die wiederum die Daten über den Profibus an den Hexapod sendet.

5.2.2 Entwurf eines flexiblen Greifers für die Handhabung flächiger Teile

Variantenreiche, flächige Teile stellen besondere Herausforderungen an die Gestaltung der zugeordneten Greifsysteme. Bedingt durch die Bauteilgeometrie eignen sich nur pneumatische Greifer für die Handhabung. Mechanische Greifer wie Zangen- oder Backengreifer finden an den Bauteilen keine hinreichend ausgeprägten Formmerkmale, die den sicheren Zugriff von zwei Seiten erlauben. Der Einsatz von Magnetgreifern hingegen, die sich prinzipiell für die vorliegende Bauteilgeometrie eignen, verlangt die Verwendung ferromagnetischer Materialien. Diese Forderung wird von dem verwendeten Beispielprodukt erfüllt. Das Potential der Komplettmontagezelle würde jedoch durch diese Beschränkung künstlich reduziert, da die Montage von Bauteilträgern aus Aluminium oder Kunststoff-Metall-Hybrid-Werkstoffen dann nicht mehr möglich wäre.

Konventionelle Greifer, die in Form von Baukastensystemen auf dem Zulieferermarkt von unterschiedlichen Herstellern angeboten werden, erfüllen die Anforderungen an die hohe Variantenflexibilität nicht hinreichend, obwohl manche Hersteller mehr als 20.000 verschiedene Varianten von Saugern in ihrem Sortiment führen (z.B. [111]). Der Grund hierfür ist in dem statischen Aufbau konventioneller Sauggreifer zu sehen. Die einmal entworfene Saugeranordnung lässt sich in der Regel nicht, oder nur durch manuelle Eingriffe an neue Bauteile anpassen.

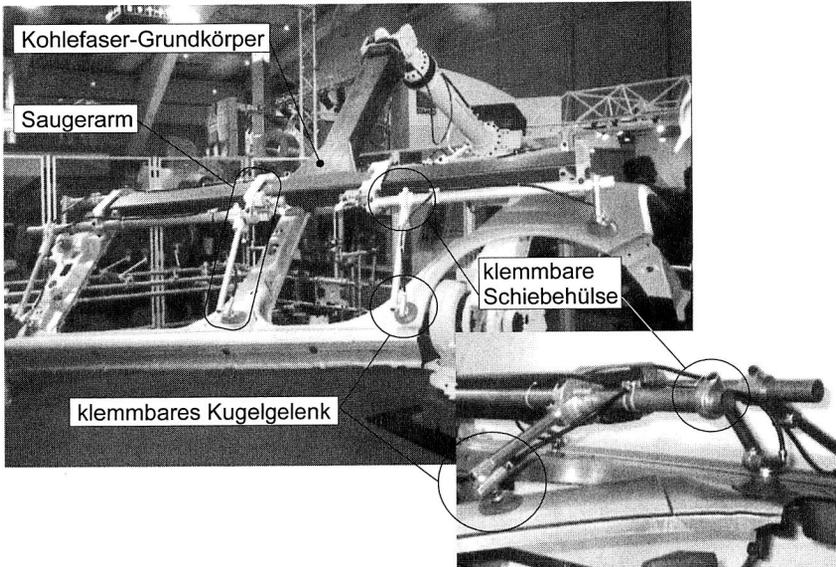


Bild 49: Flexibler Greifer aus Kohlefaser mit verstellbaren Greifarmen zur Handhabung flächiger Produktstrukturen [64]

Ein entsprechendes Beispiel für das Handling von Blechplatten ist in [64] beschrieben (Bild 49). Es handelt sich hierbei um einen besonders leichten und einfach aufgebauten Sauggreifer, dessen Saugnäpfe an horizontalen Kohlefaserstangen befestigt sind. Über Schnellverschlüsse kann deren Position an neue Bauteilgeometrien angepasst werden [64]. Diese Lösung ist jedoch für die variantenreiche Fertigung mit kleinen Losgrößen nicht hinreichend, da die manuelle Verstellung wertvolle Taktzeit kostet.

Da die unterschiedliche Gestaltung der Basisteile keine einheitlichen Greifpunkte ermöglicht, der Einsatz verschiedener, den spezifischen Varianten angepasster Greifer aufgrund der Variantenanzahl und der damit verbundenen Investitionskosten und des Raumbedarfs jedoch nicht sinnvoll ist, musste ein flexibler Greifer entwickelt werden, dessen Greifposition programmgesteuert den flächigen Bauteilen anpassbar ist.

Der Hauptfokus der meisten Entwicklungs- und Forschungsvorhaben auf diesem Bereich lag in den letzten Jahren in der Integration möglichst vieler Freiheitsgrade in einen komplexen Greifer. Die so genannte Karlsruher Hand (z.B. [112]) und die DLR-Hand [113] erlangten hier, insbesondere auch in fachfernen Kreisen, erhebliche Beachtung. Deren Aufgabenstellung ist aber nicht die Entwicklung eines flexiblen Greifers im klassischen, montagetechnischen, Sinn, sondern die möglichst exakte Nachbildung der Freiheitsgrade der menschlichen Hand und somit auch deren Einsatzgebiet.

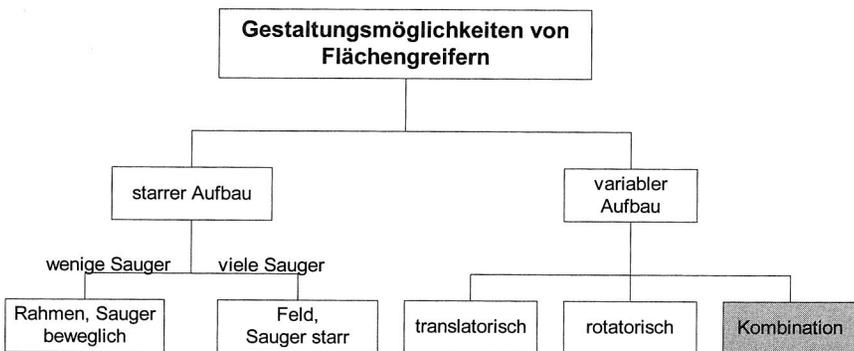


Bild 50: Betrachtete Geometrie- und Strukturvarianten bei der Entwicklung des Flächengreifers

Bei der hier vorliegenden Aufgabe liegt die Herausforderung nicht in der Integration möglichst vieler Freiheitsgrade, sondern in der Anpassung an flächige Bauteile. Insbesondere an der TU Dortmund liefen zu diesem Themenbereich verschiedene Untersuchungen. Aufbauend auf den Arbeiten von Jodin [62] entwickelte Böger [61] ein Verfahren zur Dimensionierung von Greifelementen zur Handhabung von flächigen,

forminstabilen Materialien. Beispielhaft wurden für Kunstleder Kennwerte für die statischen und dynamischen Belastung bei der Handhabung ermittelt. Allerdings sind die Greifer nicht in der Lage Niveauunterschied im Greifobjekt, wie es bei einer Vielzahl von technischen Produkten vorkommt, auszugleichen.

Basierend auf diesen Forderungen wurde deshalb ein Konzept für einen flexiblen „Flächengreifer“ ausgearbeitet. Der Greifer muss zum einen eine große Fläche abdecken können, darf aber andererseits im „leeren“ Zustand, also in der Greiferwechselstation nur wenig Raum beanspruchen. Des weiteren sollte er in der Lage sein, Niveau- und Winkelunterschiede in der Greiffläche ausgleichen zu können. Die Flexibilität des Greifers durfte dabei aber nicht auf Kosten des Gewichtes gehen, da sonst die Nutzlast des Roboters reduziert werden würde.

Bedingt durch die eingeschränkten Platzverhältnisse im Bereich der Greiferbereitstellung (vgl. hierzu auch Bild 39) schieden starre Flächengreifer, also Greifer, bei denen die Sauger an einer Rahmenstruktur befestigt sind, frühzeitig aus. Als Ideallösung stellte sich ein flexibler Greifer heraus, bei dem die Greifarne sowohl radial bezüglich der Z-Achse schwenkbar und gleichzeitig linear verschieblich sind.

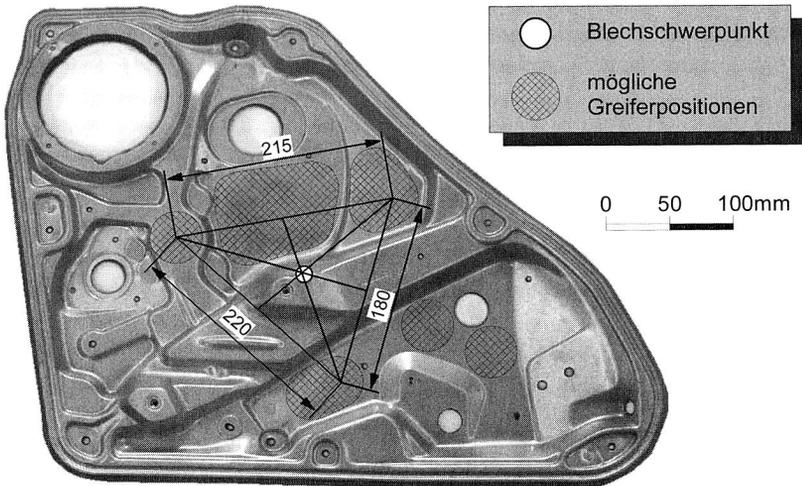


Bild 51: Mögliche Greifbereiche auf einem Türmodul mit manuellem Fensterheber (Bildquelle: Brose)

In Bild 51 sind die Flächen schraffiert dargestellt, die als Greifbereiche verwendet werden können. Aus statischen Gründen ist es erstrebenswert, dass die Greifer einen möglichst weiten Abstand voneinander besitzen. Aufgrund der komplexen Geometrie ist dies bei dem vorliegenden Bauteil jedoch nicht möglich, da die Außenbereiche des Bauteils durch die umlaufende Randsicke sowie Bohrungen und Aussparungen keine hinreichend großen und ebenen Flächen bieten.

Im Zentrum des Bauteils sind hingegen mehrere ununterbrochene Flächen vorhanden, die durch einen ca. 30mm hohen Steg voneinander getrennt sind. Betrachtet man den eingezeichneten Schwerpunkt zusammen mit den Entfernungen des durch die Saugflächen aufgespannten Dreieckes, so sind die sich ergebenden Abstände hinreichend um eine ausreichende Stabilität aufgrund der Beschleunigungskräfte zu gewährleisten. Die Verwendung von weniger als drei Saugern ist zum einen aus statischen Gründen nicht sinnvoll, zum anderen erhöht sich entsprechend nachfolgender Formel auch die notwendige Saugerfläche [114]:

$$\text{Saugerdurchmesser [mm]} = 113 \cdot \sqrt{\frac{\text{Gewicht [kg]} \cdot \text{Sicherheitsfaktor}}{\text{Unterdruck [\%]} \cdot \text{Anzahl Sauger}}}$$

Ausgehend von einem maximalen Bauteilgewicht in Höhe von ca. 15kg, einem Sicherheitsfaktor von 2 sowie einem zu Verfügung stehenden Unterdruck von 60% ergibt sich ein Saugerdurchmesser von 46mm. Die Erhöhung der Saugerszahl auf vier führt nur zu einer geringen Reduzierung auf ca. 40mm, bedeutet aber gleichzeitig eine statische Überbestimmung sowie den Zwang vier geeignete Saugflächen zu identifizieren.

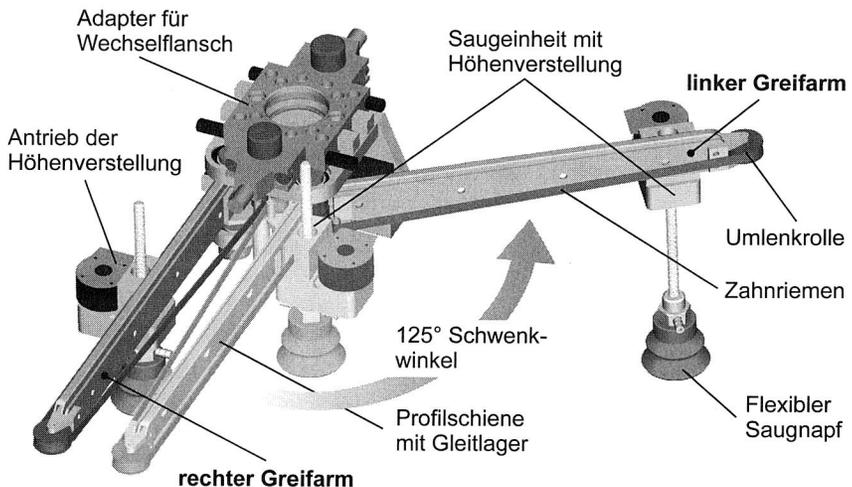


Bild 52: Darstellung des entwickelten Flächengreifers in Transportstellung und teil-aufgeklappt (dritter Sauger verdeckt)

Der in Bild 52 dargestellte Pneumatikgreifer erfüllt alle Anforderungen an die Handhabung flächiger Bauteile. Er besteht aus drei unabhängig arbeitenden Sauggreifern, wovon zwei beliebig entlang der ca. 300mm langen Greifarme positionierbar sind. Als Referenzpunkt dient der starre, hinter dem Greiferwechselflansch befestigte dritte Saugnapf. Durch die Kombination der beiden rotatorischen und vier linearen Frei-

heitsgrade der Greiferarme ist eine sehr gute Adaption an die Greifsituation möglich. Der Zugewinn an Flexibilität durch eine Verstellmöglichkeit des dritten Saugnapfes ist vernachlässigbar, so dass aus Gewichts- und Kostengründen darauf verzichtet wurde.

Die Realisierung der linearen Freiheitsgrades konnte durch eine besondere die Gestaltung der Greiferarme erreicht werden. Sie bestehen aus einem als Führungsschiene verwendeten Aluminiumprofil mit integriertem Kunststoffgleitlager. An diesem ist die so genannte Saugereinheit befestigt. Über einen, von einem Gleichstrommotor angetriebenen Zahnriemen erfolgt die Positionierung der Einheit entlang des Arms. Die Saugereinheit besteht aus einem Schrittmotor, der den eigentlichen Sauger über eine Gewindestange vertikal um 80 mm in z-Richtung bewegt werden kann. Ausgehend von der Nullstellung ist ein Absenken um 50 mm bzw. ein Anheben um 30 mm möglich. Falls die Greiffläche auf einer schrägen Fläche (bezogen auf die Flächennormale) liegen sollte, erlauben die verwendeten Faltenbalg-Sauger einen Winkelausgleich von maximal 10°.

Ein weiterer Freiheitsgrad des Greifers ergibt sich durch die Möglichkeit, die beiden Greiferarme um jeweils 125° zu schwenken. Dies erlaubt zum einen eine platzsparende Aufbewahrung im Greiferwechselfahnhof und zum anderen eine hohe Anpassungsfähigkeit an das zu greifende Bauteil. Für den eigentlichen Greifvorgang werden die beiden Arme entsprechend der Bauteilvariante aufgeklappt und positioniert. Sehr schnelle und leistungsfähige Servo-Motoren aus dem Modellbau stellen das notwendige Drehmoment zur Verfügung.

Bei einem Gesamtgewicht exklusive des Wechselfansch-Adapters von ca. 2kg deckt der Greifer eine Fläche von mehr als 1.963 cm² ab. Der so aufgespannte Greifraum besitzt ein resultierendes Volumen von 15.708 cm³.

Zur Bewegungssteuerung wurde ein Mikrocontroller der Baureihe C167CR der Firma Infineon Technologies AG direkt in den Greifer integriert, der die Positionsanweisungen über die serielle Schnittstelle von einem übergeordneten Master empfängt. Über ein definiertes Protokoll ist es diesem möglich, die beiden Arme unabhängig voneinander zu positionieren. Hierbei lassen sich die Armrotation in Winkelminuten und die horizontale und vertikale Verschiebung des Saugers in Millimeter angeben (Bild 53).

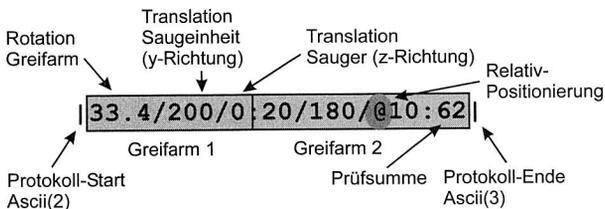


Bild 53: Beispielhaftes Telegramm zur Positionierung der Greifer des entwickelten Flächengreifers

Das Protokoll besteht aus drei Hauptteilen, die jeweils durch einen Doppelpunkt „:“ voneinander getrennt werden. Nach der Telegrammanfangskennung, die über das Ascii-Zeichen 2 realisiert ist, kommt der erste Datenteil, der die Koordinaten für den linken Greifarm beinhaltet. Die Trennung der Koordinaten jedes Freiheitsgrades erfolgt über das Zeichen „/“. Neben der Absolutpositionierung ist auch eine Relativpositionierung möglich. Dies geschieht über ein vorangestelltes „@“-Zeichen vor der gewünschten Achse. Mit dem in Bild 53 dargestellten Telegramm erfolgt die Absolutpositionierung von fünf Achsen. Die sechste Achse, also die z-Achse des zweiten Armes, wird relativ um 10 mm zur letzten Position angehoben.

Für die Übertragung der Sollpositionen wurde aus Kostengründen eine konventionelle RS232-Schnittstelle gewählt. Ebenso ist aber auch die direkte Anbindung an ein Feldbussystem denkbar. Hierfür existieren für alle populären Feldbusse fertige Protokoll-Chips, die in die Mikrocontroller-Schaltung integrierbar sind. Der C167CR unterstützt das CAN-Protokoll direkt. Dieses wird von den eingesetzten Linearrobotern auch zur internen Kommunikation verwendet. Es ist deshalb vorgesehen in einer späteren Ausbaustufe auf diese Kommunikationsart zu wechseln.

Zur Absicherung der Kommunikation wird jedes gesendete Telegramm mit einer Prüfsumme (Check sum, CS) abgeschlossen, die den dritten und damit letzten Hauptteil des Protokolls bildet. Die Berechnung erfolgt durch eine Exklusiv-Oder-Verknüpfung (\oplus) aller Bytes einschließlich der Separatoren („:“):

$$CS = \text{Datenbyte1} \oplus \text{Datenbyte2} \oplus \dots \oplus \text{DatenbyteN} \oplus \text{Separator}$$

Die Berechnung der Prüfsumme erfolgt dabei als binärer Byte-Wert, wobei der Wertebereich des Ergebnisses zwischen 00_H und FF_H liegt. Um eine lesbare Darstellung der Prüfsumme zu erreichen, wird dieses Byte in zwei Hälften aufgeteilt (Wertebereich jeweils 0_H bis F_H). Diese beiden Werte werden als Ascii-Darstellung in das Telegramm geschrieben. Aus 0_H bis 9_H wird somit „0“ bis „9“, aus A_H bis F_H entsprechend „A“ bis „F“. Alternativ kann jederzeit die Prüfsumme als „XX“ geschrieben werden. In diesem Fall erfolgt keine Überprüfung des Telegramms durch die beteiligten Kommunikationspartner. Sobald die Positionierung abgeschlossen ist, erfolgt eine Quittierung an den Master, der im Gegenzug den eigentlichen Greifvorgang freigeben kann.

Durch die Verwendung eines Greiferwechselsystems kann das Handhabungsgerät den Greifer in sehr kurzer Zeit automatisch wechseln. Die Energie- und Signalübertragung an den Mikrocontroller erfolgt über einheitliche Steckkontakte im Wechselsystem, so dass beide Handhabungsgeräte den Greifer verwenden können.

5.2.3 Realisierung einer durchgängigen Kommunikationsarchitektur

Die Realisierung der geforderten Flexibilität für die Montagezelle verlangt nach einem durchgängigen Kommunikationssystem, das alle Komponenten einfach und zuverlässig miteinander verbindet. Hierfür wurde eine mehrstufige Hierarchie basierend auf Feldbussystemen und anerkannten Protokollen, geschaffen. Die beiden obersten

Hierarchiestufen, die Planungs- und die Leitebene sind Gegenstand des Kapitels 6 und werden aus diesem Grund an dieser Stelle noch nicht betrachtet.

Die Problemstellung, die sich bei der Vernetzung der verschiedenen Anlagenteile ergibt, wurde bereits in Kapitel 2.3 verdeutlicht: Es gibt nicht *den* Bus für die Vernetzung von Anlagen. Es ist festzustellen, dass die Komplettmontage mit allen vorgestellten Bussystemen aufgebaut werden kann. Aufgrund bereits vorhandener Erfahrungen mit AS-i ist nach [23] der Systemgedanke mit Profibus/DP zu favorisieren.

Aus diesem Grund kommt im Bereich der digitalen Sensorik und Aktorik das AS-Interface zum Einsatz. Über diesen Bus ist der zelleninterne Materialfluss, sowie die digitalen Ein- und Ausgänge der beiden Robotersteuerungen angeschlossen. Der AS-i fungiert als eine Art Sammelleitung für binäre Signale. Diese werden vom DP-AS-Interface-Link an den übergeordneten Profibus/DP weitergeleitet. Ein optionaler Client am Profibus stellt der Hexapod dar. Alle Signale des Profibus-Netzes werden in dem übergeordneten Zellenrechner, der gleichzeitig als Profibus-Master fungiert, verarbeitet. Da auch an dieser Stelle eine möglichst hohe Unabhängigkeit von herstellereigenen Standards erhalten werden sollte, kommt für die Ansteuerung eine IEC 1131-3 konforme, PC-basierte Steuerung zum Einsatz. Durch die integrierte OPC-Funktionalität stellen automatisch alle projektierten Prozessvariablen der Planungs- und Leitebene zur Verfügung (Bild 54).

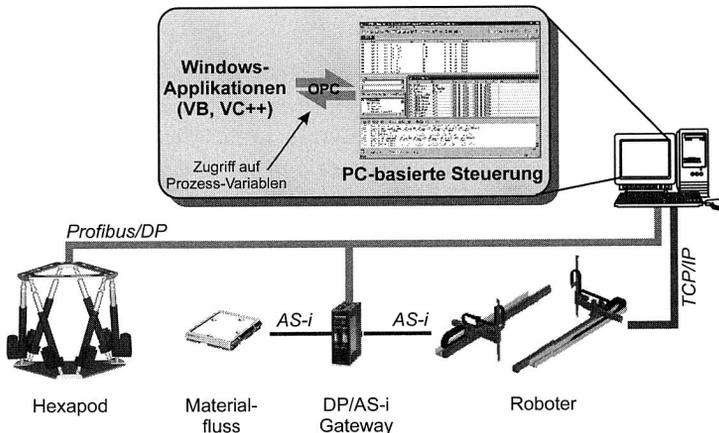


Bild 54: Hierarchische Kommunikationsstruktur der Prozess- und Zellenebene

Tabelle 5 gibt zusammen mit Bild 54 eine Übersicht über die verschiedenen Protokolle, die zur Realisierung einer durchgängigen Kommunikation in der Komplettmontagezelle notwendig sind.

Kommunikations-Protokoll	Aufgabe
OPC	Übermittlung der Identnummer des Werkstückträgers an FAPS-ID (s. folgendes Kapitel) Anbindung der übergeordneten Koordinierungsinstanz an die PC-basierte Steuerung (s. Kapitel 6) Übertragung der Sollkoordinaten an Hexapodsteuerung
TCP/IP	Übertragung der Roboterprogramme an beide Robotersteuerungen
RS 232	Übertragung Sollwerte an Achsregler des Hexapoden
Profibus	Übertragung der digitalen I/O über Interface zu AS-i
AS-Interface	Anbindung der Sensoren und Aktuatoren an Profibus

Tabelle 5: Übersicht über die verwendeten Kommunikationsprotokolle in der Montagezelle

Es soll an dieser Stelle nochmals hervorgehoben werden, dass die Wahl des AS-Interface und des Profibus/DP als Übertragungsprotokolle für die Feld- und Sensorebene für die weitere Funktionalität der Komplettmontagezelle nicht zwingend sind. Es wäre ohne weiteres möglich, auch den Interbus/S oder CAN hierfür zu verwenden.

5.3 Durchgängige Bauteilidentifikation im heterogenen Steuerungsumfeld

Entsprechend der in Kapitel 4.5 vorgeschlagenen Lösung wird für die Identifikation der Werkstückträger in der Komplettmontagezelle eine durchgängige Lösung auf Basis von RF-Transpondern eingesetzt (vgl. Bild 55). Die als read-only ausgeführten Tags verfügen über eine weltweit eindeutige 10-stellige Hexadeximalzahl, die als Zeichenkette ausgelesen werden kann.

Der Nachteil bisheriger Identifikationssysteme, auch der in Kapitel 4.5 ausgewählten Transponderlösung, besteht in der Herstellerabhängigkeit der Anbindung von Lesegerät zu Auswertesoftware. Beim Einsatz von herkömmlichen speicherprogrammierbaren Steuerungen war die Verwendung eines speziellen Kommunikationsprozessors in Verbindung mit spezifisch angepassten Softwarebausteine nötig. Über diese konnte die Identnummer in die Steuerung eingelesen werden. Die Weiterverarbeitung und Verknüpfung der „nackten“ Nummer mit den hinterlegten Informationen musste jeweils neu an die aktuelle Datenstruktur angepasst werden. Beim Übergang zu PC-basierten Steuerungssystemen entfällt lediglich die Einbindung des Kommunikationsprozessors, da in diesem Fall auf die Ressourcen des PCs zugegriffen werden kann. Die Auswertesoftware bietet in der Regel keine parametrierbare Schnitt-

stelle zu einer Datenbank. Auch hier erfolgt lediglich die Bereitstellung der gelesenen Identnummer. Es blieb dem Systementwickler überlassen, wie er diese eindeutige Nummer mit den in einer Datenbank hinterlegten Informationen, hier insbesondere den Fahrplänen für die spezifische Variante, verknüpft.

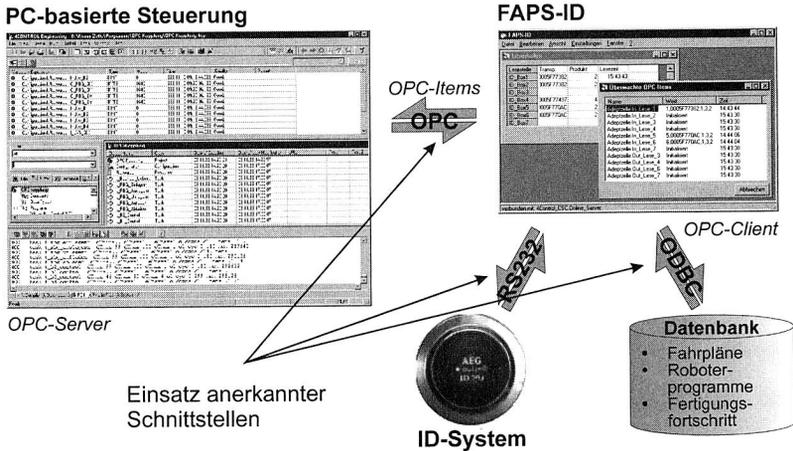


Bild 55: Einsatz von FAPS-ID als herstellerneutrale Middleware zwischen Ident-System, zentraler Datenbank und lokaler Materialflusssteuerung

Die eigens entwickelte Software FAPS-ID erleichtert diese Tätigkeit, indem sie dem Planer nicht die Identnummer, sondern die damit verknüpften Daten in einer einheitlichen, parametrierbaren Weise anbietet. Bild 55 gibt einen Überblick über die Einbindung von FAPS-ID in die Kommunikationsstruktur. Sie dient quasi als Middleware zwischen Empfangseinheit, der zentralen Datenbank und der Materialflusssteuerung. Dies alles geschieht unter Nutzung anerkannter Schnittstellen.

Die Kommunikation läuft entsprechend des in Bild 56 dargestellten Schemas ab. Zunächst wird die gelesene Identnummer des WT's über die serielle Schnittstelle des Zellenrechners von FAPS-ID empfangen. Dabei ist jeder Lesestelle genau eine Schnittstelle zugeordnet. Zusammen mit deren Nummer (z.B. Com1) werden diese Daten an die angeschlossene Datenbank übertragen. Durch Nutzung der ODBC-Schnittstelle ist es möglich, nahezu jede beliebige Datenbank, die sich auch verteilt im Unternehmensnetzwerk befinden kann, abzufragen. In Abhängigkeit vom Datenvolumen und der Transaktionshäufigkeit kann dies z.B. eine Access-Datenbank für kleinere Datenmengen oder auch eine ORACLE-Datenbank für große Datenmengen sein. Darüber hinaus ist auch die Anbindung von Systemen wie SAP/R3 denkbar. Die gesamte Kommunikation findet gekapselt und somit verborgen vom Anwender durch ODBC statt. Das Abfrageergebnis der Datenbank enthält die nächste anzufahrende Montagestation. Diese Information wird von FAPS-ID passend codiert und via

OPC in eine vorher festgelegte Variable der Materialflusssteuerung geschrieben. Nach Beendigung des Montageschrittes erfolgt auf dem umgekehrten Weg eine entsprechende Aktualisierung der Datenbank.

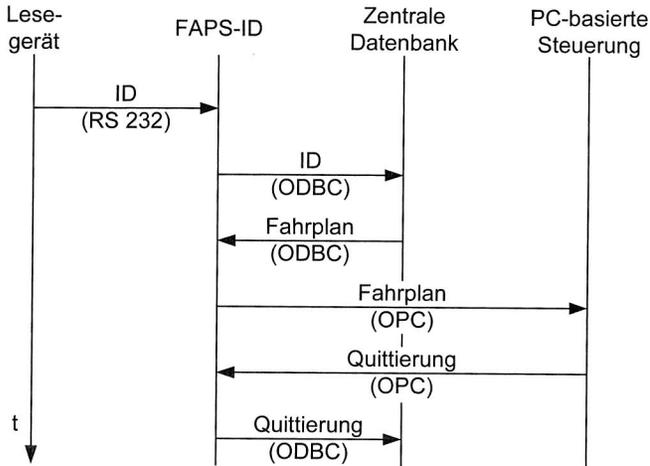


Bild 56: Kommunikation zwischen Lesegerät und PC-basierter Steuerung unter Nutzung von FAPS-ID

Der große Vorteil von FAPS-ID ist, dass die gesamte Kommunikation unter Verwendung offener Schnittstellen erfolgt. Beim Einsatz einer anderen Steuerung oder eines anderen Identensystems reicht es aus, die herstellereigenen Daten in Konfigurationsdialogen einzutragen. Es sind keinerlei Anpassungen am Code notwendig [115]. Derzeit befinden sich sowohl in der Kommissionierzelle, als auch in der KM-Zelle jeweils zwei Lesestationen. Die Fahr- und Stückpläne der verschiedenen Varianten sind in einer Microsoft Access Datenbank auf einem zentralen Rechner hinterlegt. Der in Bild 57 abgebildete Screenshot zeigt die entwickelte Anwendung im Einsatz in einer anderen Montagezelle mit sieben Lesestellen.

Wie bereits in Kapitel 5.1 dargestellt, erfolgt die Bauteilbereitstellung auf vorkommissionierten Werkstückträgern. Es ist deshalb nicht sinnvoll, die einzelnen Bauteile zu identifizieren, sondern den WT der sie transportiert. Der Vorteil der zentralen Datenerhaltung zeigt sich bei eventuellen Erweiterungen. So ist es beispielsweise möglich alle relevanten Informationen zu der relativen Lage der Komponenten auf einzelnen WTs in der Datenbank abzubilden.

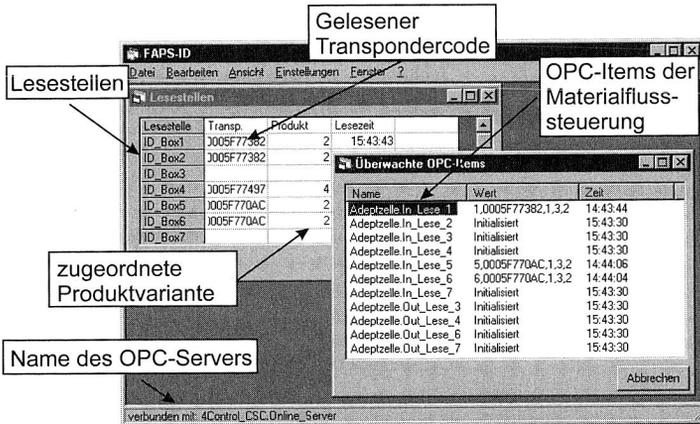


Bild 57: Hauptfenster von FAPS-ID mit den überwachten Lesestellen beim Einsatz in einer flexiblen Montagezelle

5.4 Zusammenfassung

Mit dem in diesem Kapitel vorgestellten Hardwareaufbau ist die Grundlage für eine flexible Montage flächiger Bauteile geschaffen. Die Kombination aus den beiden Linearrobotern und dem Hexapoden erlaubt die vollständige Nutzung des kubischen Arbeitsraumes, der sich in idealer Weise für die Montage dieser Produktstrukturen eignet.

Da bei einer Marktrecherche kein geeigneter Hexapod gefunden wurde, wurde das vorgestellte Modell speziell auf die Anforderungen der Komplettmontagezelle hin entwickelt. Neben dem innovativen Kinematikkonzept stellt insbesondere die steuerungstechnische Integration über OPC eine kostengünstige, universelle und zuverlässige Lösung dar.

Darüber hinaus wurde ein flexibler Flächengreifer entwickelt, der durch seine innovative Kinematik die Möglichkeit bietet, verschiedenste flächige Produkte sicher zu handhaben. Zur Darstellung des Logistikkonzeptes wurde eine prototypische Kommissionierzelle aufgebaut, die sich durch ein herstellerunabhängiges Lagerverwaltungssystem auszeichnet, das auf einer Java/Corba-basierte Infrastruktur aufbaut. Eine weitere Software-Komponente stellt eine implementierte Middleware dar, die eine herstellernerneutrale Anbindung beliebiger Identsysteme an Materialflusssystemen ermöglicht.

6 Entwurf und Realisierung eines durchgängigen Steuerungskonzepts für die Komplettmontagezelle

Wie in Kapitel 3 gezeigt werden konnte, erfordert das Konzept der Komplettmontage für die Realisierung möglichst geringer Taktzeiten den Einsatz kooperierender Robotersysteme. Eine wichtige Aufgabe im Rahmen dieser Arbeit war deshalb die Untersuchung, welche Möglichkeiten es für die Erstellung der für die Montage notwendigen Roboterprogramme gibt und in welcher Art und Weise diese Methoden zu einem *integrierten Konzept* zusammengefasst werden können. Im Gegensatz zu einer klassischen Roboterzelle, bei der lediglich ein Roboter mit der Peripherie interagieren muss, sind in der Komplettmontagezelle neben den beiden Flächenauslegern der Hexapod und der Materialfluss zeitlich und räumlich zu koordinieren.

Die Akzeptanz des Anlagenkonzepts ist nur dann gewährleistet, wenn es gelingt, die komplizierte Bewegungsplanung der kooperierenden Roboter vor dem Planer zu verbergen und darüber hinaus eine größtmögliche Herstellerunabhängigkeit zu bewahren.

6.1 Einsatzgebiete kooperierender (Industrie-) Roboter

In der industriellen Landschaft ist der Einsatz kooperierender Roboter aus mehreren Gründen beschränkt. Der wohl wichtigste ist in der geringen Unterstützung bei der Entwicklung der notwendigen Roboterprogramme seitens der Steuerungen und das damit verbundene hohe Gefahrenpotential zu sehen. Bislang bieten nur wenige Hersteller (z.B. Fanuc Ltd. und Motoman [116]) die Möglichkeit, mehrere Roboter zu koordinieren. Alle anderen Anbieter beschränken sich auf die Ansteuerung zusätzlicher Achsen. Bei dieser Methode ist jedoch keine Erweiterung des kinematischen Modells der Steuerung möglich um die zweite Kinematik mit abzubilden. Weitere Gründe liegen in der bislang nicht vorhandenen Softwareunterstützung bei der Planung und Abtaktung der Montagesequenzen.

Die geringe Unterstützung seitens der Steuerungshersteller ist umso verwunderlicher, als deren Einsatz in einer Vielzahl von Applikationen wie den Schweißstrassen der Automobilhersteller ein hohes Ratiopotential freisetzen würde. Aber auch in der Montage besteht Bedarf nach kooperierenden Robotern im Sinne der Definition 4 [117]. Bei den aktuell realisierten Lösungen in diesem Bereich handelt es sich nicht um kooperierende Roboter, sondern lediglich um Multiroboter-Lösungen, da sie entgegen der Definition *keine* aufeinander abgestimmten Bewegungen durchführen. Jeder Roboter ist singulär programmiert und über Software-Endschalter so abgesichert, dass es zu keinen Kollisionen aufgrund der überlappenden Arbeitsräume kommen kann.

Die Herausforderungen aber auch die Potentiale kooperierender Roboter sind Inhalt einer Vielzahl nationaler und internationaler Forschungsprojekte, deren komplette Beschreibung den Umfang der Arbeit sprengen würde. Aus diesem Grund werden nach-

folgend an zwei typischen Beiträgen die bestehenden Schwachstellen aktueller Ansätze dargestellt.

[70] beschreibt die kooperierende Montage eines aus Stangen und Verbindungselementen bestehenden Würfels. Je nach Montagesituation können die beiden Roboter an unabhängigen Teilaufgaben arbeiten, oder auch zusammen an einer. So werden beispielsweise die Verbindungselemente von einem Roboter auf die Stange aufgeschoben, während diese vom anderen Roboter gehalten wird. Hierfür wurde eigens eine neue Lageregelung für die Roboter entwickelt. Während der unabhängigen Arbeitsschritte ist der gemeinsame Arbeitsraum immer exklusiv für einen Roboter reserviert. Da in dem Beitrag keine Strategien zur Bahnplanung beschrieben sind, ist davon auszugehen, dass alle Bewegungen starr programmiert und somit die Vorteile kooperierender Roboter nicht vollständig nutzbar sind.

Ebenfalls mit der Kooperation von zwei 6-Achs-Robotern beschäftigt sich [118]. Die beiden Geräte kommunizieren mit einem übergeordneten Leitreechner in Zeitscheiben konstanter Länge. Jeder Roboter darf in einem Zeitfenster von 1ms genau 0,7ms mit dem Leitreechner kommunizieren. Die restliche Zeit ist für interne Vorgänge reserviert. Um dies zu realisieren, musste die vorhandene Steuerung komplett umgerüstet und -programmiert werden, was die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Steuerungen drastisch reduziert.

Mobile Roboter und alternative Einsatzbereiche

Neben den schon angesprochenen Einsatzbereichen in der Schweiß- und Montagetechnik, eröffnen kooperierende Roboter auch völlig neue Anwendungsgebiete. So ist deren Einsatz für Arbeiten im Weltraum und der Erkundung von Planeten geplant, da aufgrund der Signallaufzeiten eine Steuerung von der Erde nicht mehr möglich ist. Mehrere Forschungsvorhaben beschäftigen sich aus diesem Grund mit dem Einsatz autonomer Roboter und den damit verbundenen Fragestellungen zu Bahnplanung und Kommunikation mehrerer Geräte untereinander (z.B. [73]). Aber auch auf der Erde gibt es Arbeitsräume, die für Menschen nur sehr schwer erreichbar sind. Hierzu gehören beispielsweise am Meeresgrund verlegte Pipelines und Kommunikationskabel. Neben der Errichtung ist insbesondere die Wartung und Reparatur der für die Informationsgesellschaft schon fast lebenswichtigen Daten- und Telefonleitungen eine sehr anspruchsvolle Aufgabe, für die kooperierende Roboter eingesetzt werden sollen (z.B. [119, 120]).

Die wohl populärste Forschungsrichtung im genannten Themenfeld stellen die Arbeiten auf dem Gebiet der mobilen Roboter dar. Hierbei handelt es sich um Spezialanfertigungen, die insbesondere im Vergleich zu konventionellen Industrierobotern mit eigens entwickelten Steuerungs- und Kommunikationsmechanismen ausgerüstet sind [121]. Für diese Geräte wurden leistungsfähige Bahnplanungsalgorithmen implementiert, die teilweise in Echtzeit die optimale Bewegungsbahn nicht nur für das einzelne Gerät als Individuum, sondern für einen Zusammenschluss mehrerer Geräte planen. Die Entwickler

dieser mobilen Roboter veranstalten regelmäßig Wettkämpfe, um die Leistungsfähigkeit der Algorithmen zu testen.

Mobile Roboter unterscheiden sich in mehreren Punkten erheblich von Industrierobotern. So können diese nicht nur mit ihrem TCP Kollisionen verursachen, sondern die gesamte kinematische Kette, bestehend aus den Roboterarmen und -gelenken muss bei jeder Bewegung auf eine mögliche Kollisionsgefahr hin überprüft werden. Mobile Roboter hingegen lassen sich als singulärer Punkt oder zumindest als starrer Körper modellieren, besitzen also in ihrer geometrischen Gestalt keine Zeitvarianz. Wie später noch gezeigt wird, vereinfacht diese Eigenschaft die Bahnplanung erheblich.

Ein weiterer, bereits angesprochener Unterschied liegt in der Steuerung der Industrieroboter. Bis auf die schon angesprochenen Ausnahmen (bspw. [116]) sind diese nicht für die Koordination mehrerer Geräte entwickelt worden. Ihre Aufgabe beschränkt sich lediglich auf die möglichst optimale Ansteuerung der Roboterachsen, nicht aber auf eine übergeordnete High-Level-Kommunikation mit anderen Robotern inklusive einer Kollisionsüberwachung. Die Steuerungen mobiler Roboter sind hingegen für diese Aufgabe entwickelt worden. Die eingesetzten Mikrocontroller und die sie umgebende Sensorik und Aktorik sind speziell auf die Aufgabe der Bahnplanung ausgesucht und optimiert. Liegt der Schwerpunkt bei Industrierobotern in der exakten Bahnführung und hohen Positioniergenauigkeit, liegen die Prioritäten bei mobilen Robotersystemen mehr auf einem „Proof of Concept“.

Es ist daher festzustellen, dass die vorliegenden Ergebnisse auf dem Gebiet mobiler Roboter aufgrund deren einfacher Kinematik und speziell angepasster Steuerung keine Übertragung auf den hier betrachteten Anwendungsfall erlauben. Bei den bekannten Projekten zu kooperierenden Industrierobotern ist ebenfalls die Tendenz hin zu proprietären Sonderlösungen im Bereich der Robotersteuerungen, sowie zu singulären Lösungen, die nur Teilaspekte wie die Bahnplanung betrachten, erkennbar.

6.2 Anforderungsanalyse für ein integriertes Steuerungskonzept

Die Aufgaben, die das Steuerungskonzept der Komplettmontage lösen muss, sind wesentlich umfangreicher und komplexer. Betrachtet man den klassischen Weg der Konstruktionssystematik, so ergibt sich ein vierstufiger Prozess, der iterativ zu durchlaufen ist. Nach der Planung der Montageaufgabe geht es über die Programmerstellung zum Test und einer eventuellen Optimierungsschleife schließlich zur eigentlichen Bahnplanung und -überwachung während der Montage.

Montageablaufplanung

Das zur Leistungsmessung von Montageanlagen am häufigsten verwendete Kriterium ist die Taktzeit. In einer konventionellen, automatisierten Montagestation ist diese vereinfacht gegeben durch die Summe aus der Wechselzeit des Werkstückträgers, der

Bewegungszeit des Handhabungsgerätes und der eigentlichen Prozesszeit. Die Wechselzeit sowie die Prozesszeit sind als fixe Größen anzunehmen, da sie nicht direkt beeinflussbar sind. Ziel bei der Programmierung des Industrieroboters muss also die Bestimmung der optimalen, also zeitminimalen Bewegungsbahn sein. Je nach Erfahrung des Anwenders ist dies eine mehr oder weniger optimale Bewegungssequenz [122].

Bei der Komplettmontage liegt jedoch ein weit größeres Potential zur Taktzeitminimierung in der optimalen Aufteilung der Montageschritte. Im Gegensatz zu einer Linienfertigung, bei der die Montageschritte streng sequentiell aufeinander folgen und die Kunst in der möglichst exakten Abtaktung der gesamten Anlage liegt, sind in der Komplettmontage n Arbeitsschritte teilweise in fester, teilweise in beliebiger Reihenfolge durchzuführen. Selbst bei einer bereits vorgegebenen Abfolge existieren 2^n verschiedene Möglichkeiten, diese auf die beiden Handhabungsgeräte zu verteilen. Bei nur zehn Montageschritten ergibt sich somit für den Planer die Aufgabe, aus $2^{10} = 1024$ Möglichkeiten die Beste auszuwählen.

In der Realität ist es jedoch häufig so, dass Montageschritte nur von bestimmten anderen Schritten abhängig sind, jedoch parallel zu anderen durchgeführt werden können. Um den Planer zu entlasten und eine taktzeitminimale Bearbeitung sicherzustellen, muss das Steuerungskonzept zunächst eine einfache und effiziente Planung ermöglichen. Daraus kann die erste Forderung an das zu erstellende Steuerungskonzept abgeleitet werden:

Forderung S1: Einfache, effiziente Planung der Montageaufgabe

Ein mittlerweile sehr wichtiger Aspekt ist die Planungsabsicherung mittels einer Simulation der geplanten Montagesequenzen. Nur so kann bereits vor der eigentlichen Ausführung eine Aussage zu der zu erwartenden Taktzeit und eventuellen Kollisionsgefahren getroffen werden. Zur Vermeidung redundanter Dateneingaben muss das Steuerungskonzept eine direkte Koppelung zu kommerziellen Kinematiksimulationen erlauben:

Forderung S2: Verifikation der Planungsergebnisse durch Simulation

Weitere Forderungen an das Steuerungskonzept betreffen die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Kinematiken oder auf Steuerungen anderer Hersteller. Das zu entwickelnde Konzept darf keine Eingriffe in die Steuerungshardware der beteiligten Handhabungsgeräte erfordern, da hierdurch die industrielle Umsetzbarkeit erheblich reduziert wird. Aufgrund der hohen arbeitsschutzrechtlichen Anforderungen an die Betriebssicherheit automatisierter Systeme und Anlagen ist die Erweiterung oder der Neuentwurf einer Robotersteuerung schwer wirtschaftlich realisierbar. Darüber hinaus ist eine Auslegung der Antriebsregelung eines Roboters nur mit den jahrelangen Erfahrun-

gen des Herstellers optimal zu erreichen. Das zu entwickelnde Konzept darf deshalb keine proprietäre, nur auf einer einzigen Steuerungsgeneration eines bestimmten Roboters lauffähige Lösung sein, sondern muss mit geringen Anpassungen auf andere Kinematiken und Hardwareplattformen portierbar sein:

Forderung S3: Keine Eingriffe in die Steuerungshardware

Die zum Aufbau der in Kapitel 5 beschriebenen Komplettmontagezelle beispielhaft verwendeten Industrieroboter und Feldbussysteme stellen nur eine mögliche Lösung dar, so dass eine Fixierung auf diese Konfiguration und diese Hersteller eine unnötige Beschränkung in der Systemflexibilität darstellen würde:

Forderung S4: Möglichst große Herstellerunabhängigkeit der Systemlösung

Entsprechend der Definition von kooperierenden Industrierobotern (Definition 4, S. 30) müssen diese in der Lage sein, ihre Bewegungsbahnen den aktuellen Zuständen in der Zelle dynamisch anzupassen. In ihrem Ablauf starre Programme, so wie sie von konventionellen Offline-Programmierverfahren generiert werden, erlauben zur Laufzeit keine Modifikationen. Für eine wahre Kooperation muss das Konzept jedoch in der Lage sein, eine dynamische Bahnplanung bzw. -korrektur zur Bewegungszeit durchzuführen.

Ein mögliches Szenario stellt eine Störung in einem automatischen Schraubprozess dar. Meist sind diese Fehler nicht so gravierend, dass die gesamte Anlage auf Störung gehen muß. In der Regel reicht ein Entschrauben, verbunden mit einem erneuten Verschrauben aus, um die Störung zu beheben. Die Fehlererkennung und die damit einhergehende Fehlerreaktionsstrategie ist in kommerziellen Schraubsteuerungen enthalten. Starre Roboterprogramme warten solange, bis die Schraubersteuerung ein i.O. meldet. In der Komplettmontagezelle mit starren Programmen würde dies aber auch für den zweiten Roboter eine Zwangspause bedeuten. Besser wäre es, wenn dieser dynamisch auf die Störung reagieren und die geplante Montagesequenz so modifizieren würde, dass die resultierenden Taktzeitverluste so gering wie möglich sind. Das zu entwickelnde Konzept muss deshalb eine weitere Forderung erfüllen:

Forderung S5: Problem- bzw. fehlertolerantes Verhalten

Für die Erfüllung dieser Forderung ist eine geeignete Steuerungsstruktur verbunden mit einem effektiven, echtzeitfähigen Bahnplanungsalgorithmus in das System zu integrieren.

6.3 Stand der Technik

Entsprechend des oben angegebenen vierstufigen Ablaufes erfolgt nachfolgend eine Betrachtung der aktuellen Entwicklungen auf den verschiedenen Teilgebieten.

6.3.1 Planung von Montageabläufen

Zur automatischen Ableitung der Bewegungsbahnen der Roboter muss neben der Beschreibung der durchzuführenden Montageaufgaben insbesondere deren zeitliche Aufeinanderfolge definiert sein. Diese so genannte Montageablaufstruktur ist nach [123] der wichtigste Teil der Montageablaufplanung. Da die gesamte Bewegungsplanung der Handhabungsgeräte automatisiert erfolgen soll, bietet es sich an, die Daten gleich in einem maschinenlesbaren Format abzulegen. Die derzeit bekannten Ansätze lassen sich in drei Kategorien unterteilen [124]:

- Formalsprachliche Ansätze,
- Datenstrukturmodelle und
- Graphenbasierte Ansätze.

Durch die gute Anschaulichkeit gelten die graphenbasierten Ansätze als geeignetste Darstellungsform. In den vergangenen Jahren wurde eine Vielzahl von unterschiedlichen Darstellungsformen entwickelt:

- Gerichteter Graph,
- AND/OR-Graph,
- Verbindungsgraph,
- Petri-Netze,
- Hierarchische Halbordnungsgraphen,
- Verbindungsdiagramme,
- Vorranggraphen,
- Montagerandbedingungsgraph,
- Interferenzgraph.

Eine gute Übersicht über die verschiedenen Ansätze findet sich in [123] und [125], so dass aus Platzgründen auf eine Ausarbeitung der Unterschiede verzichtet werden soll.

Aus der Auswahl der graphenbasierten Ansätze findet insbesondere der (Montage-) Vorranggraph immer wieder Verwendung, um die Montagereihenfolge zu planen, darzustellen oder aber auch daraus automatisiert Roboterprogramme zu generieren (z.B. [34, 125, 126, 127]). In einem Montagevorranggraph (MVG) sind die verschiedenen Prozess- und Montageschritte als Knoten dargestellt. Gerichtete Kanten verbinden diese so, dass zeitlich abhängige Schritte (Vorgänger-Nachfolger) nacheinander, zeitlich unabhängige Schritte parallel dargestellt sind. Ein Schritt kann nur dann beginnen, wenn alle Vorgänger abgeschlossen sind. Als zusätzliche Informationen sind die benötigten Betriebsmittel wie Maschinen, Vorrichtungen oder Greifern sowie die eigentlichen Greif-

und Montagekoordinaten in dem MVG enthalten. Mit diesen Daten sind ausreichend Informationen für eine automatische Bahnplanung vorhanden.

Cuiper [126] erweitert den klassischen MVG um die in der DIN 2860 definierten Symbole für Handhabungs- und Orientierungsprozesse. Daraus leitet er die Art und die Anordnung der für die konkrete Montageaufgabe benötigten Betriebsmittel ab. Über die Koppelung mit einer 3D-Simulation ist er in der Lage, den Montageablauf vor der eigentlichen Durchführung zu testen. Nach dieser Verifikation wird das Programm mittels eines Postprozessors in die entsprechende Roboterprogrammiersprache übersetzt und auf der realen Montagezelle ausgeführt. Neben Robotersteuerungen unterstützt das Konzept auch den Einsatz speicherprogrammierbarer Steuerungen, wie am Beispiel einer Siemens S7-SPS dargestellt ist. Der eigentliche Montageschritt wird in fünf Teilschritte unterteilt. So unterscheidet er beispielsweise zwischen der „Be- und Entladung der Teilebereitstellung“ und der „elementaren Montagebewegung“, die startet, „sobald eine Durchdringung der Hüllgeometrien der beteiligten Produktkomponenten einsetzt“ [126]. Unklar ist der Unterschied zwischen einer Beladung der Bereitstellung und einem beliebigen Montage- oder Fügeprozess. Aus Sicht des Industrieroboters sind die Vorgänge identisch. Leider bleibt der Autor eine Erklärung für den Grund dieser Aufteilung schuldig. Darüber hinaus ist keine Angabe zu der Integration und Ansteuerung von Prozessen wie Schrauben, Kleben etc. in die Planungsumgebung gegeben, so dass davon ausgegangen werden muss, dass diese nur indirekt über den Einsatz der SPS realisierbar ist.

In ähnlicher Weise ist die Ablaufplanung in [128] realisiert. Basierend auf der Symbolik für Ablaufpläne (DIN 66001 und 66262) erfolgt auch hier eine genau Festlegung der Bewegungssequenzen. Im Unterschied zu der klassischen, textuellen Programmierung verwenden beide Autoren eine graphische Metasprache, um eine Unabhängigkeit von der konkreten Maschinensprache zu erreichen.

Es darf bei dieser Betrachtung nicht vergessen werden, dass der Montagevorranggraph lediglich eine graphische Repräsentation der Abläufe darstellt. Die primäre Frage, nämlich die Ermittlung der optimalen Reihenfolge, in der die Schritte zu durchlaufen sind, ist damit noch unbeantwortet. Eine Vielzahl von Arbeiten widmen sich dieser Themenstellung, die der des „Travelling Salesman“ entspricht. Bislang erarbeitete Lösungsansätze reichen von rein numerischen Brute-Force-Berechnungen über neuronale Netze und Petri-Netze bis hin zu genetischen Algorithmen [129].

Ein weiteres Hindernis beim Einsatz graphischer Planungsmethoden ist darüber hinaus die Programmierung der eigentlichen Montagebewegungen. In der Regel erfolgt diese auf einer sehr niedrigen logischen Ebene, nämlich funktionsorientiert oder explizit [128]. Der Planer muss die geschlossene Bewegungssequenz (bspw. das Bewegen eines Bauteils von A nach B) in bis zu 10 Elementarbewegungen aufteilen (Bild 58, rechts).

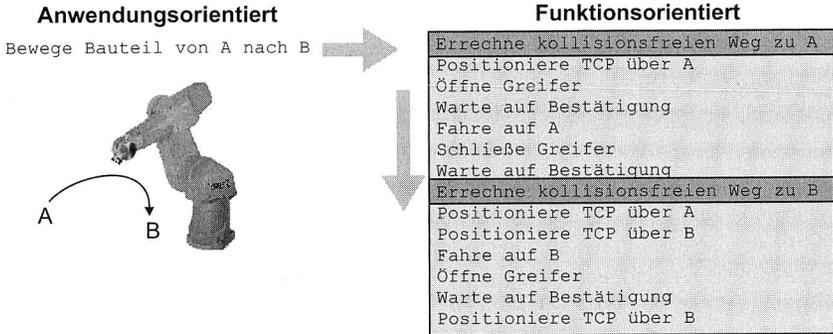


Bild 58: Vereinfachte Gegenüberstellung von funktions- und anwendungsorientierter Programmierung von Robotern in hypothetischer Metasprache

Demgegenüber steht die anwendungsorientierte oder *implizite* Programmierung [130], die von manchen Autoren auch als aufgabenorientierte Programmierung (z.B. [34, 122, 125, 131]) bezeichnet wird. Bei dieser wird dem Programmiersystem nur noch die eigentliche Aufgabe, also das *WAS* (hier das Bewegen eines Bauteils von A nach B), nicht aber *WIE* diese Aufgabe zu erledigen ist, in einer speziellen Metasprache mitgeteilt [125]. Sie findet auf einer wesentlich höheren Abstraktionsebene als die funktionsorientierte Programmierung statt, da die zugehörige Umsetzung eine Vielzahl von Bewegungen und Anweisungen beinhaltet. Der Einsatz der impliziten Programmierung bietet sich bei einfachen Roboterarbeiten, wie reinen Pick&Place-Bewegungen an, die sich durch ein festes Bewegungsschema

(Greifer holen) - Greifer öffnen - Über Bauteil positionieren - Absenken - Greifer schließen - Anheben - Über Zielcoordinate positionieren - Absenken - Greifer öffnen - Anheben

auszeichnen. Über eine entsprechende Unterfunktion, die als Parameter lediglich die Koordinaten der Abhol- und Montageposition benötigt, kann der komplette Bewegungsablauf in die in Bild 58 rechts dargestellte Form gebracht werden. Durch eine geeignete Erweiterung können aber auch die Montage- und Fügevorgänge in der Komplettmontagezelle anwendungsorientiert entworfen werden [130]. Eine Darstellung weiterer Systeme für die implizite Programmierung findet sich ebenfalls in [130].

Die Implementierung kommerzieller Systeme könnte allerdings durch das US-Patent 4,835,730 der Firma Adept Technology, das 1987 eingereicht und 1989 erteilt wurde, erschwert werden [132]. In diesem ist ein datenbankgestütztes Verfahren zur automatischen Ableitung der Bewegungsbahnen eines Industrieroboters geschützt.

Neben einer signifikanten Reduzierung des Zeitbedarfs zur Erstellung der Roboterprogramme ist insbesondere die Vereinheitlichung der Programmierung unterschiedlicher Systeme als ein Vorteil dieser Methode zu sehen. Bereits in den 70er Jahren, also in der Frühzeit der Roboterentwicklung, waren den Anwendern und Forschern die Nach-

teile der expliziten, textuellen Programmierung bekannt und erste Entwicklungen impliziter, bedingt durch die geringe Rechenleistung, noch textbasierter Verfahren wurden auf dem Markt eingeführt [133]. In den darauf folgenden Jahren wurden vielfältige Systeme entwickelt, die jedoch keine Marktakzeptanz gefunden haben [130]. Insbesondere die eigentliche *Bahnplanung* (in Bild 58 dunkelgrau hinterlegt) ist eine sehr komplexe Thematik, auf die im folgenden Kapitel ausführlich eingegangen wird.

Die Kombination aus Montagevorranggraphen und impliziter Programmierung, also aus WAS und WANN führt zur größtmöglichen Anwenderunterstützung. Trotz der Vielzahl an Forschungsarbeiten ist zum jetzigen Zeitpunkt aber kein Vorhaben bekannt, bei der die Planung und Durchführung der kooperierenden Montage lediglich auf Grundlage eines Montagevorranggraphens erfolgt.

6.3.2 Methoden zur Bahnplanung

Nachdem der Montageablauf mittels des Vorranggraphen dargestellt wurde, ist es notwendig, automatisiert eine kollisionsfreie Bahn vom aktuellen Startpunkt des Handhabungsgerätes zu den jeweiligen Greifpunkten zu berechnen. Bei der Planung dieser so genannten Trajektorien sind drei unterschiedliche Ausgangssituationen zu unterscheiden, auf die mit unterschiedlichen Algorithmen reagiert werden muss (Bild 59).

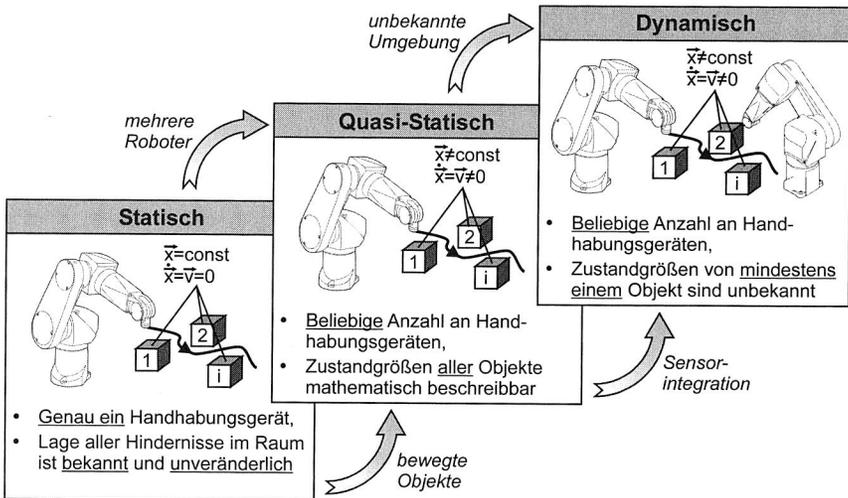


Bild 59: Klassifizierung der Bahnplanungsmethoden in Abhängigkeit der bekannten Systemzustände

Bahnplanung in statischer Umgebung

Im einfachsten Fall handelt es sich bei der Systemlandschaft um eine statische Umgebung. Per Definition befinden sich im Arbeitsraum von genau einem frei-steuerbaren Handhabungsgerät eine beliebige Anzahl statischer Objekte, deren Gestalt und Position sich zur Ausführungszeit der Bewegung nicht verändern. Für eine sichere, kollisionsfreie Bahnplanung ist somit die Erfassung der Ausgangssituation hinreichend. Es werden zur Bewegungsüberwachung keine zusätzlichen Sensoren benötigt, da alle benötigten Informationen bereits vorliegen und darüber hinaus auch ihre Gültigkeit behalten. Eine typische Aufgabenstellung in dieser Kategorie ist der Kleb-/Dichtstoffauftrag auf einfachen Geometrien oder das Laserstrahlschneiden. Durch die gestiegene Leistungsfähigkeit der PC-Architektur sind mittlerweile verschiedene Kinematiksimulationen auf dem Markt erhältlich, die, basierend auf dem CAD-Modell des Roboters und der Peripherie in der Lage sind, einen kollisionsfreien Weg zu berechnen [125]. Da zur Ausführungszeit keine zusätzlichen Sensoren die Sicherstellung der Kollisionsfreiheit gewährleisten müssen und somit auch keine zusätzliche Rechenleistung benötigen, kann jeder beliebige Roboter diese Aufgabe erfüllen. Ein einmal erzeugtes Programm wird ohne Veränderung zur Laufzeit abgespielt.

Bahnplanung in quasi-statischer Umgebung

Die Einführung von Freiheitsgraden der Hindernisse stellt eine Erweiterung der statischen Umgebung dar. Die Objekte können während der Bewegungsausführung ihre Gestalt, Position und/oder Orientierung ändern. Darüber hinaus ist das Hinzufügen oder Entfernen von Objekten in dem betrachteten Arbeitsraum möglich. Dies erlaubt die Modellierung von sich verändernden Umgebungen, die auch aus mehreren Handhabungsgeräten bestehen können, da diese nichts anderes als ein bewegliches Hindernis darstellen. Der quasi-statische Fall repräsentiert die klassische Montageumgebung, bei der Teile aus einer Aufnahme entnommen (Entfernen) und zu einer Baugruppe gefügt werden (Gestaltänderung).

Allerdings gibt es bislang noch keine einheitliche Begrifflichkeit. So bezeichnet beispielsweise Wörn solche Umgebungen bereits als dynamisch [134]. Dieser Ansatz ist jedoch nicht optimal, da bei *vorheriger* Kenntnis *aller* Zustandsgrößen wie Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung die Bewegungen der Objekte bereits zur Planungszeit Berücksichtigung finden können. Legt man deshalb fest, dass für jedes Objekt bereits zum Zeitpunkt t_0 alle Zustandsgrößen für beliebige Zeitpunkte $t > t_0$ bekannt sind, ist es möglich, diese „dynamische“ Umgebung auf eine diskrete (zeitpunktbehaftete) statische Umgebung zu reduzieren und in den jeweils statischen Zeiträumen mit den Algorithmen der statischen Umgebungen die Bahnen zu planen. Aus diesem Grund sollen solche Umgebungen mit dem Begriff *quasi-statisch* bezeichnet werden. Eine Bewegungsplanung in einer solchen Umgebung benötigt ebenfalls keine externen Sensoren, da alle relevanten Daten per Definition im Voraus berechenbar sind.

Bahnplanung in dynamischer Umgebung

Der Unterschied zwischen einer quasi-statischen und einer dynamischen Umgebung liegt in der fehlenden Kenntnis der Umgebung, beziehungsweise der Zustandsgrößen der Objekte. Die Planung einer kollisionsfreien Bahn kann deshalb nicht mehr offline erfolgen, sondern muss zur Ausführungszeit unter Nutzung zusätzlicher Sensorik bzw. Messwerte erfolgen. Befinden sich keine Hindernisse im eigentlichen Sinne im Raum, sondern nur ein oder mehrere Roboter, so ist es möglich, die für die Planung nötigen Sensorinformationen durch die aktuellen Achswerte der Roboter zu ersetzen.

Dynamische Umgebungen kommen im industriellen Umfeld häufiger vor, als es vielleicht auf den ersten Blick erscheint. Das klassische Beispiel ist das Greifen von Bauteilen mit Hilfe von Vision-Systemen. Beim Conveyor-Tracking erfasst eine Kamera (externer Sensor) die Zustandswerte Bandgeschwindigkeit sowie Position und Orientierung der Bauteile und übermittelt diese Daten an die übergeordnete Robotersteuerung, die online die entsprechende Bewegungsbahn berechnet, um das Bauteil vom laufenden Band zu greifen. Hier ist auch die große Schwierigkeit zu sehen. Die verwendete Robotersteuerung muss in der Lage sein, basierend auf Sensorinformationen zur Laufzeit Modifikationen an der berechneten Bahn zuzulassen. Da dies einen sehr tiefen Eingriff in die Steuerung darstellt, sind die Lösungen wie das Conveyor-Tracking zu meist proprietärer Natur.

Übertragung auf die Komplettmontage

Betrachtet man die Gegebenheiten der Komplettmontagezelle, so wäre es möglich, die eigentlich dynamische Umgebungen für diskrete Zeitbereiche auf eine statische Umgebung zu reduzieren. In diesem Fall dürfte sich nach einem zuvor festgelegten Muster immer nur genau ein Roboter bewegen, der andere Roboter müsste sich an einer definierten, zuvor festgelegten Position befinden. Dem Vorteil der vergleichsweise einfachen Realisierung der Steuerung steht ein unbefriedigendes Zeitverhalten der Zelle bei der Durchführung von Montagevorgängen gegenüber. Die Taktzeitvorteile, die die Einführung des zweiten Handhabungsgerätes versprochen hat, wären mit dieser Steuerungsstrategie nicht realisierbar.

Zur Erreichung minimaler Taktzeiten ist eine möglichst gleichzeitige Bewegung beider Handhabungsgeräte notwendig. Dies führt jedoch zwangsläufig zu einer dynamischen Umgebung und erfordert somit eine dynamische Bahnplanung. Nur so können die Roboter respektive deren Steuerungen kurzfristig auf Änderungen reagieren.

6.3.3 Methoden zur Bahnplanung in dynamischen Umgebungen

Üblicherweise wird der Raum, in dem sich der Roboter bewegen kann, mit dem Buchstaben C bezeichnet. Er entspricht dem in Bild 26 definierten Arbeitsraum. In diesem befinden sich beliebige Hindernisse H_i , die von keinem Bauteil des Roboters berührt werden dürfen. Da sowohl C als auch $H_i \subset \mathbb{R}^3$ bedeutet dies, dass die Bahn sowohl um

das Hindernis, als auch darüber oder darunter verlaufen kann. Der Freiraum C_{Frei} ist der Raum für den gilt:

$$C_{\text{Frei}} := \{x \mid x \in C \wedge x \notin H_i\}$$

Eine besondere Herausforderung stellt die Tatsache dar, dass allgemeine Roboter nicht nur aus dem punktuellen TCP bestehen, sondern zwangsläufig eine kinematische Kette mit mehreren Achsen und Gelenken bilden. Somit besteht die Bahnplanungsaufgabe nicht nur in der Bestimmung der (räumlich und insbesondere zeitlich) kürzesten, kollisionsfreien Bahn des TCP um das Hindernis, sondern in der Berücksichtigung eventueller Kollisionen des gesamten Roboters. Weiteres Optimierungskriterium ist die Reduzierung der Gelenkkkräfte und somit des Verschleißes. Handelt es sich bei dem betrachteten Objekt um einen mobilen Roboter, vereinfacht sich das Problem, da dieser im R^2 als Punkt darstellbar ist.

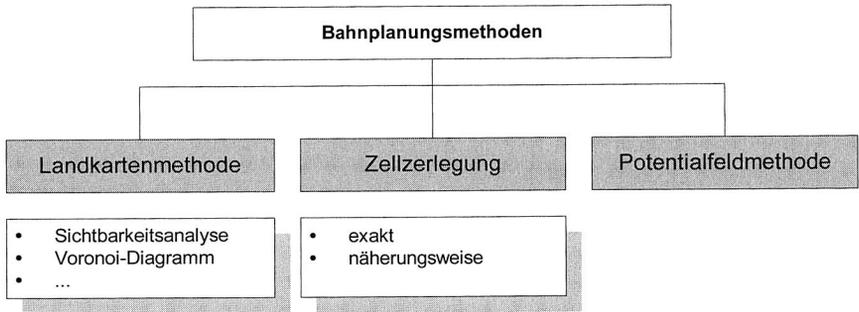


Bild 60: Übersicht über die wichtigsten Bahnplanungsmethoden

Innerhalb der letzten Jahre wurden insbesondere für mobile Roboter wie beispielsweise die so genannten Fußballroboter eine Vielzahl unterschiedlicher Algorithmen entwickelt. In der Regel basieren sie jedoch alle auf einer der in Bild 60 dargestellten drei Methoden: Landkartenmethode, Zellzerlegung oder Potentialfeldmethode [135].

Die Landkartenmethode

Unter dem Begriff Landkartenmethode sind alle Bahnplanungsverfahren zusammengefasst, die basierend auf einer „Karte“ des Raumes C eine Bahn generieren. Dabei ist die Art und Weise, wie diese Karte erstellt wird für die Durchführung des Verfahrens von untergeordneter Bedeutung. Im Falle einer statischen Umgebung genügt beispielsweise das CAD-Modell der Zellenperipherie. Im folgenden soll am Beispiel der Sichtbarkeitsanalyse und dem Voronoi-Diagramm die Vorgehensweise beim Einsatz der Landkartenmethode erläutert werden.

Sichtbarkeitsanalyse

Grundlage dieser Methode ist ein so genannter Sichtbarkeitsgraph G , der folgende Eigenschaften aufweist:

- Der Graph G ist ungerichtet,
- ein Knoten von G ist entweder Start- oder Zielpunkt, oder aber ein Eckpunkt eines Hindernisses H_i ,
- Zwei Knoten werden dann miteinander verbunden, wenn ihre Verbindungsgerade vollständig in C_{Frei} liegt.

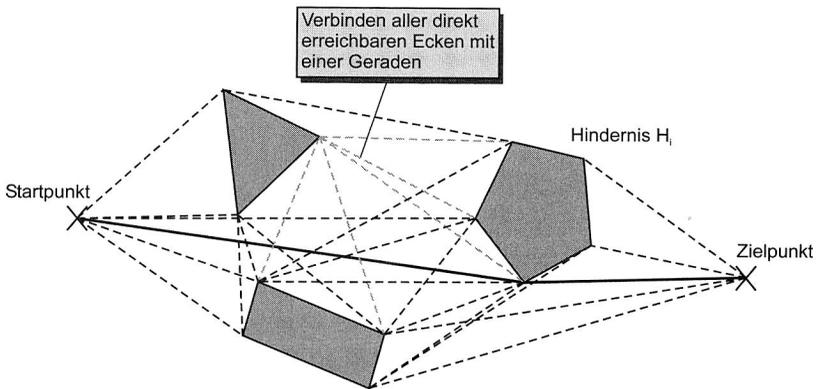


Bild 61: Darstellung eines Sichtbarkeitsgraphens mit möglichen Bahnen (gestrichelt Linien) und der kürzesten Verbindung (durchgezogene Linie)

Durch die Darstellung der möglichen Verbindungslinien als Baum ist die Anwendung verschiedener Algorithmen wie die Tiefen- und Breitensuche und der A^* -Algorithmus für die Bestimmung der kürzesten Verbindung möglich. Unabhängig vom verwendeten Suchverfahren ist festzustellen, dass eine Bahnplanung mittels der Sichtbarkeitsanalyse sehr viel Zeit erfordert und somit die Echtzeitanwendungen erschwert [135].

Voronoi-Diagramm

Im Gegensatz zu obigen Verfahren, bei der die Bahn immer an den Ecken eines Hindernisses, also sehr nah vorbeiführt, liegt sie bei einem Voronoi-Diagramm immer in einer maximalen Entfernung zwischen zwei Hindernissen. In einem ersten Schritt werden die Voronoi-Knoten erzeugt. Dies sind spezielle Punkte, die zu den gegebenen Hindernissen einen maximalen Abstand besitzen. Im Falle von drei berücksichtigten Hindernissen liegt der Voronoi-Knoten somit im Schwerpunkt des aufgespannten Dreiecks (Bild 62). Voronoi-Kanten wiederum verbinden zwei benachbarte Knoten. Dadurch ist gewährleistet, dass die so definierte Bahn in einem maximalen Abstand um die Hindernisse führt. Im Gegensatz zu der ursprünglichen Version, bei der ein Hindernis H_i zu ei-

nem einzelnen Punkt reduziert wird, existieren mittlerweile auch Modifikationen dieses Verfahrens, die unter Berücksichtigung flächiger Hindernisse eine entsprechende Bahn planen.

Konstruktion eines Voronoi-Knotens

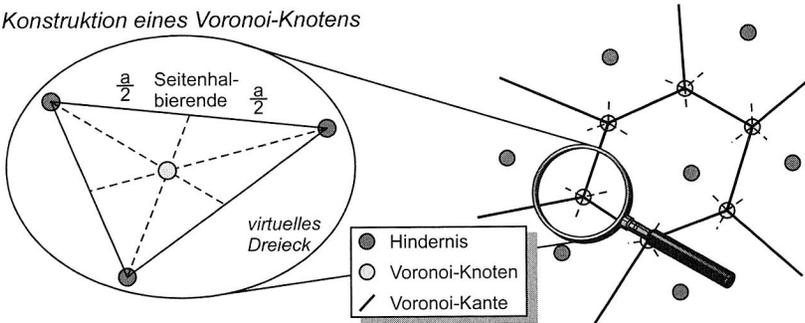


Bild 62: Konstruktion von Voronoi-Knoten und -Kanten

Auch diese Methode ist sehr rechenaufwendig und eignet sich somit nur eingeschränkt für die Realisierung von Echtzeitanwendungen.

6.3.4 Die Zellzerlegung

Die verschiedenen Methoden der Zellzerlegung bieten eine einfachere Lösung des Bahnplanungsproblems. Hierbei wird ein Raum C in kleine, zusammenhängende und überlappungsfrei Regionen unterteilt, die für die Anwendung des Algorithmus eindeutig zu kennzeichnen sind. Wichtig ist, dass diese Zellen eine einfache und möglichst elementare Geometrie haben, um den späteren Rechenaufwand zu reduzieren [135]. Im Rechner werden die geometrischen Zusammenhänge der Zellen durch den so genannten Verbindungsbaum dargestellt. Ausgehend von der Startzelle ist in einem ersten Iterationsschritt zunächst die optimale Kombination der Zellen bis zum Zielpunkt zu ermitteln. Daran schließt sich die exakte Bahnplanung innerhalb der Zellen an.

Bei der *exakten* Zellzerlegung erfolgt die Unterteilung von C in konvexe n -Ecke mit dem Ziel, den gesamten Raum inklusive der Hindernisse abzudecken. Jedes n -Eck besitzt somit entweder den Zustand frei oder belegt. Nachteilig an dieser Methode ist die Unregelmäßigkeit der verwendeten Polygone. Neben der logischen Information (frei/belegt) ist deren exakte Lage und Geometrie in der Berechnung des idealen Verbindungsweges zu berücksichtigen, was den Algorithmus sehr aufwendig werden lässt. In [136] ist aus diesem Grund die Verwendung einfacher geometrischer Körper wie Trapeze und Dreiecke vorgeschlagen (Bild 63, rechts).

Bei zeitkritischen Bahnplanungen bietet sich mit der *näherungsweise* Zellzerlegung eine weitere Vereinfachung an. Merkmal dieser Methode ist die Verwendung einheitlich großer, einfacher Geometrien wie Rechtecke in \mathbb{R}^2 bzw. Quader in \mathbb{R}^3 [137]. Aus ver-

ständlichen Gründen ist in der Regel keine exakte Einteilung in freie und belegte Elemente möglich, so dass teilweise belegten Zellen vorkommen. Diese liegen teilweise im Freiraum, teilweise schneiden sie ein Hindernis. Eine Verfeinerung der Abbildung ist durch die erneute Unterteilung einer Zelle in Sub-Elemente möglich (mesh refinement) [138].

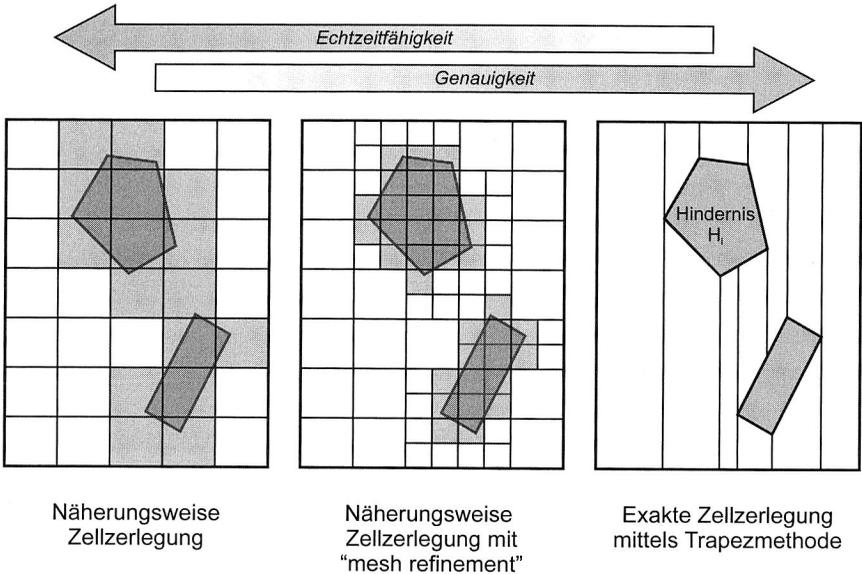


Bild 63: Gegenüberstellung der verschiedenen Methoden der Zellzerlegung hinsichtlich Echtzeitfähigkeit und Genauigkeit

Hauptschwierigkeit bei der Anwendung dieser Methode ist das Finden der optimalen Zellengröße. Je kleiner die Zellen, desto besser ist die Annäherung an die reale Umgebung. Im Gegenzug steigt jedoch auch der Rechenaufwand. Eine mögliche Lösung stellt der Verzicht in die Unterteilung teilweise belegt – ganz belegt dar. Mit der Randbedingungen, dass eine Zelle als belegt markiert ist, sobald ein Hindernis die Zelle schneidet und im Gegenzug einer reduzierten aber fixen Zellengröße, ist ein sehr einfaches mathematisches Modell darstellbar, das nur die logischen Zustände 0 und 1 berücksichtigen muss. Eine Codierung der Zellen, die eine spätere Zuordnung erlaubt ist aufgrund der schon vorher feststehenden Aufteilung nicht notwendig, da sie sich automatisch aufgrund der Speicherorganisation ergibt.

6.3.5 Die Potentialfeldmethode

Die Potentialfeldmethode ist eine Möglichkeit, kollisionsfreie Bewegungsbahnen mathematisch elegant zu berechnen. Ursprünglich für die Bahnplanung mobiler Roboter

konzipiert, um sich mittels Sensorunterstützung in einer unbekanntem Umgebung zu bewegen [139, 140], wird die Methode in den letzten Jahren auch vermehrt auf Industrieroboter angewendet. Wie auch bei den meisten der zuvor genannten Verfahren liegt der derzeitige Forschungsbedarf auf der Verbesserung der Echtzeitfähigkeit [135].

Grundidee der Potentialfeldmethode ist das aus der Elektrotechnik bekannte Phänomen der Elektrostatik: *Gleiche Ladungen stoßen sich ab, ungleiche Ladungen ziehen sich an*. In diesem Sinne wird der Arbeitsraum der betrachteten Systemumgebung modelliert. Der Ausgangspunkt und der Zielpunkt der Bewegung erhalten die „entgegengesetzte Ladung“, ziehen sich also an. Andere, im Arbeitsraum befindliche Objekte erhalten die gleiche „Polung“ wie der Ausgangspunkt. Für jeden Punkt $p \in C$ ($C \subset \mathbb{R}^n$) wird der Betrag und die Richtung des resultierenden „Kraftvektors“ berechnet und kann in einem Diagramm der Dimension $n+1$ dargestellt werden. Eine zweidimensionale Umgebung besitzt somit einen dreidimensionalen Repräsentanten.

Reduziert man den TCP des Roboters gedanklich auf eine Kugel, so ergibt sich ein anschaulicher Vergleich. Unter dem Einfluss der Schwerkraft rollt sie vom höchsten Punkt (dem Startpunkt) ohne weitere Beeinflussung zum Zielpunkt, der den tiefsten Punkt darstellt. Lokale Maxima (die Hindernisse H_i), werden dabei auf einer eleganten Bahn (also stetig und differenzierbar) umrundet. Das Beispiel kommt an seine Grenzen, wenn die Kugel in einem „mathematischen Loch“, also einem lokalen Minimum gefangen wird. Dieses Problem und die sich ergebenden Lösungsmöglichkeiten sind in [135] dargestellt.

Auf ein weiteres Problem wird in [34] aufmerksam gemacht. Demnach erfolgt üblicherweise eine geometrische Reduktion des Handhabungsgerätes auf einen Punkt in Verbindung mit einer virtuellen Expansion der Hindernisse um die ‚abgeschnittene‘ Geometrie. Im ungünstigsten Fall kann es dabei vorkommen, dass diese so genannten Konfigurationsräume sich überlappen, und eine real vorhandene Bahn blockieren.

Bewertung der Lösungsansätze

Die Potentialfeldmethode bietet eine elegante Methode automatisch eine Bahn zwischen zwei Punkten zu generieren. Durch die aufwendige Mathematik, die hierfür notwendig ist, ist ein Einsatz auf gängigen Robotersteuerungen nur schwer möglich, da diese nicht auf die Lösung der notwendigen Differentialgleichungen ausgelegt sind. Wie ursprünglich schon von Khatib vorgeschlagen, bietet sie sich eher für den Einsatz bei mobilen Robotern an, die als idealisierter Punkt darstellbar sind [139]. Des Weiteren kommen in diesen speziell entwickelte Steuerungen zum Einsatz, deren Fokus mehr auf der Bahnplanung als auf der Regelung und Interpolation der angeschlossenen Achsen liegt.

Das Problem des punktförmigen Roboters ist auch bei den Landkartenmethoden vorhanden. Auch hier wird lediglich die kollisionsfreie Bahn des Punktes betrachtet, aber nicht, wie der Kollisionsraum der angeschlossenen Achsen verläuft. Die hierfür entwickelte Silhouettenmethode bzw. oriented bounding boxes [141] stellt eine Lösungsalter-

native dar, ist aber sehr rechenaufwendig [135]. Wie der Name schon suggeriert, ist der Einsatz der Landkartenmethode trotz der Fortschritte in der Rechenleistung mehr bei mobilen Robotern zu sehen.

Für die vorliegende Problematik der Bahnplanung zweier Linearroboter bietet sich vielmehr die *näherungsweise Zellzerlegung* an. Zum einen liegt das an der Besonderheit der Kinematiken. Da die Achsen der Linearroboter kartesisch miteinander verbunden sind, ist die räumliche Kollisionsvermeidung auf ein zweidimensionales Problem reduzierbar (Bild 64). Ein Verfahren in z-Richtung, wie es für den eigentlichen Greif- und Fügeprozess notwendig ist, verändert den Kollisionsraum nicht. Darüber hinaus ist die Belegung der Zellen mit den Achsen des Roboters direkt, also ohne aufwendige Koordinatentransformationen, aus den Weltkoordinaten des TCP ablesbar.

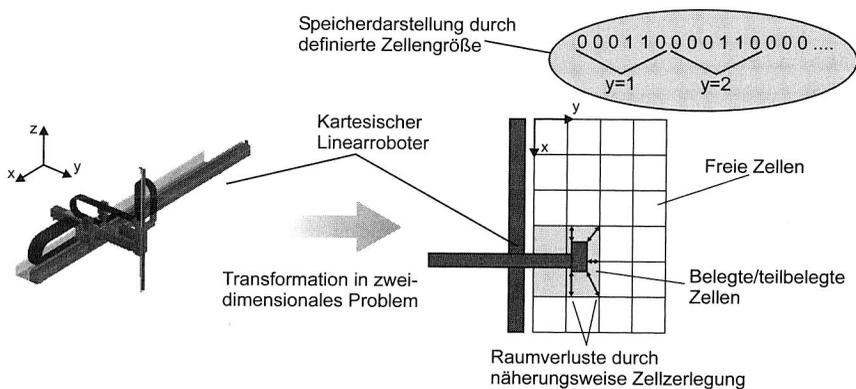


Bild 64: Dimensionsreduzierung bei der näherungsweise Zellzerlegung mit definierter Zellengröße

Bei der Verwendung einer statischen Zellengröße ergibt sich, wie schon gezeigt, der Vorteil, dass keinerlei Dimensionsinformationen bei der Bahnplanung berücksichtigt werden müssen. Wie Bild 64 zeigt, ist die Zuordnung der Zeilen und Spalten durch einen einfachen Offset jederzeit möglich. Diese hardwarenahe Darstellung unterstützt den Einsatz in Robotersteuerungen signifikant. Die Kollisionsprüfung erfordert lediglich eine elementare logische-UND-Verknüpfung der Feldbelegungen der betrachteten Roboter.

Somit ist festzustellen, dass die näherungsweise Zellzerlegung mit definierter Zellengröße durch ihre geringen mathematischen Anforderungen die optimale Bahnplannmethode für die Komplettmontage darstellt.

6.3.6 Steuerungsstrukturen für kooperierende Industrieroboter

Nachdem die optimale Bahnplanungsmethode ermittelt wurde, gilt es nun, die bestgeeignete Steuerungsstruktur zu Ausführung und Überwachung der kooperierenden Bewegungen zu bestimmen. Die meisten der bislang realisierten Ansätze zu wirklich kooperierenden Industrierobotern modifizieren die bestehenden Steuerungen (z.B. [70, 118]) bzw. entwickelt komplett eigene Steuerungen (z. B. [71]) um die fehlenden Funktionalitäten zu erhalten. Entsprechend der Forderung S3 ist diese Vorgehensweise für den vorliegenden Fall nicht zulässig, da es die Übertragbarkeit des Konzeptes auf andere Steuerungsgenerationen verhindert.

Üblicherweise erfolgt die Steuerung der einzelnen Achsantriebe der Roboter mittels RC-Steuerungen, die sehr hohe Anforderungen an die Leistungsfähigkeit und Betriebssicherheit erfüllen müssen. Aus diesem Grund entwickelten die Hersteller proprietäre Steuerungen, die auf speziellen Prozessoren und unter speziellen Betriebssystemen laufen und zueinander inkompatibel waren. Erst in den letzten Jahren ist ein Trend hin zu integrierten Systemlösungen auf PC-Basis zu verzeichnen, was zu einer höheren Bedienerfreundlichkeit und besseren Kommunikationsschnittstellen geführt hat.

Im Falle der Komplettmontage ist jedoch nicht nur ein Industrieroboter, sondern zwei Industrieroboter zu steuern. Zur Lösung dieser Aufgabe lassen sich verschiedene Steuerungsstrukturen entwickeln, die in Bild 65 exemplarisch dargestellt sind. Die wichtigsten Kriterien für die Auswahl einer geeigneten Struktur sind neben der reinen Funktionalität zum einen die erzielbaren Reaktionszeiten, die sich durch die Kommunikationsart ergeben und zum anderen die erzielbare Herstellerunabhängigkeit der Lösung.

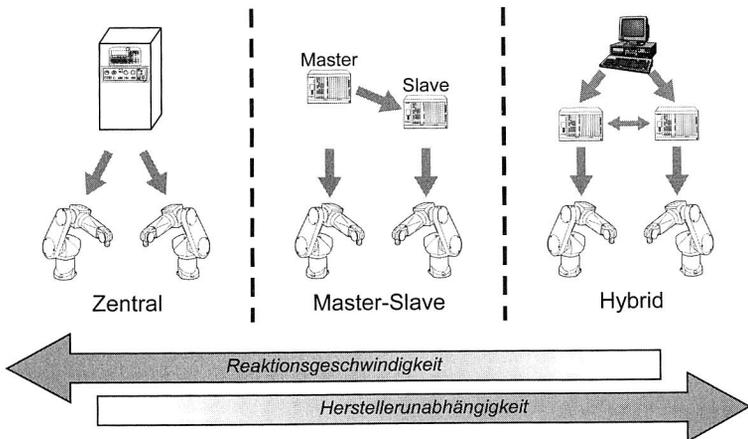


Bild 65: Mögliche Steuerungsstrukturen für kooperierende Industrieroboter

Zentrale Steuerung

Die auf dem ersten Blick einfachste Lösung ist der Einsatz einer *zentralen Steuerung*, mit der beide Industrieroboter gleichzeitig gesteuert werden. Dies bietet den Vorteil, dass keine Kommunikation mit externen Partnern erfolgen muss. Die kinematischen Modelle beider Roboter sowie die aktuellen Achswerte liegen zentral vor. Dadurch werden viele Probleme und Schwierigkeiten der nachfolgend beschriebenen Konzepte vermieden. Nach [142] ist das Vorliegen einer zentralen Steuerung die Grundlage für kooperierende Roboter. Wie jedoch nachfolgend gezeigt werden wird, existieren flexiblere Lösungsansätze.

Mehrere signifikante Nachteile erschweren allerdings die praktische Umsetzung dieser Lösung. Problematisch ist insbesondere die Verfügbarkeit solcher Steuerungen. Gängige Robotersteuerungen bieten zwar die Möglichkeit, zusätzliche externe Achsen anzusteuern. Die Steuerung besitzt jedoch keine Kenntnis über die damit angesteuerte Kinematik, da nur sehr wenige Hersteller es erlauben, ein ergänzendes mathematisches Modell in der Steuerung zu hinterlegen. Eine Ausnahme hierfür ist beispielsweise die Firma Motoman, deren Steuerung die synchrone Bewegung von 27 Achsen erlaubt [116]. Die prinzipielle Unterstützung mehrerer Achsen von einer Steuerung bedeutet jedoch nicht zwangsläufig, dass damit auch verschiedene Roboter verschiedener Hersteller angesteuert werden können, da die verwendeten Achsantriebe keine einheitliche Spezifikation besitzen.

Generell ist daher festzustellen, dass derzeitig erhältliche Steuerungen nicht für die Ansteuerung von mehr als einem Industrieroboter verwendet werden können. Insofern ist eine zentrale Steuerung kooperierender Roboter mit kommerziell verfügbaren Steuerungen derzeit nicht realisierbar, ohne dass erhebliche Einschränkungen hinsichtlich der Herstellerunabhängigkeit in Kauf zu nehmen sind. Mit den zwischenzeitlich erzielten Fortschritten im Bereich der Steuerungstechnik bieten zentrale Robotersteuerungen somit keine signifikanten Vorteile.

Master-Slave-Steuerung

Einen alternativen Lösungsansatz stellt die *Master-Slave-Kommunikation* dar [71]. Wie bei der zentralen Steuerung übernimmt bei dieser Konfiguration eine Master-Steuerung die gesamte Koordinierung der Bewegungen. Der Unterschied liegt jedoch bei der Ansteuerung der Antriebe. Die Antriebsregler des „Master-Roboters“ erhalten die berechneten Sollwerte direkt von der Mastersteuerung. Die Antriebe des Slaveroboters hingegen sind mit einer passenden Slavesteuerung verbunden. Je nach Ausarbeitung des Konzeptes überträgt der Master an den Slave entweder die neuen Koordinaten in einem geeigneten (Welt-) Koordinatensystem oder direkt als Sollwert-Vorgaben für die Achsregler. Hierfür muss eine geeignete Kommunikationsverbindung zwischen den beiden Robotern vorhanden sein, wie sie mittels RS232, Ethernet, Firewire oder Feldbus-systemen realisierbar ist.

Prinzipiell eignet sich das Master-Slave-Konzept für die Koordination von Robotern verschiedener Hersteller. Allerdings muss auch hier die Mastersteuerung in der Lage sein, die Kinematik des Slaves nachzubilden, um die entsprechenden Kollisionsberechnungen durchführen zu können. Da diese aufwendigen Algorithmen in Echtzeit, also synchron zur Ausführungszeit laufen müssen, sind hierfür genauso leistungsfähige Steuerungen notwendig wie bei einer zentralen Steuerung.

Hybride Steuerung

Den flexibelsten Ansatz stellen als dritte Alternative hybride Steuerungen dar. Bei diesem erfolgt die (abstrakte) Bahnplanung mittels einer übergeordneten Koordinierungsinstanz für beide Roboter. Analog zu dem Master-Slave-Konzept besteht auch hier die Möglichkeit, entweder direkt die Achswerte oder lediglich die entsprechenden TCP-Koordinaten an die angeschlossenen Steuerungen zu übertragen. Der Nachteil der hybride Steuerungen liegt in seinem hohen Kommunikationsaufwand, da der Datenaustausch zwischen der Koordinierungsinstanz und den Steuerungen als Punkt-zu-Punkt-Verbindung realisiert ist. Das Konzept eignet sich somit nur eingeschränkt für die Realisierung hochdynamischer Bewegungen mit mehreren Robotern.

Ein wesentlicher Vorteil hingegen ist die Trennung in planende und ausführende Tätigkeiten. Robotersteuerungen werden somit lediglich für ihre originäre Aufgabe, nämlich der Steuerung des Roboters verwendet, wohingegen für die Bahnplanung und Kollisionsüberwachung leistungsfähige PCs zum Einsatz kommen. Eine direkte Kommunikation unter den Robotersteuerungen ist in diesem Fall nicht notwendig, kann aber zusätzlich vorgesehen werden, um beispielsweise eine Synchronisierung über Semaphoren zu erlauben. Durch die Nutzung von roboterspezifischen Postprozessoren ist es möglich, unterschiedliche Steuerungen anzusprechen.

Unter der Betrachtung der genannten Vor- und Nachteile und insbesondere dem aktuellen Stand der Technik ist festzustellen, dass das hybride Steuerungskonzept für den Einsatz in der Komplettmontagezelle die meisten Vorteile bietet. Dies gilt insbesondere im Sinne der angestrebten Unabhängigkeit von herstellerspezifischen Lösungen. Es ist allerdings damit zu rechnen, dass in Zukunft hybride Lösungen durch die immer leistungsfähigeren Steuerungen verdrängt werden und so die Master-Slave-Konzepte oder sogar die zentralen Steuerungslösungen die gleiche Flexibilität erlauben.

6.4 Zusammenfassung der optimalen Teilstrategien

In den zurückliegenden Kapiteln wurde gezeigt, dass die Durchführung kooperierender Bewegungen mit Industrierobotern in einer Vielzahl von wissenschaftlichen Arbeiten behandelt wird. Die Verwendung des Montagevorranggraphen für die Ablaufplanung ist dabei ein anerkanntes und häufig verwendetes Hilfsmittel, das sich durch geringe Erweiterungen auch für die Montageablaufplanung der Komplettmontage eignet.

Da im Gegensatz zu den meisten Forschungsarbeiten auf Modifikationen der Robotersteuerungen verzichtet werden soll, diese jedoch nicht für die Abarbeitung aufwendiger Algorithmen optimiert sind, stellt die vorgestellte hybride Steuerungsstruktur mit einem Leitrechner und den unterlagerten Robotersteuerungen die ideale Basis für die Realisierung einer dynamischen Bahnplanung dar.

Bedingt durch die kinematischen Besonderheiten der verwendeten Linearroboter, kann diese Planungsaufgabe auf ein zweidimensionales Problem zurückgeführt werden, wo mit der näherungsweise Zellzerlegung ein performantes, sicheres und effizientes Werkzeug vorhanden ist.

6.5 Realisierung des integrierten Konzeptes

Bild 66 gibt einen Überblick über die Anforderungen, die das mehrstufige Steuerungskonzept erfüllen muss [143]. Berücksichtigt man die Montageablaufplanung nicht, so ist ein dreischichtiges Steuerungsmodell erkennbar, das sich in die Komponenten, Präprozessor, Postprozessor und Koordinierungsinstanz aufteilt. Es findet somit eine Erweiterung des klassischen zweischichtigen Prä-/Postprozessor-Ablaufs statt, da nur auf diese Weise eine dynamische Anpassung der Bewegungsabfolgen zur Ausführungszeit erreichbar ist.



Bild 66: Anforderungen an das mehrstufige Steuerungskonzept zur Realisierung der kooperierenden Montage in der Komplettmontagezelle

Zu den allgemeinen Forderungen zählt, dass die Informationen zum Montageablauf über einen Montagevorranggraphen eingegeben werden können. Die hierfür entwickelte Software ist Inhalt des nachfolgenden Kapitels. Weitere, allgemeine Forderungen betreffen das GUI, das eine intuitive, Windows-basierte Benutzerschnittstelle besitzen soll.

Entsprechend der aufgestellten Unterteilung erfolgt in den folgenden Unterkapiteln die Darstellung der realisierten Applikationen, die sich trotz der Erfüllung aller aufgestellten Forderungen sich nach wie vor durch die hohe Herstellerunabhängigkeit auszeichnen.

6.5.1 Montageablaufplanung mit FAPSgraph

In seiner ursprünglichen Form stellt der Montagevorranggraph (MVG) mittels gerichteter Kanten und Knoten lediglich die Montager Reihenfolge von Baugruppen dar. Neben der Bezeichnung und der optionalen Notation der Montagedauer sind in ihm keine weiteren Informationen enthalten. Es ist offensichtlich, dass auf dieser Basis keine automatische Bahnplanung möglich ist. Aus diesem Grund war es notwendig, die Datenbasis zu erweitern. Der so entstandene *erweiterte* Montagevorranggraph (eMVG) enthält zusätzliche Geometrieinformationen wie die Bauteilabmessungen, die Abhol- und Montagekoordinaten, logische Informationen wie zugeordneter Greifer und Roboter sowie Prozessinformationen und -parameter.

Um eine einfache Datenerfassung zu ermöglichen, wurde für diese Aufgabe die Software *FAPSgraph* entwickelt (Bild 67). Die größte Fläche der in Visual Basic 6.0 realisierten Applikation wird von dem so genannten Zeichenbereich eingenommen. In diesem erstellt der Planer graphisch den eMVG. Ein Mausklick auf einen leeren Punkt legt einen neuen Montageschritt an. Zur Identifizierung im späteren Verlauf ist dieser über einen automatisch generierten Primärschlüssel sowie einer zugeordneten Bezeichnung gekennzeichnet. Im Anschluss öffnet sich ein Dialogfenster in das die Abhol- und Montagekoordinaten einzugeben sind. Zur Unterstützung arbeitsteiliger Prozesse können diese sowohl im Weltkoordinatensystem der Montagezelle, als auch im lokalen Koordinatensystem des Werkstückträgers vorliegen.

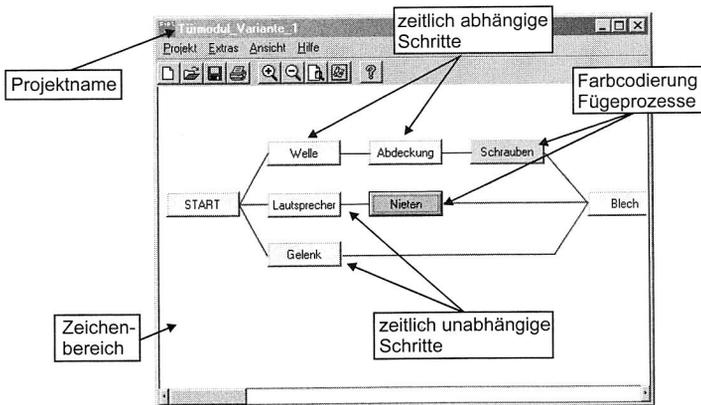


Bild 67: Screenshot von FAPSgraph mit einem beispielhaften Montagevorranggraphen

Da die Konstruktion der Bauteile, zugeordneten Spanneinrichtungen und Formnester üblicherweise mit Hilfe eines rechnergestützten CAD-Systems erfolgt, bietet es sich an, die benötigten Koordinaten im lokalen Koordinatensystem des Bauteils und nicht im Weltkoordinatensystem zu ermitteln. Die Umrechnung in das Weltkoordinatensystem erfolgt von FAPSGraph vor der Generierung der Bewegungsbahn automatisch. Der gesuchte Greifpunkt des Bauteils ergibt sich aus der Vektoraddition dieser Koordinate mit dem Verschiebungsvektor vom Ursprung des Werkstückträger-Koordinatensystems (KS-WT) zum gewünschten Greifpunkt des Bauteils. Aus Bild 68 ist ersichtlich, dass die alleinige Bestimmung des Greifpunktes nicht hinreichend ist. Zusätzlich muss der Greiferoffset, also der senkrechte Abstand von der Oberkante des Greiferflansches zum gewünschten Greifpunkt auf der Greiferbacke mit in die Berechnung des TCP einbezogen werden. Auch dieser Wert ist für jeden Greifer im System hinterlegt.

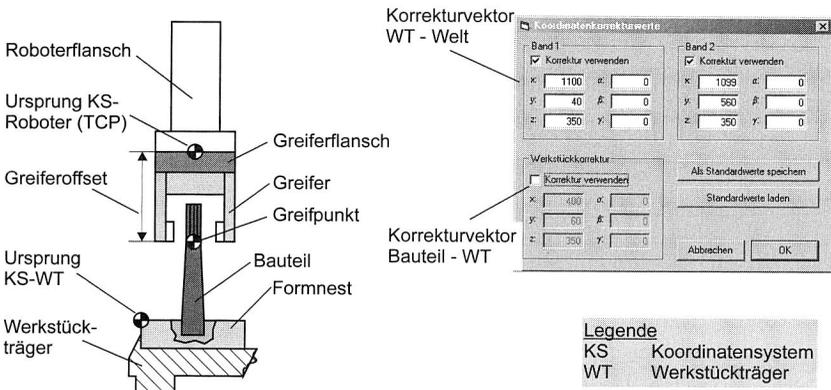


Bild 68: Bestimmung der TCP-Koordinate im Weltkoordinatensystem durch Transformation der lokalen Greifkoordinaten mittels des hinterlegten Korrekturvektors

Zur Vermeidung von Positionsfehlern erfolgt eine redundante Speicherung der globalen Daten für jedes Projekt separat. So ist sichergestellt, dass Toleranzen einzelner Werkstückträger keinen Einfluss auf bereits definierte Vorrangraphen haben.

Die aus den CAD-Daten ermittelten Koordinaten weisen in der Regel eine gewisse Ungenauigkeit auf, da die Erfassung realer Geometrien in einer ausgedehnten Montagezelle sehr schwer und fehlerbehaftet ist. Aus diesem Grund werden Offline-generierte Programme in der Regel nicht direkt ausgeführt, sondern die ermittelten Greifpunkte werden zunächst von Hand nachgeteacht (vgl. Kapitel 2.4.1). Das hier vorgestellte Steuerungskonzept unterstützt diesen Iterationsschritt durch die Möglichkeit, in FAPSGraph neben den lokalen Koordinaten auch Weltkoordinaten zu verwenden. Da das Teachen immer im Weltkoordinatensystem erfolgt, könnten sonst die Vorrangraphen im Anschluss nicht mehr sinnvoll mit FAPSGraph bearbeitet werden. Durch die Aufspaltung

des Vektors in die beiden Komponenten *Welt* und *Lokal* lassen sich die Werte wieder zurückrechnen und beispielsweise für ähnliche Punkte verwenden.

Bild 69 stellt den vereinfachten Workflow von der Erstellung des Vorranggraphen bis hin zum ersten Test der generierten RC-Programme dar. In der im unteren Bilddrittel dargestellten Datensicht ist erkennbar, dass alle Programme auf die gleichen Daten zugreifen und somit eine konsistente Datenhaltung gewährleisten. Die zentral gespeicherten Transformationsvektoren (Greifer, Bauteil und WT-Formnest) werden für jedes Projekt redundant in den Projektinformationen gespeichert, um bei eventuellen Änderungen auf die Werte zum Zeitpunkt der Programmerzeugung zurückgreifen zu können.

Ein weiterer Vorteil der zentralen Datenhaltung ist in der Struktur der Abteilungssicht erkennbar (Bild 69, oberes Drittel). Die benötigten Daten können unabhängig von mehreren Abteilungen dem Projekt hinzugefügt werden. Nach der Definition der Montage- und Prozessschritte können sowohl die Montageabfolge, als auch die benötigten Prozess- und Greifparameter unabhängig editiert werden. Die in der Abbildung dargestellte Rückführung der geteachten Koordinaten dient zum einen der Erhöhung der Qualität der zugrunde liegenden CAD-Daten, zum anderen der Anpassung der Prozessparameter an die tatsächlich herrschenden Bedingungen.

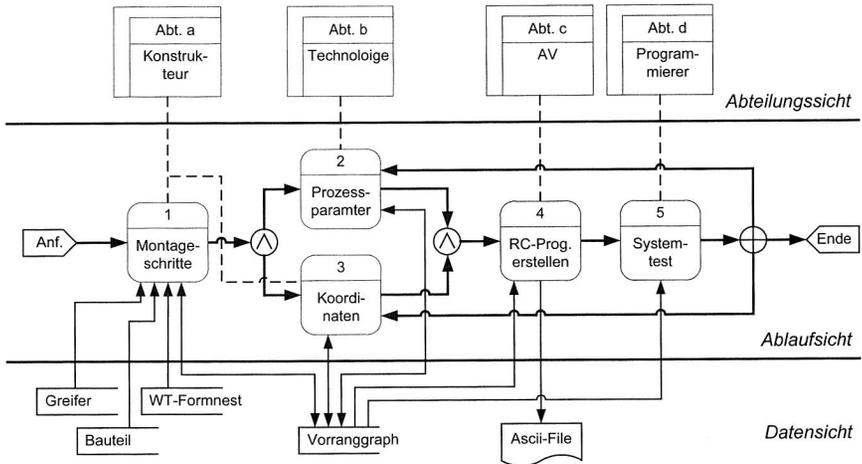


Bild 69: Vereinfachter Workflow zur Erstellung des Montageablaufes und der Berechnung der Korrekturvektoren differenziert nach Daten-, Ablauf- und Abteilungssicht

Der Montagevorranggraph für die Komplettmontage einer Baugruppe kann unter Umständen sehr umfangreich sein. Aus diesem Grund verwendet FAPSgraph verschiedene Farben, um dem Planer direkt im Zeichenbereich einen schnelleren Überblick über die logische Abfolge der Prozesse zu geben. Pick-und-Place-Operationen werden in gelb, Schraubprozesse in grün und Stanznietprozesse in lila dargestellt. Durch diese

Codierung ist es somit nicht nötig, die Technologie des Prozesses als Beschreibungstext anzugeben. Für die genannten Prozesse sind beispielhafte Dialogfenster implementiert, über die prozessspezifische Parameter an die Ablaufsteuerung übergeben werden können (Bild 70). Die Daten werden unverändert durch den Prä- und Postprozessor geschleust und zur Ausführungszeit über den OPC-Server bereitgestellt.

Das Konzept der Komplettmontage geht prinzipiell von identischen Handhabungsgeräten aus. Es ist jedoch denkbar, dass ein Fügeprozess unter Umständen spezielle Hardwareeinrichtungen auf Seiten des Handhabungsgerätes erfordert. Zur Vermeidung von Extrakosten muss es deshalb möglich sein, den Prozess diesem erweiterten Roboter zuzuweisen. In FAPSgraph ist diese Forderung durch eine zusätzliche Pull-Down-Liste in jeweiligen Prozessdialog realisiert. Der Planer hat so die Möglichkeit, einzelne Montage- oder Prozessschritte genau einem festen Handhabungsgerät zuzuweisen (*reservierter Schritt*). Üblicherweise sollte der Eintrag „Roboter 1 oder 2“ lauten, um die Optimierungsmöglichkeiten der Software voll auszuschöpfen.

Die Festlegung des Montageablaufs erfolgt über die Definition der Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen. Im Zeichenbereich werden diese durch gerichtete Kanten zwischen den Schritten symbolisiert. Die Vorgehensweise bei der Definition ist sehr einfach. Wie auch bei der Eingabe der Prozesswerte wird zunächst auf den gewünschten Schritt geklickt (Bild 70 links). Nach dem Wechsel in den „Vorgänger/Nachfolger“-Modus definiert ein Klick mit der linken Maustaste auf einen anderen Schritt diesen als Vorgänger, mit der rechten Maustaste als Nachfolger des ursprünglich gewählten Schrittes. Hierbei genügt eine einseitige Definition der Beziehungen. Es ist also nicht notwendig, eine bereits definierte Nachfolger-Beziehung vom Nachfolger als Vorgänger-Beziehung erneut zu definieren.

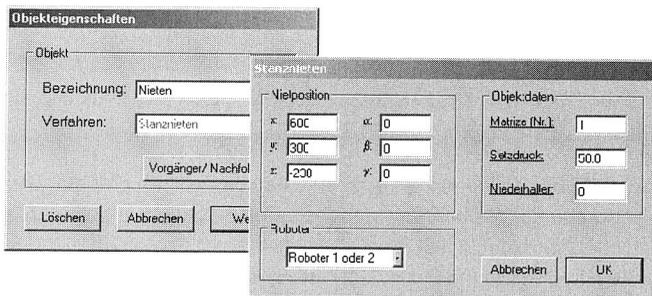


Bild 70: Beispieldialog für die Angabe von Prozessparametern in FAPSgraph am Beispiel des Stanznietens

Der komplettierte Montagevorranggraph dient als Grundlage für die sich anschließende Generierung der Simulations- und RC-Anweisungen. Über den Menübefehl *Datei|Exportieren* erfolgt der Export der gesamten Informationen in eine Ascii-Datei. Jeder

Schritt des Vorranggraphen entspricht genau einer Zeile in dieser Datei. Tabelle 6 gibt einen Überblick über die definierte Datenstruktur.

Lfd.-Nr.	Bezeichnung	Beschreibung	Datentyp
1	ID	Primärschlüssel des Montageschrittes	Long
2	Name	Bezeichnung des Montageschrittes	String
3	Vorgänger	ID-Nummern der Vorgänger	String [i/j/k]
4	Nachfolger	ID-Nummern der Nachfolger	String [i/j/k]
5	Abmaße	Hauptmaße des Bauteils. Wird für die Berechnung des vertikalen Sicherheitsabstandes benötigt	String [X/Y/Z]
6	AbholPos	Koordinate der Abholposition in Weltkoordinaten	String [X/Y/Z/A/B/C]
7	MontagePos	Koordinate der Montageposition auf dem Bausteil in Weltkoordinaten	String [X/Y/Z/A/B/C]
8	Greifer	Kennung des für die Fügebewegung benötigten Greifers	Int
9	Robot_ID	Nummer des Roboters, der den Vorgang ausführen muss. Falls keine Präferenzen bestehen (=0, Voreinstellung) entscheidet das System über die optimale Aufteilung	Int [0..2]
10	Prozess	[Optional] Kennung des benötigten Fügeprozesses	Int
11	Prozessparameter	[Optional] Angabe von Prozessparametern, die beim Fügeprozess eingehalten werden müssen. Diese werden an die Prozesssteuerung weitergegeben	String

Tabelle 6: Datensatzbeschreibung der Exportdatei von FAPSgraph

Die ersten vier Attribute definieren die logische Verknüpfung der Montageschritte untereinander. In der ersten Spalte befindet sich die laufende Nummer des Montageschrittes, die gleichzeitig als Primärschlüssel dient. Getrennt durch das Zeichen „|“, das aufgrund der variablen Spaltenbreite immer als Trennzeichen fungiert, befindet sich in der zweiten Spalte die textuelle Beschreibung, die am Bildschirm angezeigt wird. Daran anschließend erfolgt die Nennung der jeweiligen Vorgänger und Nachfolger. Die Ausgabe beider Verknüpfungsrichtungen dient der Fehlererkennung bei manuellen Manipulationen im Datensatz. Die genannten vier Attribute reichen aus, um die gesamte logische Verkettung des Montagevorranggraphen darzustellen. Dies ist nicht nur für das erneute Einlesen des Vorranggraphen in FAPSgraph notwendig, sondern auch die Koordinierungsinstanz, die den eigentlichen Ablauf steuert, greift auf diese Daten zu.

Für die Bewegungsplanung ist neben der Kenntnis der logischen Abfolge zusätzlich die räumliche Lage der Greifpunkte von Bedeutung. Diese Informationen sind primär in den folgenden drei Attributen enthalten. Um ein sicheres Anfahren an das Bauteil zu ermöglichen, befinden sich in Spalte fünf die groben Bauteilabmaße. Ausgehend von der z-Koordinate errechnet die Software den nötigen Sicherheitsabstand, um den Greifer senkrecht über dem Bauteil positionieren zu können. Beim Greifen des Bauteils erfolgt 50mm über dieser Koordinate eine Reduktion der Geschwindigkeit. Die Weltkoordinaten der Abhol- und Montagepunkte finden sich im Anschluss in den Attributen sechs und sieben.

In der Spalte acht ist die Nummer des zugeordneten Greifers und in Spalte neun die ID des gewählten Roboters hinterlegt. In der Regel ist hier eine „0“ eingetragen, was der Koordinierungsinstanz die optimierte Zuweisung ermöglicht. Eventuelle technologische Randbedingungen wie eine feste Zuordnung von Prozess zu Roboter sind durch den Eintrag der Roboter-ID in dieser Spalte abbildbar.

Die schon angesprochene Möglichkeit, unterschiedlichste Fügeprozesse im Montagevorranggraphen abzubilden, ist in der Export-Datei mit den beiden prozessorientierten Attributen zehn und 11 realisiert. Während ersteres der Spezifikation des gewünschten Fügeprozesses dient, sind die hierfür benötigten Prozessparameter im letztgenannten hinterlegt. Die in diesen Spalten gespeicherten Informationen werden nicht in die Roboterprogramme übernommen, sondern, wie schon geschildert, von der Koordinierungsinstanz zur Laufzeit über die OPC-Schnittstelle beliebigen Programmen bereitgestellt.

6.5.2 Prä- und Postprozessor mit Anbindung zur Kinematiksimulation

Entsprechend dem bewährten Konzept der Prä-/Postprozessorteilung, das erfolgreich im Bereich der Werkzeugmaschinen seit Jahren im Einsatz ist, erfolgt die Erstellung der benötigten RC-Programme in zwei Stufen. In der ersten Stufe wird, basierend auf den Daten des erweiterten Montagevorranggraphen, zunächst ein neutraler Zwischencode generiert, der die optimale Aufteilung der Montageschritte auf die beiden Handhabungsgeräte berechnet.

Falls es der Anwender wünscht, wird dieser Zwischencode über einen Postprozessor direkt in die Maschinensprache der Industrieroboter übersetzt. Nachteilig an diesem Vorgehen ist jedoch, dass keine vorhergehende Kontrolle des berechneten Ablaufes erfolgt. Insbesondere sind keine Aussagen zur erzielbaren Taktzeit möglich. Abhilfe schafft hier die Zwischenschaltung einer Anlagensimulation. Aufgrund der überragenden Bedeutung der Kinematiksimulation insbesondere bei Automobilisten bereits hat und in den nächsten Jahren haben wird, wurde in dieser Arbeit auf eine Schnittstelle zu einer solchen Software großen Wert gelegt.

Präprozessor

Ein Vergleich verschiedener Hersteller ergab eine hohe Leistungsfähigkeit der Programmiersprachen CLI und GSL der Firma Delmia, die unter anderem in deren Kinematiksimulation Igrip zum Einsatz kommen. Über eine C-Programmierschnittstelle stehen nahezu alle internen Funktionen externen Programmen zur Verfügung. Die berechneten Bewegungen der Handhabungsgeräte lassen sich so direkt in einem virtuellen Zellenmodell visualisieren, ohne dass weitere Zwischenschritte erforderlich wären.

Vor der Bahnplanung berechnet der Präprozessor zunächst die optimale Aufteilung der Montageschritte auf die beiden Industrieroboter. Der Algorithmus besteht aus zwei Stufen. In der ersten Stufe gilt es, den Roboter zu ermitteln, der am besten mit der Montage beginnt. Die Aufteilung der restlichen Schritte erfolgt mittels mehrerer, im System hinterlegter Optimierungsalgorithmen:

1. Logische Konsistenz

Die oberste Optimierungsregel, die zugleich auch eine unverletzliche Randbedingung für die Auswahl der Montagereihenfolge darstellt ist, dass alle Vorgängerzustände abgearbeitet sind, oder sich zumindest gerade in Bearbeitung befinden müssen. In diesem Fall kann der Roboter unabhängig von dem eventuell gesperrten Montagebereich bereits den Greiferwechsel und die Bauteilaufnahme durchführen. Er wartet dann mit gegriffenem Bauteil über der Greifposition auf die Freigabe.

2. Minimierung der Greiferwechsel

Greiferwechsel stellen einen sehr zeitintensiven Vorgang dar, da zunächst der alte Greifer abgelegt und erst im Anschluss der neue gegriffen werden kann. Zur Minimierung der Montagezeit ist es daher unbedingt erforderlich, all diejenigen Montageschritte zu identifizieren, die mit dem gleichen Greifer erfolgen. Untersuchungen haben gezeigt, dass es sinnvoller ist, unter Umständen einen Montageschritt „auszusetzen“ als von einem Greifer auf einen anderen zu rüsten und im Anschluss den alten Greifer wieder zu nehmen.

Aus diesem Grund wurde eine zweistufige Optimierung implementiert. In der ersten, einer rückwärtsgerichteten Stufe wird der Montagevorranggraph nach Zuständen untersucht, die von einem vorgegebenen Roboter durchgeführt werden müssen. Davon ausgehend erfolgt eine Überprüfung aller Vorgängerzustände, ob diese den gleichen Greifer benötigen und keinem Roboter zugewiesen sind. Ist dies der Fall, so wird der Vorgängerzustand mit dem selben Roboter bearbeitet.

Bei dem in Bild 71 beispielhaft dargestellten Montagevorranggraphen ist der Montageschritt 3 mit dem ersten Roboter (R 1) und dem Greifer 2 (G 2) auszuführen (reservierter Schritt). Ausgehend von diesem erfolgt ein Test, ob der Vorgänger (in dem dargestellten Beispiel Schritt 2) den gleichen Greifer benötigt. Ist dies der Fall, so erfolgt eine Reservierung des Schritts für den Roboter (Bild 71, rechts). Da die Schritte 1 und 2 unterschiedliche Greifer benötigen, kann zu diesem Zeitpunkt noch

keine Entscheidung über Schritt 1 getroffen werden. Der Zweck der rückwärtsgerichteten Optimierung besteht in der Minimierung der Blockierwahrscheinlichkeit bei der Roboter und dient als Vorstufe für den eigentlichen Optimierungsalgorithmus.

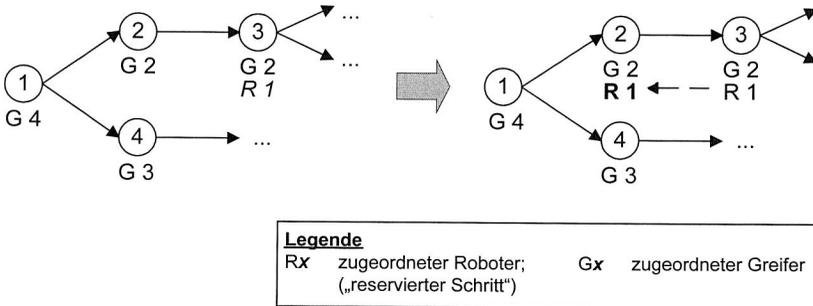


Bild 71: Rückwärtsgerichtete Optimierung als Mittel zur Minimierung der Greiferwechsel bei reservierten Montageschritten

Dieser erfolgt in der sich anschließenden vorwärtsgerichteten Stufe. Hierbei werden die verbliebenen Zustände so auf die beiden Roboter aufgeteilt, dass eine möglichst geringe Zahl von Greiferwechselvorgängen notwendig ist. Im obigen Beispiel würde Roboter 2 mit dem Schritt eins beginnen und nach einem Greiferwechsel mit Schritt vier fortfahren. Roboter 2 würde hingegen die Schritte zwei und drei durchführen.

3. Reduzierung des Raumbedarfs

Weitere Zeitgewinne sind durch die parallele Durchführung der eigentlichen Montagevorgänge realisierbar. Stehen mehrere Montageschritte zur Verfügung, die nach den Kriterien 1 und 2 gleichwertig sind, wird der Schritt ausgewählt, dessen Raumbedarf minimal ist. Aufgrund des punktsymmetrischen Aufbaus der Montagezelle reduziert sich die Aufgabe auf die Betrachtung der sich ergebenden y-Koordinate im lokalen Roboterkoordinatensystem. Je kleiner dieser Wert ist, desto weniger ragt die zweite Achse des Roboters in den Arbeitsraum. Unter Verwendung dieser Regel steigt die Wahrscheinlichkeit, dass der zweite Roboter gleichzeitig einen Montagevorgang innerhalb des Montage-raums ausführen kann.

4. Optimierung der Hexapodbelegung

Könnte aufgrund der oben genannten Regeln kein optimaler Montageschritt gefunden werden, wird der Montageschritt gewählt, bei dem keine neue Hexapod-Positionierung notwendig ist. Aufgrund der hohen Dynamik des Hexapoden ist diese Regel allerdings mehr ein Hilfskonstrukt als ein Optimierungsansatz, da dessen Positionierung zeitlich parallel zur Roboterbewegung von der Abhol- zur Montageposition erfolgt.

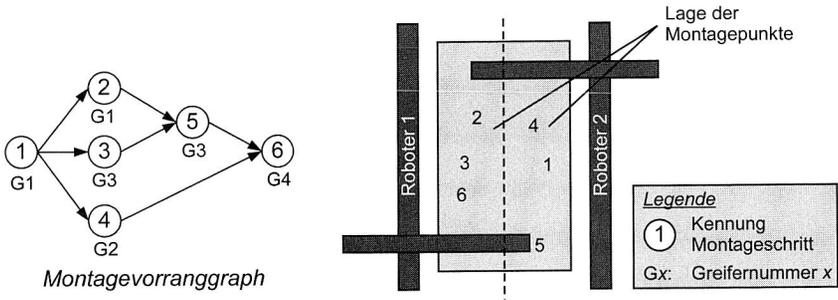


Bild 72: Beispielhafter Montagevorranggraph zur Erläuterung der Optimierungsregeln für die Aufteilung der Montageschritte

Zur Verdeutlichung der Optimierungsregeln ist in Bild 72 ein vereinfachter Montagevorranggraph zusammen mit den angenommenen Montagekoordinaten in der Draufsicht dargestellt. Ausgehend von den Optimierungsregeln 1-4 soll nachfolgend kurz die sich ergebende Aufteilung dargestellt werden.

ID	Regel	Roboter	Erläuterung
1	1, 3	2	Es ist der erste Montageschritt, beide Roboter haben noch keinen Greifer, deshalb Zuweisung an R2, da der Montagepunkt in der rechten Hälfte des Arbeitsraumes liegt
3	1, 3	1	Der Vorgänger (ID=2) ist in Bearbeitung und der Montagepunkt ist in der linken Hälfte des Arbeitsraumes. Dadurch dominiert Schritt 3 Schritt 4. R1 wartet mit dem bereits gegriffenen Bauteil auf die Fertigstellung des Schrittes 1
2	2	2	Es wird der gleiche Greifer wie für den ersten Montageschritt benötigt, deshalb erhält auch diesen Montageschritt Roboter 2
5	1, 2	1	Gleicher Greifer wie Schritt 3, und alle Vorgängerzustände sind bearbeitet bzw. in Bearbeitung.
4	1,3	2	Der Vorgänger (ID=1) ist abgeschlossen und der Montagepunkt ist in der rechten Hälfte des Arbeitsraumes.
6	1	1	Alle Vorgängerzustände sind abgearbeitet bzw. in Bearbeitung

Tabelle 7: Zu erwartende Aufteilung der Montageschritte auf die Handhabungsgeräte unter Annahme eines gleichen Zeitbedarfs pro Arbeitsschritt

Entsprechend der Forderung S2 bietet der Präprozessor die Möglichkeit, die erstellte Montagesequenz mittels der Kinematiksimulation IGrip zu visualisieren. Um auch in diesem Bereich die gewünschte Herstellerunabhängigkeit zu bewahren, werden die

Montageschritte nicht direkt in die Syntax von IGrip umgesetzt, sondern es wurde entsprechend Bild 73, ein 3-Schichten Modell erstellt, das die benötigten atomaren Bewegungsanweisungen (Positioniere TCP auf Koordinate x, y, z, \dots) in unterschiedlich komplexe Funktionsaufrufe kapselt.

Die als Abstraktionsschicht bezeichnete zweite Schicht enthält wiederum 3 Ebenen, die die Bewegungssequenzen in eine immer weiter steigende Detaillierung führen, bis schließlich in der 1. Schicht die elementaren, IGrip-spezifischen Befehle zur Verfügung stehen. Diese können sowohl direkt an die Kinematiksimulation weitergegeben, als auch zunächst in einer Ascii-Datei zwischengespeichert werden. Sollte die Visualisierung der Montagesequenz auf einer anderen Kinematiksimulation erfolgen, so ist lediglich die erste Schicht an die benötigte Syntax und Semantik anzupassen. Die Schichten 3 und 2 und somit auch die darin enthaltenen Ebenen bedürfen keiner Anpassung.

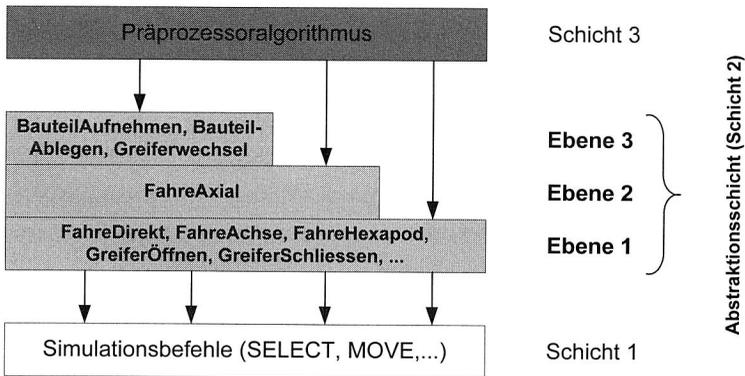


Bild 73: Schichtenmodell des entwickelten Präprozessors zur Unterstützung einer weitgehenden Herstellerunabhängigkeit

Ein wichtiger Aspekt bei der Berechnung der idealen Bahn ist, dass sich die Koordinate des Montagepunktes bei einer Neigung des Hexapoden verschiebt. Ausgehend vom eMVG ist dem Präprozessor die Koordinate des Fügepunktes $(x, y, z, \alpha, \beta, \chi)^T$ im Weltkoordinatensystem bekannt. Für die Berechnung der zugeordneten Bewegung ist dieser zunächst in seine Komponenten

$$\vec{v}_H = (0, 0, 0, \alpha, \beta, 0)^T \text{ für den Hexapoden und}$$

$$\vec{v}_R = (x, y, z, 0, 0, \chi)^T \text{ für den Linearroboter}$$

aufzuspalten. Die Ausrichtung des Bauteils auf dem Hexapoden um die x- und y-Achse bewirkt jedoch gleichzeitig eine Verschiebung der Zielkoordinate um dx , dy und dz (Bild 74). Aus diesem Grund muss für den Linearroboter ein entsprechender Korrekturvektor berechnet werden.

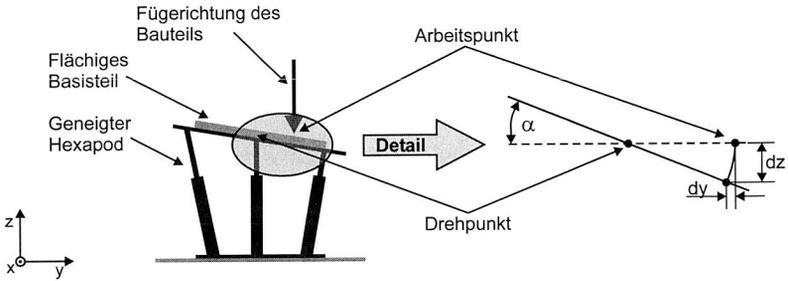


Bild 74: Verschiebung des Montagepunktes in der y - z -Ebene durch Drehung des Hexapods um die x -Achse

Postprozessor

Bedingt durch die bislang fehlende Akzeptanz universeller Programmiersprachen im Bereich der Industrieroboter ist es notwendig, für die Roboterprogramme die hersteller-spezifischen Befehle zu verwenden. Zwar gibt es mit der DIN-Norm 66312 einen Vorschlag für eine allgemeine Roboterprogrammiersprache IRL (Industrial Robot Language) [144], jedoch ist deren Verbreitung und Unterstützung sehr gering [125, 145].

Aus diesem Grund bieten verschiedene Hersteller spezielle Postprozessoren an, die aus die simulierte Verfahrbewegungen Roboterprogramme in der entsprechenden Syntax erzeugen. Für den vorliegenden Fall reicht diese Funktionalität jedoch nicht aus, da diese Programme keine Mechanismen für die kooperierenden Bewegungen bereitstellen. Darüber hinaus erfordert die Erfüllung von Forderung S5, dass zur Ausführungszeit eine dynamische Schrittzweisung möglich sein muss. Da ein direkter Eingriff in die Robotersteuerung nicht möglich ist (Forderung S3), müssen die Alternativbewegungen zum Zeitpunkt der Programmerstellung in den Source-Code integriert werden.

Die hier beschriebene Vorgehensweise löst somit die von dem Präprozessor vorgenommene Aufteilung der Montageschritte auf die beiden Handhabungsgeräte wieder auf und kombiniert sie zu einem einzigen, seriellen Programm (Bild 75). Jeder zuvor mit FAPSGraph angelegte Montageschritte ist dabei in die Komponenten Greiferwechsel - Bauteilaufnahme - Bauteil fügen aufgespalten. Der genaue Ablauf der Kommunikation ist im folgenden Kapitel dargelegt.

Die Entwicklung des Postprozessors verlangt eine zweistufige Vorgehensweise. Zunächst sind die elementaren Fahrbefehle, die bereits das Simulationsmodell gesteuert haben, in die spezifische Robotersprache zu übersetzen. Dieser Schritt ist durch die auf beiden Seiten vorgegebene Syntax und Semantik vergleichsweise einfach. Rudimentäre Funktionen wie das Öffnen eines Greifers lassen sich durch die Verwendung einer Übersetzungstabelle, die eine transparente Verwendung der digitalen Ein- und Ausgänge erlaubt, vereinfachen. Darüber hinaus bietet es sich an für komplexe, starre Bewegungsabläufe wie das Ablegen eines Greifers, getestete Programmmodule lokal auf der

Robotersteuerung vorzuhalten, um zum einen die zu übertragenden Datenmengen zu reduzieren, zum anderen aber auch die Entwicklung des Postprozessors zu beschleunigen, da in diesem Fall lediglich ein Funktionsaufruf genügt, der zur Ausführungszeit in die entsprechende lokale Routine verzweigt.

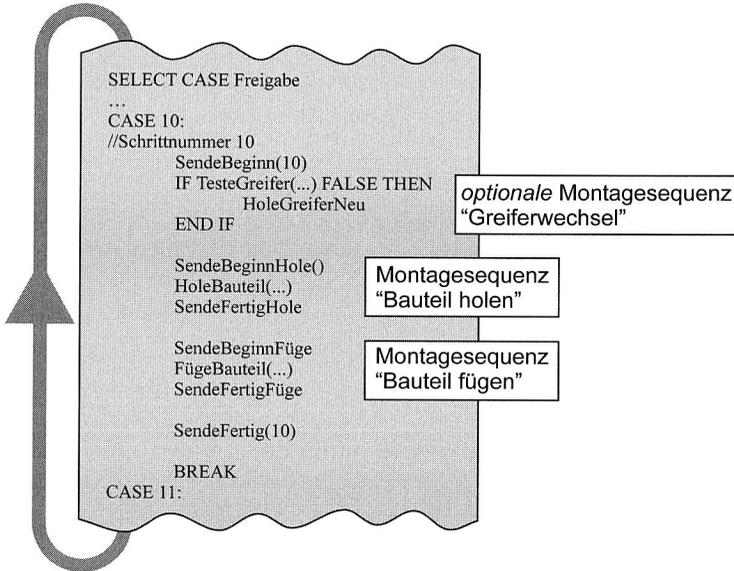


Bild 75: Serialisierung und Kapselung der Montageschritte im Roboterprogramm am Beispiel einer hypothetischen Robotersprache

Komplexer gestaltet sich die Realisierung der Kommunikation zwischen Robotersteuerung und der übergeordneten Koordinationsinstanz. Der Postprozessor muss die entsprechenden Bitmuster, über die die Kommunikation realisiert wird, automatisch erzeugen. Durch den geschickten Einsatz von Makros und Unterprogrammen kann dieser Vorgang soweit automatisiert werden, dass eine Adaption an anderen Steuerungen in kurzer Zeit möglich ist.

Der auf diese Weise erzeugte Source-Code muss im Anschluss in die Maschinensprache der Robotersteuerung übersetzt werden. Im vorliegenden Fall geschieht dies mit Hilfe eines von der Firma ReisRobotics erhältlichen Compilers, der den als Ascii-Datei vorliegenden Source-Code in die Maschinensprache übersetzt.

Die Oberfläche des kombinierten Prä-/Postprozessors ist in Bild 76 dargestellt. Eine besondere Erleichterung für den Benutzer stellt der so genannte Test- oder Debug-Modus dar. Ist dieser aktiviert, so werden alle Roboterbewegungen automatisch auf eine frei wählbare Geschwindigkeit reduziert, ohne dass hierfür weitere Einstellungen vorgenommen werden müssen.

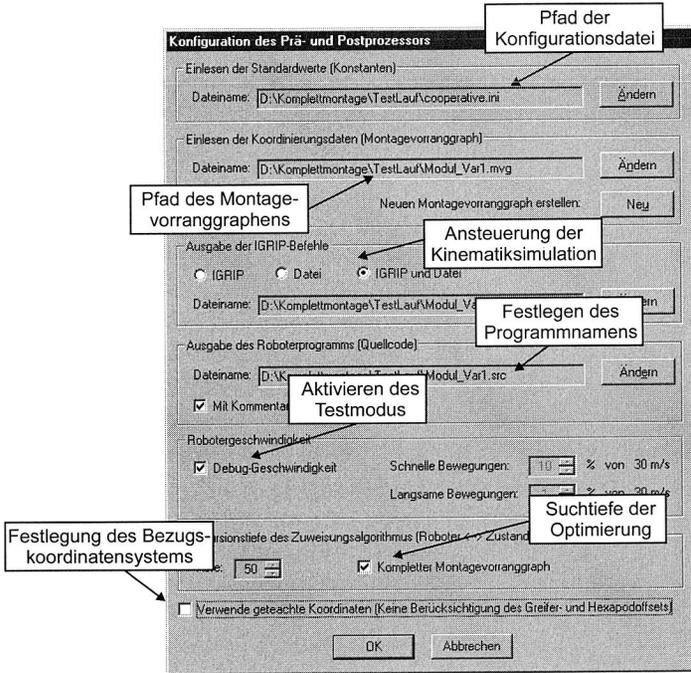


Bild 76: Entwickelter Prä-/Postprozessor zur Berechnung der optimalen Montagesequenz und Erstellung der Bewegungsanweisungen

Die verwendeten Roboteranweisungen sind alle auf einem sehr niedrigen Systemniveau angesiedelt, so dass sie von jeder anderen Steuerung unterstützt werden. Die Erweiterung um Kinematiken anderer Hersteller ist dadurch problemlos möglich. In diesem Zusammenhang soll insbesondere nochmals erwähnt werden, dass die gesamte Kooperation ohne Hardwareerweiterung auf Steuerungsseite realisiert wurde.

6.5.3 Koordinierungsinstanz

Das Kernstück der Steuerung der Komplettmontage stellt die so genannte Koordinierungsinstanz dar. Ihre Aufgabe besteht in der Zuweisung, Überwachung und Freigabe der einzelnen Montagesequenzen.

Wie im vorhergehenden Kapitel bereits dargestellt wurde, verfügen beide Roboter über identische Programme. Jede einzelne Montagesequenz, die aus den optionalen Schritten Greifer holen, Bauteil holen und Bauteil fügen besteht, ist in diesen Programmen mit der eindeutigen Schrittnummer aus FAPSgraph gekennzeichnet. Die Koordinierungsinstanz prüft auf Basis der bereits im Präprozessor implementierten Optimierungskriterien, welcher Roboter die Sequenz am besten ausführen kann und gibt eine entsprechende

chende Freigabe an den Roboter. Sobald dieser die Sequenz beendet hat, meldet er die Fertigstellung an die Koordinierungsinstanz zurück.

Jedes Mal, wenn eine solche Fertigmeldung am System eintrifft, wird der Optimierungsalgorithmus auf Basis der verbliebenen Schritte erneut durchgeführt. Dies hat den Vorteil, dass bei Zeitverzögerungen im Ablauf dynamisch Montageschritte zwischen den beiden Handhabungsgeräten ausgetauscht werden können, im regulären Betrieb hingegen die bereits in der Kinematiksimulation berechnete und visualisierte Reihenfolge abgefahren wird. Damit die Koordinierungsinstanz hierzu in der Lage ist, wird für jedes Bauteil der entsprechende Montagevorranggraph geladen.

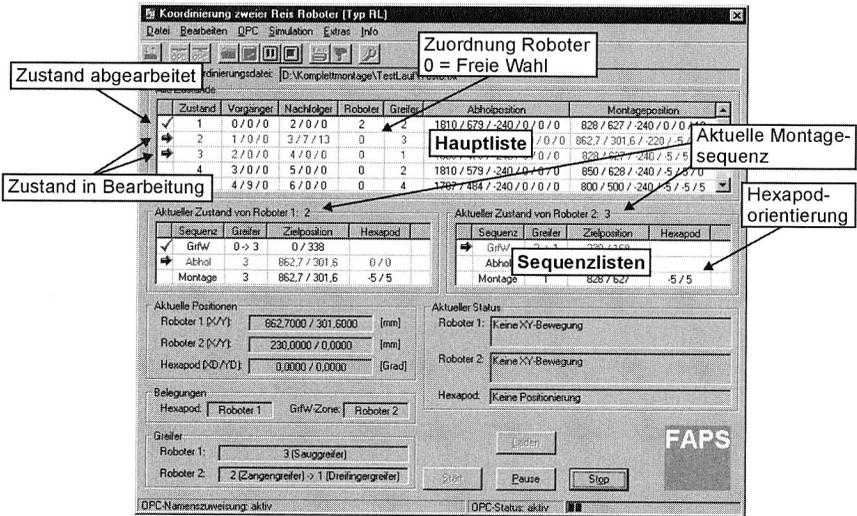


Bild 77: Hauptfenster der Koordinierungsinstanz mit beispielhafter Montageabfolge

Bild 77 zeigt das Hauptfenster der in der Programmiersprache Visual Basic realisierten Applikation. In diesem werden alle für die Überwachung der Ausführung wichtigen Daten und Parameter visualisiert. Die für die Überwachung des Ablaufes wichtigsten Daten sind in drei Listen dargestellt. Die oberste (Haupt-) Liste enthält die mittels FAPS-graph erzeugte Montageaufgabe, sortiert nach der Schrittnummer. Ein grüner Haken in der ersten Spalte kennzeichnet die bereits abgearbeiteten Schritte. Blaue Pfeile markieren hingegen die aktuell in Bearbeitung befindlichen Schritte. Da bei Abarbeitung eines Schritts kein Wechsel zwischen den Linearrobotern erfolgt, befinden sich maximal zwei Schritte gleichzeitig in Bearbeitung.

Als weitere Informationen ist in der Hauptliste neben den Vorgänger- und Nachfolgerschritten, die Nummer des für den jeweiligen Schritt vorgesehenen Roboters dargestellt. Wurde hier von FAPSgraph keine Vorgabe gemacht, wählt die Koordinierungsinstanz

entsprechend den oben genannten Kriterien zur Ausführungszeit den am Besten geeigneten Roboter aus. So ist aus Bild 77 ersichtlich, dass der erste Schritt von Roboter 2 ausgeführt, die Roboter für alle nachfolgenden Montageschritte jedoch vom Anwender nicht vorgegeben wurden. Weiterhin sind die Nummern der jeweiligen Vorgänger und Nachfolger, der notwendigen Greifer sowie die Koordinaten der jeweiligen Abhol- und der Montageposition dar in der Liste dargestellt.

Innerhalb der Koordinierungsinstanz wird jede Montagesequenz in maximal drei Elemente unterteilt. Diese werden getrennt für die beiden Roboter in den beiden Sequenzlisten unterhalb der Hauptliste dargestellt. Das erste, optionale Element ist ein Greiferwechsel. Trägt der Roboter bereits den passenden Greifer, entfällt dieser Schritt. Im Anschluss daran erfolgt die Abholsequenz. Diese besteht aus Gründen der Kollisionsvermeidung zunächst aus einer Bewegung in der x-y-Ebene bis der TCP über dem Greifobjekt steht. Erst im Anschluss daran erfolgt die „z“-Bewegung um das Bauteil zu greifen. Nach dem Anheben folgt die vergleichbar ablaufende Montagesequenz. Mit dem Vorliegen der Freigabe erfolgt gleichzeitig die Positionierung des Hexapoden. Hierbei ist zu beachten, dass der Roboter mit seiner integrierten vierten Achse die z-Rotation übernimmt und der Hexapod die Rotationen um die x- und y-Achse.

Die untere Hälfte der Applikation ist für die Darstellung zusätzlicher Statusinformationen reserviert. Als erste Information sind die aktuellen TCP-Koordinaten der Handhabungsgeräte und des Hexapoden dargestellt. Da kein direkter Zugriff auf die Daten der Lage-regler möglich ist, werden diese erst nach Quittierung der Bewegungselemente einer Montagesequenz automatisch aktualisiert. Darunter befindet sich die Angabe der aktuell verwendeten Greifer beziehungsweise der gerade ablaufenden Greiferwechselsequenz. In dem dargestellten Beispiel wechselt Roboter 2 gerade von Greifer 2 auf Greifer 1 und hat aus diesem Grund die Greiferwechselzone exklusiv reserviert. In der rechten Hälfte kann der Anwender die aktuell gewählten Strategien zur Kollisionsvermeidung ablesen.

Integration der Koordinierungsinstanz in die Steuerungsstruktur

Bevor im folgenden auf die Realisierung koordinierter Bewegungen eingegangen wird, soll als Einführung eine kurze Übersicht über die realisierte Steuerungsstruktur der Komplettmontagezelle gegeben werden. In Bild 78 ist die hybride Aufteilung in den zentralen „Koordinierungsrechner“ und den beiden dezentralen Robotersteuerungen aus softwaretechnischer Sicht erkennbar. Darüber hinaus ist die Anbindung der Hexapodsteuerung sowie der Identsysteme über die OPC-Schnittstelle mit der PC-basierten Steuerung. Die grau hinterlegten Bereiche deuten die standardisierten Schnittstellen an, die einen beliebigen Austausch der Middleware, also in diesem Fall der PC-basierten Steuerung, der Hexapodansteuerung (vgl. Kapitel 5.2.1) sowie des Identsystems (Kapitel 5.3) erlauben .

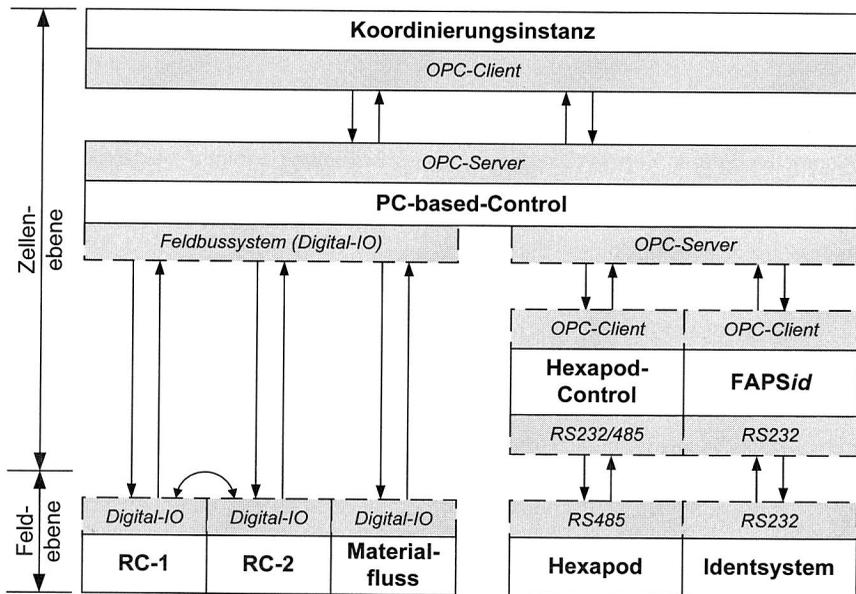


Bild 78: Übersicht über die hierarchische Steuerungsstruktur der Komplettmontagezelle mit den realisierten Komponenten und zugeordneten Protokollen

Die Koordinierungsinstanz stellt die oberste Hierarchieebene dar, die über eine integrierte OPC-Schnittstelle mit der unterlagerten PC-basierte Steuerungen kommuniziert. Diese Zwischenschicht dient zum einen dem binären Datenaustausch mit der Feldebene, zum anderen aber auch der Anbindung der Hexapodsteuerung und des Identsystems.

Die rein binäre Kommunikation zu den Feldgeräten ist auch mit speziellen Schnittstellenkarten realisierbar, diese unterstützen allerdings keine SPS-Funktionalität, wie sie im vorliegenden Fall für die Ansteuerung des Materialflusses benötigt wird. Die geschaffene Architektur mit der integrierten SPS löst zum einen diese Problematik elegant, zum anderen konnte eine maximale Flexibilität in Hinblick auf das verwendete Feldbussystem erreicht werden. Die Soft-SPS dient quasi als Middleware und kapselt den unterlagerten Feldbus vor der Koordinierungsinstanz. Ohne Anpassungen an der Software ist durch diese Konfiguration ein Wechsel auf einen anderen Feldbus wie Interbus-S oder sogar auf eine andere PC-basierte Steuerung möglich. Zur Realisierung der herstellerunabhängigen Kommunikation mit den beiden Linearrobotern werden lediglich digitale Signale als kleinster gemeinsamer Nenner aller Steuerungen verwendet. Durch den Verzicht auf eine High-Level-Kommunikation beispielsweise über Ethernet oder sogar als ActiveX-Komponente wie sie beispielsweise von Adept Technologies angeboten

wird, ist ein transparenter Austausch der verwendeten Roboter jederzeit gewährleistet, ohne dass Einschränkungen in der Funktionalität entstehen würden.

Realisierung koordinierter Bewegungen

Entsprechend der in Kapitel 6 vorgenommenen Bewertung erfolgt die eigentliche Realisierung der koordinierten Bewegungen mittels der *näherungsweise Zellzerlegung*. Hierfür wurde der Arbeitsraum der Handhabungsgeräte zunächst in die beiden Bereiche:

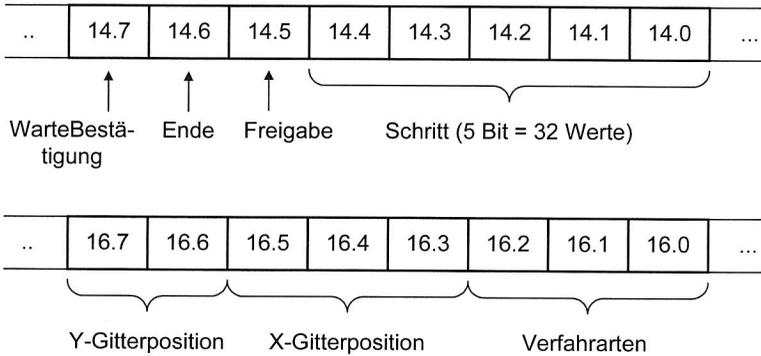
- Greiferbereitstellung,
- Allgemeiner Arbeitsbereich und
- Werkstückbereitstellung unterteilt.

Unter der sicherlich sinnvollen Annahme, dass ein Roboter, der einen Greifer ablegt auch gleichzeitig wieder einen Greifer aufnehmen wird, erfolgt eine exklusive Reservierung dieses Bereichs. Anders im allgemeinen Arbeitsbereich: Dieser wurde entsprechend obiger Methode in flächengleiche Rechtecke unterteilt, deren Anzahl lediglich durch die Anzahl der zur Verfügung stehenden digitalen Eingänge beschränkt ist. Je mehr Eingänge die Roboter besitzen, desto kleinere Zellen lassen sich darstellen.

Die verwendeten Steuerungen stellen zur Kommunikation jeweils 16 digitale Eingänge (Bytes 14 und 16) und die gleiche Anzahl an Ausgängen (ebenfalls Bytes 14 und 16) zur Verfügung. Diese wurde nach dem in Bild 79 dargestellten Schema für die Kommunikation und Bewegungssteuerung aufgeteilt. Da die Koordinierungsinstanz nur über diese Schnittstelle mit den eigentlichen Steuerungen kommunizieren kann, werden die Nachrichten binär auf die digitalen Ein- und Ausgänge abgebildet. Zur Kodierung des auszuführenden Montageschrittes sind insgesamt 5 Bit (= 32) reserviert. Dies stellt gleichzeitig die Begrenzung an abbildbaren Montageschritten dar. Zur Vermeidung inkonsistenter Zustände erfolgt nach Übermittlung der Schrittnummer dessen separate Freigabe über das Bit 14.5 (Bild 79).

Die Realisierung koordinierter Bewegungen erfordert jedoch zusätzliche Vorkehrungen. Wie bereits erwähnt, erhalten beide Roboter zwar die identischen Programme, in diesen sind aber lediglich die eigentlichen Zielkoordinaten, nicht die zugeordnete Bewegungsbahn, da diese zum Zeitpunkt der Erstellung noch nicht festgelegt werden kann.

Robotereingänge



Roboterausgänge

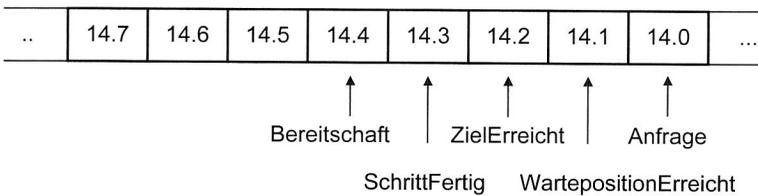


Bild 79: Codierung der digitalen Ein- und Ausgänge an der realen Robotersteuerung

Vor der Bewegungsfreigabe muss deshalb zunächst eine kollisionsfreie Bahn berechnet werden. Aus Sicherheitsgründen und zur Reduzierung der geometrischen Komplexität sind die Roboter von einem rechteckigen, in seinen Abmessungen frei wählbaren, Schutzabstand umgeben. Dieser so genannte Konfigurationsraum erleichtert die Bahnplanung durch die vereinfachte Geometrie erheblich. Für die eigentliche Bahn stehen mehrere vordefinierte Prototypen zur Verfügung, die in einer festen Reihenfolge untersucht werden:

1. Zielposition frei

Mit Hilfe dieser Funktion erfolgt ein erster Test, ob der Zielpunkt erreichbar, oder vom anderen Roboter blockiert ist. Sollte dies der Fall sein, prüft die Koordinierungsinstanz ob alternative Montageschritte zur Verfügung stehen. Fällt diese Prüfung negativ aus, wartet der Roboter bis eine Freigabe möglich ist. Zur Vermeidung einer Dead-Lock-Situation kann er in dieser Zeit dem anderen Roboter dynamisch ausweichen.

2. Lineare Bewegung

Für den Fall, dass der Zielpunkt nicht durch den Konfigurationsraum des anderen Roboters blockiert ist, prüft die Koordinierungsinstanz zunächst, ob eine lineare Bewegung möglich ist. Entsprechend Bild 80 wird hierfür die Fläche berechnet, die der Konfigurationsraum des Roboters bei der geplanten Bewegung überstreichen würde. Liegt der TCP des zweiten Roboters innerhalb dieser Fläche, würde es zu einer Kollision kommen.

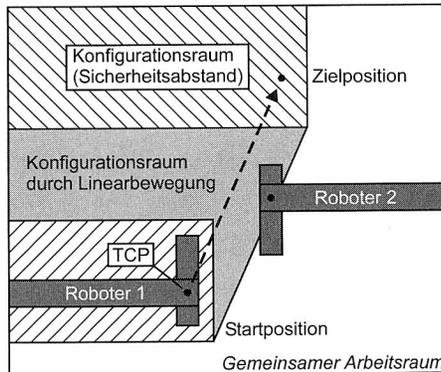


Bild 80: Kollisionserkennung durch Schneiden des TCPs von Roboter 2 mit dem virtuellen Konfigurationsraum von Roboter 1

3. U-förmige Bewegung ohne Synchronisation

Eine alternative Bewegungsart stellt das U-förmige Umfahren eines Roboters dar. Hierzu wird in einem ersten Schritt mit der zweiten Achse ein zuvor definierter y-Wert (Y-Home) angefahren, im Anschluss daran positioniert sich der Roboter auf den X-Zielwert und fährt abschließend mit der zweiten Achse auf den Y-Zielwert. Die bei dieser Verfahrenart zurückgelegte Wegstrecke ist zwar länger als bei einer linearen Bewegung, bietet aber den Vorteil, dass der Roboter bei einer wie in Bild 80 dargestellten Situation keine Zwangspause einlegen muss.

4. U-förmige Bewegung mit Synchronisation

Für den Fall, dass beide Roboter sich gegenseitig blockieren sollten, wurde die vierte Verfahrenart entworfen. Die Koordinierungsinstanz erteilt bei dieser lediglich die generelle Bewegungsfreigabe für beide Roboter, verzichtet aber auf eine direkte Koordinierung. Sobald beide Roboter bereit sind, fahren sie zunächst auf ihren jeweilige Y-Home-Position und melden deren Erreichen über einen digitalen Ausgang direkt dem Partner. Nach erfolgter Synchronisation bewegen sie sich analog zu Verfahrenart 3 zunächst auf die X-Ziel-Koordinate und im Anschluss auf die Y-Ziel-Koordinate. Von den Bewegungsausführung erscheint es wie die beschriebene U-förmige Bewegung in doppelter

Ausführung. Durch den Verzicht auf eine Kommunikation mit der überlagerten Koordinierungsinstanz reduziert sich jedoch die Latenzzeit und die Bewegungen werden schneller ausgeführt.

5. Roboter auf Y-Warteposition

Für den Fall, dass ein Roboter keinen Auftrag übernehmen kann, den anderen Roboter jedoch durch seine aktuelle Position blockiert (Dead-Lock), wird dieser über eine reservierte Schrittnummer veranlasst sich auf seine Y-Home-Position zurückzuziehen. Im Anschluss erfolgt eine erneute Überprüfung auf mögliche Bewegungen.

6. Roboter auf X-Warteposition

Sollte auch diese Bewegung das Dead-Lock nicht auflösen können, besitzt jeder Roboter zusätzlich zwei X-Home-Positionen, die sich an den jeweiligen Enden des allgemeinen Arbeitsbereiches befinden. Wie schon bei Möglichkeit 5 erteilt auch in diesem Fall die Koordinierungsinstanz einen speziellen Fahrauftrag, der vom Roboter nach Erreichen der gewünschten Position quittiert wird. Ohne diese Rückmeldungen ist die Koordination nicht möglich, da die Koordinierungsinstanz aus den schon genannten Gründen keinen Zugriff auf die aktuellen Achswerte hat.

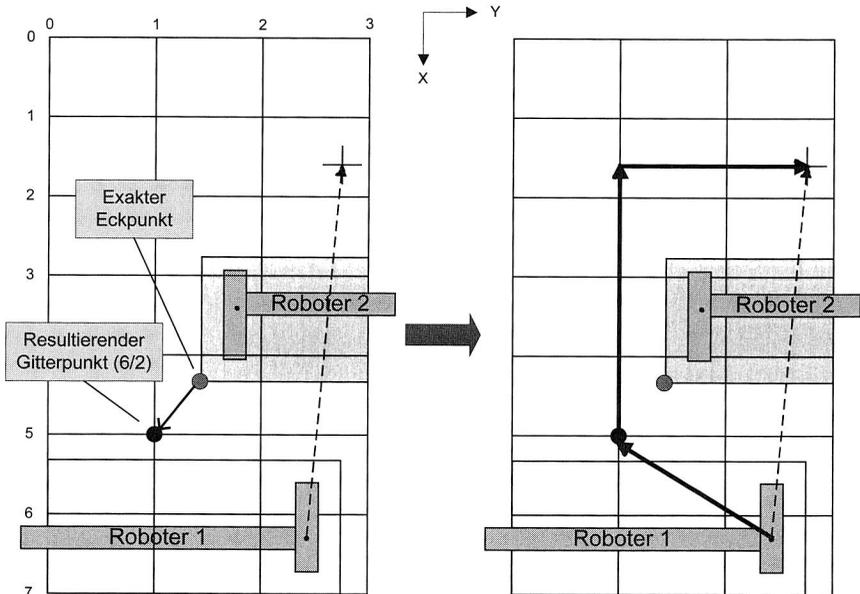


Bild 81: Kollisionsfreie Bahnplanung durch Verwendung der näherungsweise Zellzerlegung

Da die geschilderten U-förmigen Bewegungen nicht zeit-optimal sind, wird basierend auf der Methode der näherungsweise Zellzerlegung eine Bahnoptimierung durchgeführt. Hierbei fährt der gewählte Roboter nicht direkt auf seine Y-Home-Position, sondern die Koordinierungsinstanz versucht eine bessere Bahn zu berechnen. Ausgehend vom äußersten Rand des Schutzabstandes des zu umfahrenden Roboters ermittelt der Algorithmus den Knoten, der die direkteste Verfahrbewegung erlaubt (Bild 81).

Diese Information wird der Robotersteuerung vor der Bewegungsausführung über die Eingänge 16.3 bis 16.7 mitgeteilt. Hier sieht man auch ganz deutlich die Vorteile der näherungsweise im Vergleich zur exakten Zellzerlegung. Da die Größe der Zellen der Robotersteuerung bereits im Vorfeld bekannt sind, reicht die Übertragung der Knotennummer aus. Binär codiert erfordert das 5 Bit im Vergleich zum Vielfachen, was die Übertragung der exakten Position im Weltkoordinatensystem erfordern würde.

Online-Visualisierung und -Überwachung

Zur besseren Überwachung der Montage ist eine einfache, maßstäbliche Visualisierung der Anlage in einer Draufsicht möglich (Bild 82). Als statische Komponenten sind die Zuführbänder, die Greiferwechselzone, der Montageraum und insbesondere die Zellen der für die Koordinierung verwendeten Zellzerlegung abgebildet. Darüber hinaus sind die für jeden Roboter individuell zu konfigurierende Schutzabstände sowie die geplante Bewegungsbahn dargestellt.

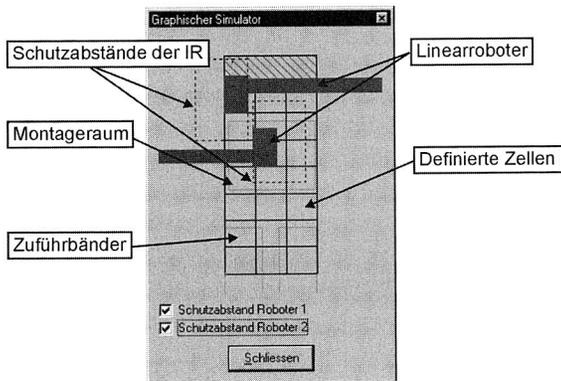


Bild 82: Visualisierung der Bewegungen der Roboter mit ihren zugeordneten Kollisionsräumen und den resultierenden Zellen durch Anwendung der näherungsweise Zellzerlegung

Konzeptbedingt ist eine Echtzeitvisualisierung der Bewegungen nicht möglich, da die Koordinierungsinstanz keinen direkten Zugriff auf die Lagereger der Roboter hat. Sie kennt lediglich den aktuellen Startpunkt, die zurückzulegende Bahn und den Endpunkt. Wie schnell die Bewegung vom Roboter durchgeführt wird, entzieht sich ihrer Kenntnis.

Eine Aktualisierung des Zellenabbildes erfolgt somit immer erst nach einer Rückmeldung der Roboter, da immer nach Abschluss einer Teilbewegung ihren aktuellen Status an die Koordinierungsinstanz melden, sind die Bewegungen trotzdem gut nachvollziehbar.

Eine weitere Ergänzung der Koordinierungsinstanz ist das in Bild 83 abgebildete Dialogfenster zur Anzeige der wichtigsten digitalen Ein- und Ausgänge der Roboter und des Hexapoden. Mit dessen Hilfe hat der Planer jederzeit einen genauen Überblick über das System die zugewiesenen Verfahrraten und Zellenbelegungen.

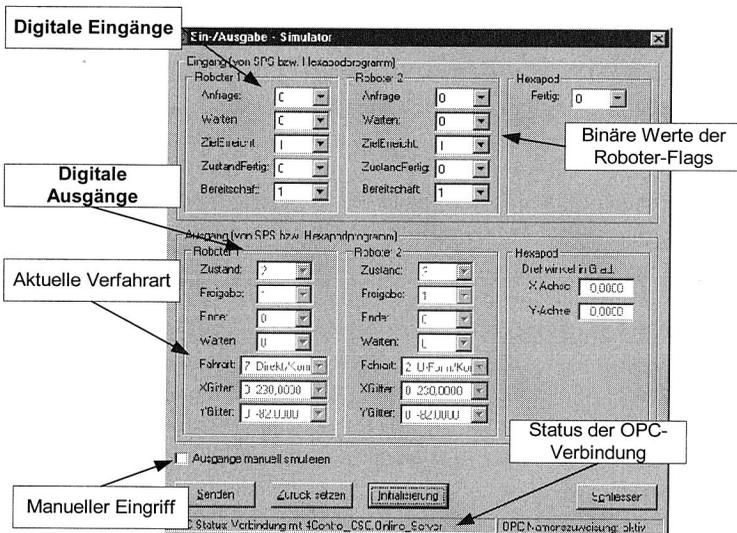


Bild 83: Anzeige und Manipulation der wichtigsten digitalen Ein- und Ausgänge und weiterer Statuswerte mittels des integrierten IO-Simulators

Im oberen Drittel des Fensters sind die wichtigsten Flags, getrennt für beide Roboter dargestellt. Durch das Publisher-Subscriber-Modell, das OPC anbietet, erfolgt die Aktualisierung der Werte automatisch mit einer nur geringen Latenzzeit nach dem Eingang des Signals bei der PC-basierten Steuerung. In der unteren Hälfte des Fensters sind die wichtigsten Ausgänge der SPS abgebildet. Neben der Nummer des aktuellen Schrittes und verschiedener für die Koordinierung benötigter Flags ist insbesondere die aktuelle Verfahrrat von Interesse.

Im Normalbetrieb sind die Felder zur Vermeidung versehentlicher Manipulationen gesperrt. Es besteht jedoch die Möglichkeit, durch Aktivieren der Checkbox „Ausgänge manuell simulieren“ manuell Ausgänge in der SPS zu setzen. Diese werden entsprechend Bild 78 und Bild 79 direkt an die Steuerungen übertragen und erzwingen beispielsweise eine alternative Verfahrrat. Bei diesem Vorgehen ist allerdings unbedingt zu

beachten, dass, wie bereits beschrieben, manche Verfahrenarten auf die Koordinierungsinstanz angewiesen sind. Wie bei jedem direkten Systemeingriff kann es auch in diesem Fall zu nicht vorhersehbaren Konstellationen kommen, die auch zu einer Kollision der beiden Roboter führen können.

6.6 Zusammenfassung

Die Planung, Ausführung und Überwachung kooperierender Bewegungen mit konventionellen Industrierobotern ist ein nur unbefriedigend gelöstes Problem. Bislang durchgeführte Arbeiten umgingen diese komplexe Aufgabe in der Regel durch die Entwicklung eigener, proprietärer Steuerungen bzw. der Erweiterung der bestehenden Systeme. Diese Ansätze sind jedoch für eine industrielle Umsetzung völlig ungeeignet, da die Adaption auf eine andere Steuerungsgeneration oder einen anderen Steuerungshersteller praktisch einer Neuentwicklung gleichkommt. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit ein integriertes, vierstufiges Steuerungskonzept realisiert, das eine optimale Abarbeitung der Montageaufgabe verbunden mit einer dynamischen Bahnplanung realisiert, ohne dass Eingriffe an den Steuerungen notwendig wären.

Die erste Stufe stellt die Planung der Montageaufgabe dar. Hierfür wurde eine spezielle Applikation entwickelt, die mittels eines erweiterten Montagevorranggraphen eine implizite Programmierung des gesamten Montageablaufs ermöglicht. Die Aufgabe der Planners beschränkt sich dabei auf die graphische Eingabe der Montagereihenfolge sowie der entsprechenden Abhol- und Montagekoordinaten. Ein nachgeschalteter Präprozessor berechnet daraus die optimale Montagereihenfolge und deren Aufteilung auf die unabhängigen Linearroboter. Über eine integrierte Schnittstelle zu einem kommerziellen Simulationsprogramm kann der Ablauf überprüft und gegebenenfalls optimiert werden. Der bis zu diesem Zeitpunkt maschinenneutrale Code wird im nächsten Schritt mit Hilfe eines Postprozessors in die Maschinensprache der angeschlossenen Roboter übersetzt und an die Steuerungen übertragen.

Die eigentliche Überwachung der koordinierten Bewegungen erfolgt mittels einer hybriden Steuerungsstruktur. Eine so genannte Koordinierungsinstanz ermittelt unter Berücksichtigung der aktuellen Systemzustände laufend die optimale Montagereihenfolge und erteilt die entsprechenden Freigaben über die digitalen Roboterein- und -ausgänge. Die eigentlichen Bewegungsbahnen werden unter Nutzung der näherungsweise Zellzerlegung dynamisch optimiert und über den gleichen Mechanismus übertragen. Durch Verwendung der digitalen Ein- und Ausgänge als kleinsten gemeinsamen Nenner aller Steuerungen ist eine leichte Übertragbarkeit des Steuerungskonzeptes auf beliebige Hersteller gewährleistet.

7 Darstellung des Einsatzkonzeptes anhand des Modellproduktes

Die Komplettmontagezelle ist als eine hochflexible Zelle für die Montage flächiger und flächenhafter Bauteile konzipiert und entwickelt. In diesem Kapitel wird die Funktionsfähigkeit der einzelnen Systemkomponenten durch die prototypische Montage des schon eingeführten Modellproduktes nachgewiesen.

Bild 84 zeigt die im Rahmen der Arbeit realisierte Umsetzung des Konzepts der Komplettmontage für die Montage von Türmodulen. Über die beiden Doppelgurtbänder im Vordergrund der Abbildung ist die Ver- und Entsorgung des Montagebereichs mit den vorkommissionierten Komponenten möglich. Die Zuführung des flächigen Basisteils erfolgt separat unterhalb der ersten Hauptachse von Roboter 1. Im Hintergrund ist die gemeinsame Greiferbereitstellung erkennbar.

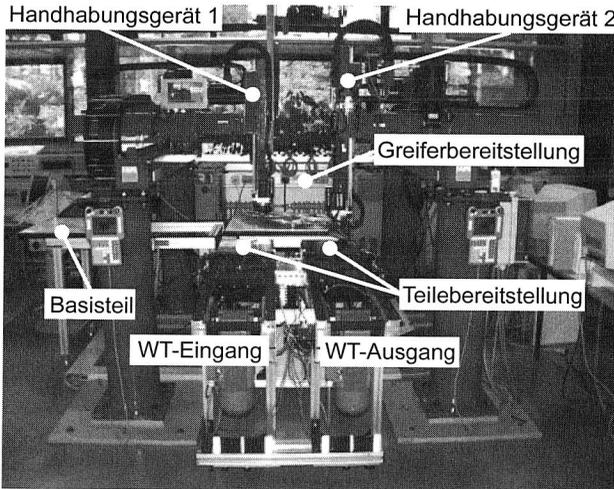


Bild 84: Realisierte Zelle zur Komplettmontage flächiger Bauteile

Aufgrund der vielfältigen Anforderungen innerhalb der Montagetechnik, ist eine spezielle Anpassung einer jeden Zelle auf die konkrete Montageaufgabe unerlässlich. Je nach Flexibilität der Zelle und ihrer Peripherie ist lediglich der Umrüstaufwand unterschiedlich hoch. Bei hochspezialisierten Zellen, die eine hohe Stückzahl von identischen Bauteilen produzieren, ist die Umrüstflexibilität nicht so bedeutend wie bei Zellen, die einen häufig sich wechselnden Variantenmix produzieren.

7.1 Definition der Montageaufgabe und Anpassung der Zellenperipherie

Die Gestaltung des Türmoduls und der damit verbundenen Montagevorgänge ist durch die bisherige, manuelle Montage geprägt. Aus diesem Grund ist eine vollständige automatisierte Montage nicht möglich. Es reichen jedoch wenige konstruktive Maßnahmen aus, um die Automatisierungsgerechtigkeit herzustellen. Im wesentlichen betrifft dies das Türöffnungsgestänge, das durch eine Bohrung geführt und im Anschluss mit einer Gummitülle abgedichtet werden muss. Da auf solche Modifikationen verzichtet werden sollte, beschränkt sich die Montage auf die folgenden Bauteile:

- Manueller Fensterheber, bestehend aus drei Teilen,
- Lautsprecher,
- Umlenkhebel,
- Sechs verschiedene Klipse für die spätere Befestigung des Kabelbaums

Zum Fügen dieser Komponenten wurden insgesamt fünf verschiedene Greifer aufgebaut, auf die beide Roboter Zugriff haben. Neben einen Sauggreifer für das Heben des Basisteils finden drei mechanische und ein so genannter „Prozess-Greifer“ Verwendung. Letzterer dient der Simulation beliebiger Fügeprozesse wie z.B. Schrauben, Nieten, etc.

Nr.	Wirkprinzip	Aufgabe
1	Mechanisch, 3-Finger-Greifer	Handhabung von konischen Objekten (Lautsprecher)
2	Mechanisch, Zangengreifer	Greifen und Fügen der Klipse
3	Pneumatisch	Handhabung des Basisteils
4	Mechanisch, Parallelgreifer	Greifen von konischen Bauteilen (Welle Fensterheber, Wellenführung, Deckel, Umlenkhebel)
5	„Prozess-Greifer“	Simulation von Fügeprozessen wie Schrauben, Nieten oder Dichtstoffauftrag

Tabelle 8: Zuordnung der Montageaufgaben zu den konzipierten Greifern

7.2 Planung der Montagesequenz

Die eigentliche Montageablaufplanung erfolgte mit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Software *FAPSgraph* (Bild 85). Dabei wurde der Ablauf in zwei verschiedenen

Varianten modelliert. In der ersten Variante fand keine Vorauswahl der Roboter statt, so dass der gesamte Ablauf von den Optimierungsalgorithmen der Koordinierungsinstanz berücksichtigt wurde. In der zweiten Fassung wurde der identische Ablauf komplett einem Roboter zugewiesen, um die Taktzeitunterschiede zwischen einem und zwei Robotern zu bestimmen.

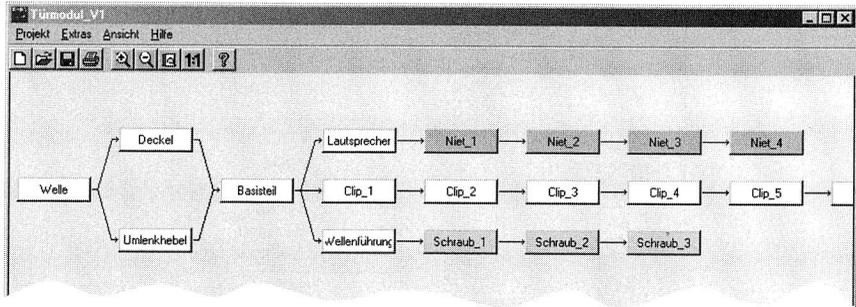


Bild 85: Modellierter Montagevorranggraph für die Montage des Türmoduls

Hervorzuheben ist der Aufbau des Fensterhebermechanismus, der eigentlich eine Zugänglichkeit von zwei Seiten erfordert. Dieses Problem konnte durch ein spezielles Formnest gelöst werden, das sich auf dem WT des Basisteils befindet. In diesem erfolgt zunächst der „rückwärtige“ Aufbau von Welle und Deckel. Im Anschluss wird das flächige Basisteil angehoben und über das Formnest positioniert. Die Welle wird dabei durch eine Bohrung im Blech geführt. Nun kann der Mechanismus durch eine Wellenführung von oben komplettiert werden. Parallel dazu erfolgt zum einen das Fügen und Vernieten des Lautsprechers, zum anderen dem Setzen von insgesamt sechs Clipsen, die für die Fixierung des später einzubringenden Kabelbaums benötigt werden.

Zusammen mit den Verbindungstechnologien sind insgesamt 19 Montageschritte von den Robotern durchzuführen.

7.3 Autonome Bahnplanung zur Ausführungszeit

Bild 86 zeigt einen Ausschnitt aus der Montagesequenz der ersten Variante. Es ist deutlich zu sehen, dass zunächst der gesamte erste Montageschritt mit seinen Sequenzen Greiferwechsel, Bauteil holen und Bauteil fügen durchgeführt wird. Zu dem Zeitpunkt, wo dieser Roboter das Bauteil gegriffen hat, reserviert Roboter 1 die Greiferwechselzone und holt den benötigten Greifer für Montageschritt 2. Da die Montageschritte 1 und 3 die gleichen Greifer benötigten, übernimmt Roboter 2 auch diesen Montageschritt. Erst im Anschluss kann Roboter 1 den Umlenkhebel einsetzen. Danach wechselt der Roboter den Greifer und hebt das Basisteil über den vormontierten Fensterhebermechanismus (Schritt 4). Roboter 2 hat in dieser Zeit mit dem alten Greifer be-

reits die Wellenführung gegriffen und wartet über der Aufnahmeposition auf die Freigabe des Arbeitsbereiches.

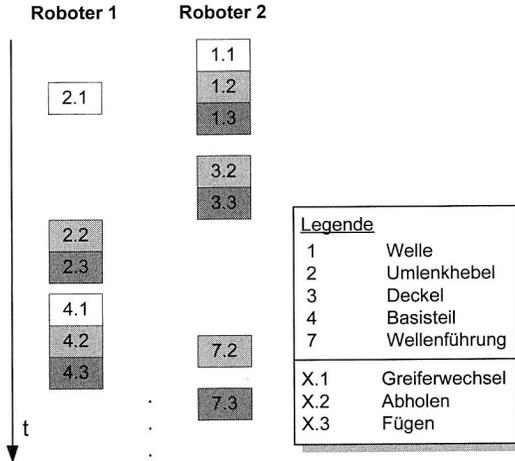


Bild 86: Auszug aus der Montagesequenz der Variante 1 mit freier Optimierung

In dem kurzen Beispiel ist die Aufteilung der Montagesequenzen und die Auswirkung der verschiedenen Optimierungskriterien gut zu sehen. Roboter 2 beginnt die Montagesequenz, da der Fügepunkt in der rechten Hälfte des Arbeitsraumes liegt (Kriterium 3: Reduzierung des Raumbedarfs). Schritt 4 wird dem ersten Roboter zugewiesen, da ein Greiferwechsel auf jeden Fall notwendig ist, unmittelbar danach jedoch ein Schritt kommt, der einen bereits aktiven Greifer benötigt (Kriterium 2: Minimierung der Greiferwechsel).

Ein gutes Beispiel für den Einsatz des Hexapoden zur Bauteilorientierung ist abschließen in Bild 87 dargestellt, bei dem ein Befestigungsklips in eine geneigte Ebene eingebracht werden muss. Der Roboter führt seine konventionelle Z-Bewegung aus, nachdem das Bauteil korrekt ausgerichtet wurde. Die integrierten Korrekturalgorithmen des Präprozessors berechnen den dabei entstehenden Bauteilversatz und korrigieren automatisch die Absetzposition.

Die Zuweisung des Roboters 1 für diesen Montageschritt geht auf die Optimierungsregel 3 zurück, die die Belegung des Arbeitsraumes berücksichtigt. Hätte Roboter 2 diesen Fügevorgang übernommen, so wäre durch seine zweite Achse fast die gesamte Breite blockiert. In der in Bild 87 abgebildeten Situation kann sich der andere Roboter ohne Probleme gleichzeitig im Arbeitsraum aufhalten.

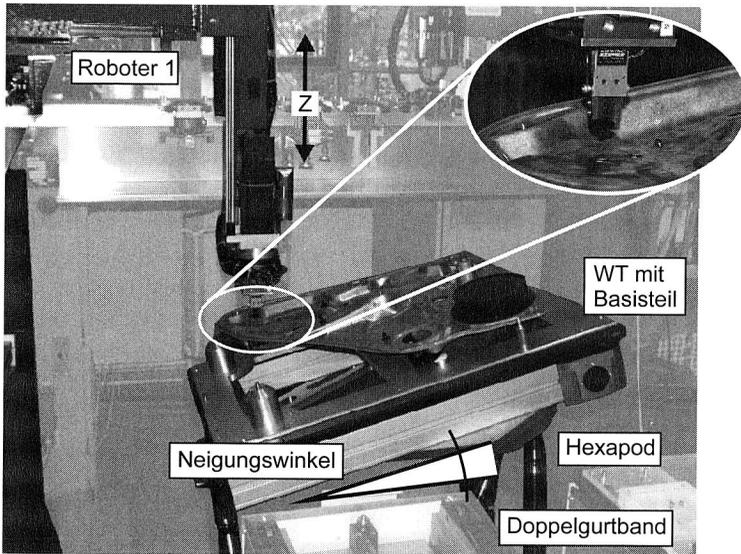


Bild 87: Fügen eines Klipses auf einer Schrägen durch Neigung des Hexapoden

Ein Vergleich der resultierenden Taktzeiten zwischen den beiden Varianten ergab eine Zeiteinsparung von mehr als 25% für die kooperierende Montage im Vergleich zur Ein-Roboter-Lösung. Dabei wurden von den insgesamt 19 Montageschritten 10 von Roboter 1 durchgeführt. Er musste dafür insgesamt drei Greiferwechsel durchführen. Die restlichen neun Schritte erfolgten mit ebenfalls drei Greiferwechsel durch Roboter 2.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Montage als letzte Stufe im Fertigungsprozess ist seit mehreren Jahren dramatischen Veränderungen unterworfen. Nicht nur die schon oft zitierten Verkürzungen in der Produktlebenszeit und die steigende Variantenvielfalt, sondern auch Veränderungen an den Produkten selbst, erfordern neue Ansätze in der Montagetechnik. So verschiebt der Trend zur Modulbauweise die Montageaufgaben und somit auch die Wertschöpfungsprozesse in vorgelagerte Bereiche.

Insbesondere flächige Teile, wie sie unter anderem in der Automobil-, aber auch in der Luftfahrtindustrie vorkommen, stellen aufgrund ihrer Dimensionen und Variantenvielfalt hohe Ansprüche an die Montagesysteme. Bisherige Konzepte lösen diese Herausforderungen entweder durch eine manuelle Montage oder durch starre Automatisierungslösungen.

Ziel der Arbeit war deshalb die Entwicklung eines automatisierten Montagesystems für die Montage variantenreicher flächiger Bauteile. Neben den technologischen Randbedingungen war insbesondere die Schaffung einer flexiblen, herstellerneutralen Steuerungsarchitektur von besonderer Bedeutung für die erfolgreiche Umsetzung des Konzeptes.

In einem ersten Schritt erfolgte die Analyse der aktuellen Anforderungen an Montagesysteme. Es konnte gezeigt werden, dass durch die Verkürzung der Produktlebenszyklen die Mengen-, Varianten- und Nachfolgeflexibilität die wichtigsten Kriterien für die Beurteilung moderner Montagesysteme darstellen. Im weiteren Verlauf wurden verschiedene Technologietreiber in der Montagetechnik identifiziert. Hierzu gehören, neben den mittlerweile gebräuchlichen Feldbussystemen, insbesondere leistungsfähige und offene Steuerungssysteme auf PC-Basis in Verbindung mit geeigneten Kommunikationsstrukturen. OPC besitzt hier durch die breite Unterstützung sowohl von Seiten der Hersteller als auch der Anwender einen hohen Stellenwert. Weitere Technologietreiber stellen innovative Materialverbunde auf Basis von Kunststoff-Metall-Verbindungen sowie Metallschäume dar, die eine angepasste Entwicklung hochintegrierter Bauteile erlauben.

Im Anschluss an diese allgemeinen Betrachtungen erfolgte eine Analyse und Klassifikation verschiedener Aufbauformen und realisierter Montagekonzepte für flächige Teile. Anhand verschiedener Montageaufgaben konnte gezeigt werden, dass die verhältnismäßig großen Bauteilabmaße zu Problemen bei der automatisierten Montage führen und es nur wenige Lösungen in diesem Bereich gibt. In der Regel dominieren manuelle Tätigkeiten. Um den gestiegenen Qualitätsansprüchen in der Montage Rechnung zu tragen, wurde mit der Komplettmontage ein innovatives Montagekonzept entwickelt, das auf den Verzicht von Zwischentransporten basiert und das Produkt in einer einzigen Zelle montiert. Durch die damit verbundene Steigerung der Arbeitsinhalte ergeben sich

hohe Taktzeiten, die sich jedoch durch den Einsatz kooperierender Handhabungsgeräte signifikant reduzieren lassen.

Basierend auf diesen theoretischen Überlegungen erfolgte in einem nächsten Schritt die Bestimmung der bestgeeigneten, produktneutralen Systemlösung. Die Problematik der Bauteilzuführung und -vereinzelung konnte durch ein zweistufiges Logistikkonzept mit einer vorgelagerten, auftragsspezifischen Vorkommissionierung von A- und B-Teilen sowie der zelleninternen Vereinzelung von C-Teilen gelöst werden. Ein Vergleich verschiedener Roboterkinematiken ergab, dass sich insbesondere Linearroboter durch ihre kubischen Arbeitsräume und nahezu beliebigen Achslängen für die vorliegende Montageaufgabe eignen. Die Beschränkung dieser Bauform auf lediglich vier Freiheitsgrade ist jedoch für komplexe Montageaufgaben nicht hinreichend. Eine systematische Betrachtung von Lösungsalternativen zeigte, dass eine Aufspaltung der kinematischen Kette in einen Manipulator für das Basisteil in Verbindung mit den Linearrobotern für die eigentlichen Füge- und Montageprozesse viele Vorteile bietet.

Zur Verifizierung des Systemkonzeptes der Komplettmontage wurde ein entsprechendes System für die Montage variantenreicher Türmodule prototypisch realisiert. Entsprechend der Vorgaben besteht es aus einer externen Vorkommissionierung sowie der eigentlichen Montagezelle, in der neben zwei Linearrobotern ein eigens entwickelter Hexapod die Manipulation des Basisteils übernimmt.

Eine der wesentlichen Herausforderungen der Arbeit bestand in die Realisierung eines flexiblen, herstellernerutralen Steuerungskonzeptes, das eine einfache Programmierung der kooperierenden Systeme erlaubt. Hierfür wurde eine vierstufige Architektur erarbeitet, welche diese komplexe Problemstellung nahezu vollständig vor dem Anwender verbirgt. Dessen einzige Aufgabe beschränkt sich auf die graphische Eingabe der abstrakten Montagereihenfolge, der entsprechenden Abhol- und Montagekoordinaten sowie des zugeordneten Greifers. Basierend auf den Daten dieses Montagevorranggraphen ermittelt ein Präprozessor automatisch die optimale Verteilung der einzelnen Schritte auf die beiden Linearroboter. Der erzeugte Metacode dient zum einen der Visualisierung der Montagesequenz in einer kommerziellen Kinematiksimulation, zum anderen generiert ein nachgeschalteter Postprozessor daraus die steuerungsspezifischen Roboterprogramme.

Die Besonderheit des realisierten Steuerungskonzeptes zeigt sich bei der eigentlichen Montage. Zur Vermeidung von Taktzeitverlusten durch eventuelle Störungen oder ungenaue Planungsdaten erfolgt parallel zur Ausführungszeit kontinuierlich eine Montageablaufplanung. Montageschritte werden deshalb immer von dem Roboter ausgeführt, der aktuell am geeignetsten hierfür ist. Im Gegensatz zu den meisten Forschungsansätzen erfolgt die dynamische Bahnplanung und Koordination in der Komplettmontagezelle ohne Erweiterungen oder Modifikationen an den verwendeten Robotersteuerungen, da dies im Produktionsumfeld aus Kosten- und Sicherheitsgründen nicht akzeptabel ist. Die beschriebene Lösung basiert auf einer hybriden, PC-basierten Architektur, an deren

Spitze eine so genannte Koordinierungsinstanz steht. Diese kommuniziert mit den unterlagerten Schichten über OPC und Feldbussysteme.

Zusammen mit weiteren Entwicklungen, wie der eines flexiblen Greifers, wurde mit der Komplettmontage ein innovatives Montagesystem für eine flexible Montage variantenreicher flächiger Teile entwickelt. Das zugeordnete Steuerungskonzept erlaubt die Erzeugung effizienter Roboterprogramme ohne manuelle Eingriffe und ist dabei unabhängig von speziellen Herstellern, so dass eine Adaption an andere Robotersteuerungen lediglich die Anpassung eines einfachen Postprozessors erfordert.

Zur weiteren Verbesserung der Komplettmontage bieten sich drei verschiedene Optimierungsrichtungen an. Eine liegt in der Erhöhung der Planungssicherheit durch die Anbindung der Montageablaufplanung an ein bereichsübergreifendes PDM-System. Die dort vorhandene Wissensbasis könnte der Planer effizient bei der Auswahl des bestgeeignetsten Greifers und der optimalen Prozessparameter unterstützen. Hierfür gibt es bereits verschiedene Forschungsansätze, die allerdings nicht das komplette Produktdatenmodell betrachten [146]. Weitere Arbeitspunkte betreffen die Integration optimierter Algorithmen für die Montageablauf- und Bahnplanung. Durch deren Einsatz sind eventuell weitere Verkürzungen in den Taktzeiten zu erreichen. Es ist allerdings darauf zu achten, dass die bestehende Herstellerunabhängigkeit erhalten bleibt.

Literaturverzeichnis

- [1] Westkämper, E.: Modulare Produkte - Modulare Montage. In: wt - Werkstattstechnik online, 91 (2001) H. 8, S. 479-482
- [2] Reinhart, G.: Montagesysteme. In: wt - Werkstattstechnik online, 91 (2001) H. 8, S. 472
- [3] VDA, Verband der Automobilindustrie: Jahresbericht 2001. Verfügbar über: www.vda.de/de/service/jahresbericht/auto2001/vorwort/v_5.html, Stand 06/2002
- [4] Wollnack, J.; Rall, K.; Quellmalz, W.: Flexibilisierte, automatisierte Großbauteilmontage. In: wt Werkstattstechnik online, 91 (2001) H. 12, S. 785-791
- [5] Lay, G.; Schirmeister, E.: Sackgasse Hochautomatisierung?. Fraunhofer-ISI, Karlsruhe, Nr. 22, Mai 2001
- [6] Scharf, U.: Automatisierung bleibt industrieller Wachstumsmotor. In: VDI-Nachrichten, 23.11.2000, Nr. 47, S. 25
- [7] N. N.: Glänzende Aussichten. In: Totally Integrated Automation, 4-2001, S. 24-25
- [8] Happacher, R.: Ein schiefes Bild. In: Computer&Automation, 9/2001, S. 3
- [9] N. N.: Das Ende der Automatisierungseuphorie?. In: Markt&Technik, Nr. 36, 31.08.2001, S. 37-38
- [10] Schwarzkopf, P.: Flexible Montage- und Handhabungstechnik. Verfügbar über www.vdma.de
- [11] Feldmann, K.; Collisi, T.; Licha, A.: Rechnergestützte Planung und Simulation modularer Montagesysteme. In: VDI-Seminar "Auslegung und Betrieb modularer Montagesysteme", Fürth, 27./28.06.2001
- [12] Slama, S.; Krug, S.: Analyse, Klassifizierung und Bewertung innovativer Montagesysteme auf Basis einer Marktanalyse. 17. Motek, Sinsheim, 25.09.1998
- [13] Höhler, C.: Realisierung von Montageanlagen mittels Standard-Modulen. VDI-Seminar "Auslegung und Betrieb modularer Montagesysteme". Fürth, 26./27.06.2002
- [14] Kriegler, A.: Prozessmodulare Plattform für hybride Montagesysteme. 19. Motek, Sinsheim, 20.09.2000
- [15] N.N.: Robotik + Automation: Portrait der Branche. VDMA, 2001
- [16] Bartenschlager, J.; Hebel, H.; Schmidt, G.: Handhabungstechnik mit Roboter-technik. Braunschweig: Vieweg, 1998
- [17] Hans, M.; Baum, W.: Concept of a Hybrid Architecture for Care-O-bot. Proceedings of 10th IEEE International Workshop in Robot and Human Interactive Communication, Bordeaux, Frankreich, 18-21. Sept. 2001, S. 407-411

- [18] N. N.: Techno-Push und Market-Pull halten die Robotik auf Trab. In: VDI Nachrichten, 22. Februar 2002, Nr. 8, S. 14
- [19] N.N.: Meet ASIMO, Honda's Humanoid Robot. Verfügbar über: www.hondacorporate.com/new/index.html?subsection=asimo, Stand 08/2002
- [20] Thiemermann, S.: team@work - Direkte Mensch-Roboter-Kooperation. In: OTS-Systeme in der Robotik, München, 25.06.2002
- [21] Kriesel, W.; Heimbold, T.; Telschow, D.: Bustechnologien für die Automation. Heidelberg: Hüthig, 2. Auflage, 2000
- [22] Etschberger, K.: Controller-Area-Network: Grundlagen, Protokolle, Bausteine, Anwendungen. München: Hanser, 2. Auflage, 2000
- [23] Popp, M.: Profibus-DP: Grundlagen, Tipps und Tricks für Anwender. Heidelberg: Hüthig, 2. Auflage, 2000
- [24] Gerhardt, S.: Profibus dominiert. In: Computer & Automation, 6/2002, S. 22-24
- [25] Lawrenz, W (Hrsg.): Controller Area Network: CAN; Grundlagen und Praxis. Heidelberg: Hüthig, 2. Auflage, 1997
- [26] ReisRobotik: Technische Dokumentation RL 16. Obernburg, 2000
- [27] Kriesel, W.; Mandelung, O. W. (Hrsg.): ASI: das Aktuator-Sensor-Interface für die Automation. München: Hanser, 1994
- [28] N. N.: AS-Interface. Verfügbar über: www.as-interface.com, Stand 2002
- [29] N.N.: Ethernet hält Einzug in die Antriebstechnik. In: Markt&Technik, Nr. 43, 19.10.2001, S. 54
- [30] Feldmann, K.; Licha, A.: Rationelle Montagestrukturen mit angepaßter Automatisierung. In: VDI-Wissensforum "Auslegung und Betrieb modularer Montagesysteme", Fürth, 26./27.06.2002
- [31] Reinhart, G.; Feldmann, K.: Simulation - Schlüsseltechnologie der Zukunft? Stand und Perspektiven. München: Herbert Utz, 1997
- [32] VDI 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen. Stand 10/2001
- [33] adept Technologies: Firmenschrift. Verfügbar über: www.adept.com, Stand 2002
- [34] Kugelmann, D.: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern. München: Herbert Utz, 1999
- [35] N.N.: Kalibriersystem RoSy. Verfügbar über: laft.unibw-hamburg.de, Stand 2002
- [36] Neumann, P.: SPS-Standard: IEC 1131. München: Oldenbourg, 1995
- [37] N.N.: PLCOpen. Verfügbar über: www.plcopen.org, Stand 06/2002

- [38] N. N.: OPC Technical Overview. Verfügbar über: www.opcfoundation.org, Stand 2002
- [39] N.N.: Technik-Barometer. In: Totally Integrated Automation, Jahrg. 3, 3/2001, S. 27
- [40] Loos, P.: Hand on OPC: Eine praktische Einführung für OPC-Einsteiger. In: atp 41 (1999) Heft 11, S. 41-54
- [41] OPC Task Force: OLE for Process Control - OPC Overview. Version 1.0. Verfügbar über: www.opcfoundation.org, Stand 1998
- [42] Hadlich, T.; Szczepanski, T.; Häniche, J.: Nachgemessen: Performance von OPC. In: SPS Magazin, 10/99, S. 46-50
- [43] N. N.: Leichtbauinformationssystem. Verfügbar über: www.mfk.uni-erlangen.de, Stand 06.06.2002
- [44] N. N.: Protokoll zum Workshop der Vordringlichen Aktion Innovativer Leichtbau. Hannover, 28.10.1999
- [45] Steuer, U., Seufert, M.; Mederle, G.: The hybrid Front End of the Audi A6. Bayer AG, 1999
- [46] VDI 3237 Blatt 1: Fertigungsgerechte Werkstückgestaltung im Hinblick auf automatisches Zubringen, Fertigen und Montieren. Stand 1967
- [47] Götz, R.: Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile. Berlin: Springer, 1991
- [48] Huber, G., Kuonath, K.: Das Modulkonzept der Mercedes-Benz A-Klasse. In: Tagung "Neue Wege in der Fahrzeugentwicklung". 16. Sept. 1997, VDI-Berichte, Band 1343, Düsseldorf 1997
- [49] Closhen, H.: Vollautomatische Beschlagmontage im Fensterbau. 20. Motek, Sinsheim, 25.-27.09.2001
- [50] Enewoldsen, P.: Einsatz von Industrierobotern für die flexible Fertigung von flächigen Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen. Aachen: Shaker, 1998
- [51] Rupprecht, R.: Flexibel automatisierte Demontage von Fahrzeugdächern. Berlin: Springer, 1998
- [52] Hörz, T.: Flexibel automatisierte Montage von Holzdübeln mit Industrierobotern. Berlin: Springer, 1998
- [53] Siebenlist, J.: Kfz-Zuliefererindustrie wird zur Jobmaschine. In: VDI-Nachrichten, 1. Februar 2002, Nr. 5, S. 4
- [54] Feldmann, K.; Licha, A.: Complete Assembly - A new approach for the assembly of laminar, lightweight parts. Proceedings of 16th International Congress on Production Research, Prag, 30.07.-03.08.2000

- [55] Feldmann, K.; Müller, B.; Haselmann, T.: Automated Assembly of Lightweight Automotive Components. In: Annals of the Cirp, 48/1/1999, S. 9-12
- [56] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Leitfaden Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der manuellen Handhabung von Lasten. Verfügbar über: www.baua.de/prax/lasten2.htm, Stand 07.05.2001
- [57] Arau Automation: Montagelinie für Türmodule
- [58] Bank, B.; Perske, V.; Wies, S.: Automatische Roboterschweißanlage zur Herstellung von Industrieschiebetoren mit variablen Fertigungsmaßen für eine auftragsbezogene Einzelfertigung. In: Roboter 99, 09.-10. Juni 1996, S. 28-32
- [59] Franke, D.; Frick, K.; Moor, T.: Kooperierende Roboter - Eine Fallstudie zu hybriden Ressourcenzuweisungsproblemen. In: Entwicklung und Betrieb komplexer Automatisierungssysteme. 6. Fachtagung, Band 1, Braunschweig, 26.-28. Mai 1999
- [60] Vögele, G.: Mit Industrierobotern flexibel automatisierte Montage von Türabdichtungen für Kraftfahrzeuge. Berlin: Springer, 1998
- [61] Böger, T.: Beitrag zur Projektierung von Greifelementen für die Handhabung flächiger, biegeweicher Materialien. Dortmund: Verlag Praxiswissen, 1998
- [62] Jodin, D.: Untersuchungen zur Handhabung von biegeweichen Flächenschnitten aus Leder mit pneumatischen Greifern. Dortmund: Verlag Praxiswissen, 1991
- [63] Schmidt, N.: Kurze Umrüstzeiten sind höchster Trumpf in der Blechbearbeitung. In: VDI-Nachrichten, 10.2001
- [64] Springfield, P.: Roboter-Greifer auf Kohlefaser-Basis. In: handling, Heft 2, 2001, S. 18
- [65] Röder, A.: Ein Beitrag zur passgenauen Montage von Klappen in der Automobilindustrie am Beispiel der Türmontage. Essen: Vulkan-Verl., 2000. Zugl. Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2000
- [66] Schmidt, N.: Am besten alle Technologien in einer Aufspannung. In: VDI Nachrichten, 28.09.2001, Nr. 39, S. 23
- [67] Jiang, K.; Seneviratne, L.D.; Earles, S.: Assembly scheduling for an integrated two-robot workcell. In: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Band 13 (1997), H. 2, S. 131-143
- [68] Honda, T.; Mimura, T.; et al: A two-armed cooperative robot system 'Perseus-1' and its applications to product handling. In: Journal of Materials Processing Technology, Band 76 (1998), H. 1-3, S. 140-145
- [69] Terada, H.; Makino, H.: Collision Free Control of a Multi-Arm Testing Robot. In: Annals of the CIRP, Vol. 47/1/1998, S. 5-8

- [70] Surdilovic, D.; Grassini, F.: Synthesis of impedance Control for Complex Co-operating robot assembly Task. In: Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, Italien, 2001
- [71] Schönherr, U.: Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszeilen mit kooperierenden Robotern. Bamberg: Meisenbach, 1996
- [72] Münch, H.: Effizienter industrieller Einsatz bahnsynchron kooperierender Roboter. Verfügbar über: www.maschinenbau.hs-magdeburg.de/personal/barg-frede/fue/cooprob/paper_cooprob.pdf, Stand 13.8.2001
- [73] Homepage des Instituts für Roboterforschung der Universität Dortmund. Verfügbar über: www.irf.de, Stand 08/2002
- [74] Heß, P.: Wenn Roboter Hand in Hand arbeiten. In: Technik in Bayern, 4/2002, S. 32-33
- [75] Salvendy, G. (Hrsg.): Handbook of Industrial Engineering. New York: Wiley, 3. Auflage, 2001
- [76] VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Stand 1993
- [77] N. N.: Morphologischer Kasten. Verfügbar über: www.pm.iao.fhg.de/wettbewerb/materialien/morpho.pdf, Stand 09/2002
- [78] Hoffmeister, W.: Investitionsrechnung und Nutzwertanalyse. Stuttgart: Kohlhammer, 2000
- [79] Rinza, P.; Schmitz, H.: Nutzwert-Kosten-Analyse: Eine Entscheidungshilfe. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2. Auflage, 1992
- [80] Scholles, F.: Gesellschaftswissenschaftliche Methoden: Planungsmethoden. Verfügbar über: www.laum.uni-hannover.de/llr/lehre/Ptm/Ptm_BewNwa.htm, Stand 2000
- [81] Günther, U.: Neun „Leipziger Thesen“ zum Automobilstandort Deutschland. In: VDI Nachrichten, 41, 11.10.2002, S. 15
- [82] Käufer, B.; Hausler, B.: Planung hochautomatisierter Montagekonzepte am Beispiel eines Kundenprojektes in der Automobilzulieferindustrie. In: VDI-Wissensforum "Auslegung und Betrieb modularer Montagesysteme", Fürth, 26./27.06.2002
- [83] VDI 2860: Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. 1990
- [84] Kreuzer, E.: Industrieroboter: Technik, Berechnung und anwendungsorientierte Auslegung. Berlin: Springer, 1994
- [85] VDI 2861: Kenngrößen für Industrieroboter. Einsatzspezifische Kenngrößen. Stand 1988

- [86] Homepage der Firma Kuka. Verfügbar über: www.kuka-roboter.de, Stand 08/2002
- [87] Brand, A.: Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID). Bamberg: Meisenbach. 1997
- [88] Niven, W.D.: The Scientific Papers of James Clerk Maxwell. Cambridge University Press, Dover, 1965
- [89] Mannheim, A.: Principies et developments de Geometrie cinematique. Paris: Gauthier Villars, 1894
- [90] Stewart, D.: A Platform with six Degrees of Freedom. In: Proc. Instn. Mechanical Engineers, Vol.180, Pt.1, No.15 (1965-1966), S. 371-386
- [91] Weck, M.; Giesler, M.: Parallel Kinematics for Machine Tools. In: Production Engineering, V/2 (1998), S. 65-68
- [92] Pritschow, G.; Tran, T.L.; Wildermuth, D.: Path Preparation for Parallel Manipulators. In: Production Engineering, V/2 (1998), S. 69-72
- [93] Kim, J.; Park, F.C.; Lee, J.M.: A New Parallel Mechanism Machine Tool Capable of Five-FaceMachining. In: Annals of the CIRP, Vol. 48/1/1999, S. 337-340
- [94] Rehsteiner, F.; Neugebauer, R.; et al: Putting Parallel Kinematics Machines (PKM) to Productive Work. In: Annals of the CIRP, 48/1/1999, S. 345-350
- [95] N. N.: Robotool-Projekt. Verfügbar über: www.ifw.uni-hannover.de/robotool/li-stedeutsch.htm, Stand 08/2002
- [96] Maurer, A.; Stark, W. A.: Steering Carmaking into the 21st Century. Boston Consulting Group, 09/2001
- [97] Jesse, R.; Rosenbaum, O.: Barcode: Theorie, Lexikon, Software. Berlin: Verlag Technik, 2000
- [98] N. N.: Prozeßsteuerung und Produktidentifikation mit 2D-Codes. In: ident Jahrbuch 2001/2002, S. 32
- [99] ISO 16022: Informationstechnik - Internationale Symbologie-Spezifizierung - Daten-Matrix. 05/2000
- [100] Timme, G.: RF-Identifikation in der Produktion und Montage. In: VDI-Seminar "Auslegung und Betrieb modularer Montagesysteme", Fürth, 27./28.06.2001
- [101] N. N.: Das RS232-Interface. Verfügbar über: www.physik.uni-oldenburg.de/docs/cip/teaching_notes/edvseminar/sroka/exp_rs232.html, Stand 08/2002
- [102] N. N.: Firmenschrift Fa. Euro I.D., 1999
- [103] Licha, A.: Auftragspezifische Kommisionierung zur Unterstützung der Komplettmontage. In: FAPS-TT-Seminar "Planung und Betrieb rationeller Systeme für die Gerätemontage". Erlangen, 18.11.1999

- [104] Homepage der Object Managing Group. Verfügbar über www.omg.org, Stand 08/2002
- [105] Husty, M.; Karger, A.; Sachs, H.; Steinhilper, W.: Kinematik und Robotik. Berlin: Springer. 1997
- [106] Feldmann, K.; Koch, M.; Licha, A.: Hexapoden zur Manipulation flächiger Bauteile. In: *zwf - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 97 (2002) 3, S. 97-101
- [107] Koch, M.: Internes Protokoll, Erlangen, 2000
- [108] Feldmann, K.; Koch, M.; Licha, A.: Einsatz von Parallelkinematiken zur Manipulation von flächenhaften Bauteilen. In: *wt - Werkstattstechnik online*, 92 (2002) H. 7/8, S. 351-355
- [109] Feldmann, K.; Licha, A.: Steuerungsstrukturen für eine flexible Komplettmontagezelle. In: *wt - Werkstattstechnik online*, 91 (2001) H. 11, S. 703-707
- [110] Böttcher, J.: EN 50170 - Die europäische Feldbusnorm Teil 3. Verfügbar über: www.infoside.de/infida/elektronik/f1696s48ff.htm, Stand 1999
- [111] Homepage der Firma Piab. Verfügbar über www.piab.com, Stand 08/2002
- [112] Härtl, H.: Dextrous manipulation with multifingered robot hands including rolling and slipping of the fingertips. In: *Robotics and Autonomous Systems*, Band 14 (1995), S. 29-53
- [113] N. N.: DLR Hand II. Verfügbar über: www.robotic.dlr.de/mechatronics/hand/, Stand 2002
- [114] Fipa GmbH: Produktkatalog Vakuumtechnik, Stand 03/2001
- [115] Licha, A.: Integration von Identsystemen im herogenen Steuerungsumfeld. In: *ident*, (2001) H. 1, S. 36-38
- [116] Motoman News: Firmenschrift der Motoman robtec GmbH. 02/2001
- [117] Weinkötz, C.: Stand der Industrierobotertechnik in den Montagewerken der DaimlerChrysler AG sowie Anforderungen an zukünftige Systeme. Robotik 2000, Berlin, VDI Berichte 1552, S. 305-314
- [118] Caccavale, F.; Chiacchio, P.: An experimental set-up for cooperative manipulation based on industrial manipulators. In: *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 27, N. 2 (2000), S. 120-130
- [119] Aust, E.; Niemann, H.-R.; Seeliger, D.: Meeresroboter. In: *Roboter erobern den Alltag - Spektrum der Wissenschaft*, 1998, S. 86-89
- [120] Papadimitou, I.: Steuerungskonzepte für autonome mobile Unterwasserroboter. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1991

- [121] Arkin, R.C.; Tucker, B.: Cooperative Multiagent Robotic Systems. In: Artificial Intelligence and Mobile Robots: case studies of successful robot systems. (Hrsg: Kortenkamp, D. et al). MIT Press, Cambridge, 1998, S. 277-296
- [122] Weeks, J.: Entwicklung eines aufgabenorientierten Greif- und Bahnplanungssystems für die automatisierte Montage mit SCARA-Robotern. Aachen: Shaker, 1997. Zugl. Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 1996
- [123] Seidel, U.: Verfahren zur Generierung von Montageablaufstrukturen komplexer Serienerzeugnisse. Berlin: Springer, 1998. Zugl. Diss, Stuttgart, 1998
- [124] Ben-Arieh, D.; Kramer, B.: Computer-aided Process Planning for Assembly: Generation of Assembly Operations Sequence. In: Int. Journal on Production Research, 32 (1994), Nr. 3, S. 643-656
- [125] Siegert, H.-J.; Boicionek, S.: Robotik: Programmierung intelligenter Roboter. Berlin: Springer, 1996
- [126] Cuiper, R.: Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen. München: Herbert Utz, 2000
- [127] Geyer, G.: Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage. München: Carl Hanser, 1991
- [128] Dammertz, R.: Ein Programmiersystem zur graphisch strukturierten Erstellung von Roboterprogrammen und Programmieroberflächen. Aachen: Shaker, 1996. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 1996
- [129] Dini, G.; Failli, F.; et al.: Generation of Optimized Assembly Sequences Using Genetic Algorithms. In: Annals of the CIRP, Vol. 48/1/1999, S. 17-20
- [130] Wieland, E.: Anwendungsorientierte Programmierung für die robotergestützte Montage. Berlin: Springer, 1995
- [131] Meißner, A.: Aufgabenorientierte Programmierung von Bewegungsbahnen für Großroboter mit redundanter Gelenkarmkinematik. Heimsheim: Jost-Jetter, 2000. Zugl. Stuttgart, Diss, 2000
- [132] United States Patent 4,835,730: Database driven Robot Programming System and Method. Anmelder: Adept Technology. 1987
- [133] Liebermann, L.I.; Wesley, M.A.: AUTOPASS: An Automatic Programming System for Computer Controlled Mechanical Assembly. In: IBM J. Res. Develop., 21 (1977), S. 321-333
- [134] Wörn, H. Henrich, D. Wurl, C.: Motion Planning in dynamic environments - A parallel online approach. In: 3rd International Symposium on Artificial Life and Robotics, Oita, Japan, 19.-21. Jan. 1998
- [135] Latombe, J. C.: Robot motion planning. Boston: Kluwer Academic Publishers, 4. Auflage, 1996

- [136] Chazelle, B.: Approximation and Decomposition of Shapes. In: Scharz, J.T.; Yap, C.K. (Hrsg.): Algorithmic and Geometric Aspects of Robotics. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, 1987
- [137] Soni, B.K.; Weatherill, N.P.: Handbook of Grid Generation. Boca Raton: CRC Press, 1999
- [138] Frey, P.J.; Marechal, L.: Fast Adaptive Quadtree Mesh Generation. In: Proceedings 7th International Meshing Roundtable, Albuquerque, 1998
- [139] Khatib, O.: Operationnel des Robots Manipulateurs en Presence d'Obstacles. Diss. Toulouse, 1980
- [140] Khatib, O.: Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots. In: International Journal of Robotics Research, 581, 1986, S. 90-98
- [141] Canny, H.: The Complexity of Robot Motion Planning. Cambridge, MA: MIT Press, 1998
- [142] Freund, E.; Bühler, C.: Intelligent Robot Systems. In: Proc. of IEEE Int. Workshop on Intelligent Motion Control, 1990, S. SL 1-7
- [143] Feldmann, K.; Licha, A.: Flexibel automatisierte Montage flächenhafter Produktstrukturen. In: Dillmann, R. (Tagungsleitung) u.a.; VDI/VDE-Gesellschaft Meß- und Automatisierungstechnik (Hrsg.): Robotik 2002: Leistungsstand, Anwendungen, Visionen, Trends. Düsseldorf, VDI Verlag, 2002 (VDI-Berichte 1679), S. 27-32
- [144] DIN 66312 Teil1: Industrieroboter Programmiersprache Industrial Robot Language (IRL). Stand 06/1993
- [145] Heverhagen, T.: Arbeitsbericht A-0 zum Teilprojekt "Ingenieurmäßige Beschreibungstechniken für die Entwicklung von Softwarekomponenten" im Rahmen des DFG-Schwerpunktthemas "Integration von Techniken der Softwarespezifikation für ingenieurwissenschaftliche Anwendungen"
- [146] Boer, C. R.; Pedrazzoli, P.; et. al: Integrated Computer Aided Design for Assembly Systems. In: Annals of the CIRP, 50/1/2001, S. 17-20

Glossar

AS-i	Aktuator-Sensor-Interface
COM	Component Object Model
DCOM	Distributed Component Object Model
DLL	Dynamic Link Library
Dude	Distributed User Orientated Extension
FTS	Fahrerloses Transportsystem
GUI	Graphical User Interface
HMI	Human Machine Interface
I-Punkt	Identifikationspunkt
IR	Industrieroboter
JDBC	Java Database Connectivity
KM	Komplettmontage
MTBF	Mean time between failure
MTTR	Mean time to repair
NC	Numeric Control
NwA	Nutzwertanalyse
ODBC	Open Database Connectivity
OPC	OLE for Process Control
Profibus	Process Field Bus
RBG	Regalbediengerät
RF	Radio Frequenz
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TCP	Tool Center Point
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
WT	Werkstückträger

Summary

The rising cost-pressure and, at the same time shorter innovation-cycles lead to a decrease in the vertical range of manufacture in many fields of producing companies. Especially in the area of automotive industry a significant change from the simple supplier to the system integrator can be recognized. This development not only causes a change in the whole supply-chain but also in the manufacturing processes. The supplier assembles parts to complete modules which are later put together to the whole product. As those parts are, in relation to normal products, very large and produced in many different variants, today the whole assembly process is mainly done manually. High labor costs, regulations concerning occupational safety and health as well as quality aspects demand for a flexible automation of those product-structures.

In this work, an innovative assembly-concept called complete assembly has been realized. Due to the part size in-line assembly leads to high area utilization. With complete assembly, all steps are performed in one single assembly cell by two linear robots. As these kinematics only offer four degrees of freedom, an additional hexapod especially developed for the part-manipulation is located in the common workspace of both robots. Part-handling is done with a flexible gripper, offering six DoF with its moveable arms.

Only if both robots work cooperatively together, the full performance of the system can be reached. Due to the complexity of the assembly cell, manual programming of the handling systems is not practical as it is very time-consuming and may lead to sub-optimal sequences, failures or in the worst case to a system crash. Therefore, a hierarchical control-structure based on the steps planning, testing & simulation and execution was developed.

The planning of the assembly is done with help of a specially developed software called FAPGraph. Here, the planner simply draws the precedence-graph which indicates chronologically dependent and independent steps. In extension to the classical assembly-graph, FAPGraph also stores additional information such as the pick- and place-position, the required gripper, process-information and so on. Based on this data, an automatic calculation of the best sequence is done.

To archive the best performance, a coordinating instance controls the execution of the assembly. By communicating only via the digital I/Os of the robot controls, this PC-based application is independent from any manufacturer-specific protocols and therefore can be adapted to different robots controls only by modifying its configuration.

Lebenslauf

Andreas Manuel Licha
geboren am 13. April 1970 in Nürnberg
ledig

- 1976 - 1980 Grundschule Röthenbach a. d. Pegnitz
- 1980 - 1990 Gymnasium Röthenbach a. d. Pegnitz
- 1990 - 1991 Zivildienst bei der Stadt Nürnberg
- 10/91 - 06/97 Studium der Fertigungstechnik an der Friedrich-Alexander-
Universität Erlangen-Nürnberg
Abschluß: Dipl.-Ing. (Univ.)
- 07/97 - 11/02 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomati-
sierung und Produktionssystematik an der Universität Erlangen-
Nürnberg
Leiter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann
- Seit 11/2002 Hella KG Hueck & Co, Produktbereich KFZ-Elektronik, Lippstadt

Reihe Fertigungstechnik - Erlangen

www.mb.uni-erlangen.de/diss

Band 1 - 52

Carl Hanser Verlag, München

ab Band 53

Meisenbach Verlag, Bamberg

45,-- Euro

Band 1: Andreas Hemberger
Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme
208 Seiten, 107 Bilder. 1988.

Band 2: Detlef Classe
Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte
194 Seiten, 70 Bilder. 1988.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting
Projektierung von Montagesystemen
201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Band 4: Karsten Schlüter
Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik
177 Seiten, 97 Bilder. 1989.

Band 5: Shir-Kuan Lin
Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
168 Seiten, 46 Bilder. 1989.

Band 6: Rudolf Nuss
Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden
206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989.

Band 7: Wolfgang Scholz
Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen
194 Seiten, 89 Bilder. 1989.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier
Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989.

Band 9: Rainer Eisele
Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion
183 Seiten, 86 Bilder. 1990.

Band 10: Rolf Pfeiffer
Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990.

Band 11: Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
201 Seiten, 82 Bilder. 1990.

- Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
- Band 13: Frank Vollertsen
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls
XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990.
- Band 14: Stephan Biermann
Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern
VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991.
- Band 15: Uwe Geißler
Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991.
- Band 16: Frank Oswald Hake
Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
- Band 17: Herbert Reichel
Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991.
- Band 18: Josef Scheller
Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
- Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991.
- Band 20: Joachim Schmid
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern
XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991.
- Band 21: Egon Sommer
Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen
188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
- Band 22: Georg Geyer
Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage
192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
- Band 23: Rainer Flohr
Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)
186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
- Band 24: Alfons Rief
Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung
VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991.
- Band 25: Christoph Thim
Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation
188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
- Band 26: Roland Müller
CO₂-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992.
- Band 27: Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
195 Seiten, 76 Bilder. 1992.

- Band 28: Martin Hoffmann
Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen
149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
- Band 29: Peter Hoffmann
**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen :
Prozessführung und Systemtechnik in der 3D–Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen**
186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992.
- Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
- Band 31: Hubert Reinisch
Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen
XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.
- Band 32: Brigitte Bärnreuther
Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen
XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
- Band 33: Joachim Hutfless
Laserstrahlregelung und Optikiagnostik in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993.
- Band 34: Uwe Günzel
Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und –steuerung
XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993.
- Band 35: Bertram Ehmman
Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung
XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
- Band 36: Harald Kolléra
Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993.
- Band 37: Stephanie Abels
Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem
188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
- Band 38: Robert Schmidt–Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993.
- Band 39: Norbert Lutz
Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl–Excimerlaserstrahlung
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994.
- Band 40: Konrad Grampp
Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD–Bestücklinien
178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
- Band 41: Martin Koch
Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie
169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
- Band 42: Armin Gropp
Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG–Laser
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995.

- Band 43: Werner Heckel
Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren
149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995.
- Band 44: Armin Rothhaupt
Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung
180 Seiten, 101 Bilder. 1995.
- Band 45: Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995.
- Band 46: Bodo Vormann
Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile
126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995.
- Band 47: Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
144 Seiten, 75 Bilder. 1995.
- Band 48: Rainer Klotzbücher
Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen
156 Seiten, 62 Bilder. 1995.
- Band 49: Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
144 Seiten, 96 Bilder. 1995.
- Band 50: Jörg Franke
Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)
196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995.
- Band 51: Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995.
- Band 52: Michael Solvie
Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen
200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996.
- Band 53: Robert Hopperdietzel
Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996.
ISBN 3-87525-070-2
- Band 54: Thomas Rebhan
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern – Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen
148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-075-3
- Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik
157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-074-5
- Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mit kooperierenden Robotern
188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-076-1
- Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung
162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-079-6

Band 58: Markus Schultz
**Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen
von Blechformteilen**
165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-080-X

Band 59: Thomas Krebs
**Integration elektromechanischer CA-Anwendungen
über einem STEP-Produktmodell**
198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-081-8

Band 60: Jürgen Sturm
**Prozeßintegrierte Qualitätssicherung
in der Elektronikproduktion**
167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-082-6

Band 61: Andreas Brand
**Prozesse und Systeme zur Bestückung
räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)**
182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7

Band 62: Michael Kauf
**Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter
einer CO₂-Hochleistungslaseranlage**
140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-083-4

Band 63: Peter Steinwässer
**Modulares Informationsmanagement
in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung**
190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2

Band 64: Georg Liedl
**Integriertes Automatisierungskonzept
für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion**
196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-086-9

Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tabelle. 1997.
ISBN 3-87525-089-3

Band 66: Wolfgang Blöchl
**Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen
zur Prozeß- und Programmoptimierung**
168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5

Band 67: Klaus-Uwe Wolf
**Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung
zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln**
186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-093-1

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-094-X

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen
120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-095-8

- Band 71: Michael Steber
**Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen
in der automatisierten Montage**
168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-096-6
- Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik
162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-097-4
- Band 73: Volker Franke
**Integrierte Planung und Konstruktion
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung**
143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2
- Band 74: Herbert Scheller
**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**
184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-099-0
- Band 75: Arthur Meßner
**Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile
– Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung**
164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-100-8
- Band 76: Mathias Glasmacher
Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen
184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-101-6
- Band 77: Michael Schwind
**Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften
von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren**
124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-102-4
- Band 78: Manfred Gerhard
**Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung
der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen**
179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-103-2
- Band 79: Elke Rauh
**Methodische Einbindung der Simulation
in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe**
192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-104-0
- Band 80: Sorin Niederkorn
**Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung
bei umformtechnischen Prozessen**
99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-105-9
- Band 81: Stefan Schubert
**Regelung der Fokusbildung beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern
unter Einsatz von adaptiven Optiken**
140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-106-7
- Band 82: Armando Walter Colombo
**Development and Implementation of Hierarchical Control Structures
of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets**
216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1
- Band 83: Otto Meedt
**Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling
durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung**
186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3

Band 84: Knuth Götz

**Modelle und effiziente Modellbildung
zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion**

212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tabellen. 1998.

ISBN 3-87525-112-1

Band 85: Ralf Luchs

**Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe
zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT**

176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tabellen. 1998.

ISBN 3-87525-113-7

Band 86: Frank Pöhlau

**Entscheidungsgrundlagen zur Einführung
räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**

144 Seiten, 99 Bilder. 1999.

ISBN 3-87525-114-8

Band 87: Roland T. A. Kals

Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes

128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1999.

ISBN 3-87525-115-6

Band 88: Gerhard Luhn

**Implizites Wissen und technisches Handeln
am Beispiel der Elektronikproduktion**

252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tabelle. 1999.

ISBN 3-87525-116-4

Band 89: Axel Sprenger

Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen

114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tabellen. 1999.

ISBN 3-87525-117-2

Band 90: Hans-Jörg Pucher

**Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken
und Laserstrahllöten von Mikrokontakten**

158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tabellen. 1999.

ISBN 3-87525-119-9

Band 91: Horst Arnet

Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung

128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tabellen. 1999.

ISBN 3-87525-120-2

Band 92: Doris Schubart

**Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung
beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung**

133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tabellen. 1999.

ISBN 3-87525-122-9

Band 93: Adrianus L. P. Coremans

**Laserstrahlsintern von Metallpulver – Prozeßmodellierung,
Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper**

184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999.

ISBN 3-87525-124-5

Band 94: Hans-Martin Biehler

**Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung
und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung**

194 Seiten, 105 Bilder. 1999.

ISBN 3-87525-126-1

Band 95: Wolfgang Becker

**Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften
excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken**

175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 1999.

ISBN 3-87525-127-X

Band 96: Philipp Hein

**Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren:
Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung**

129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tabellen. 1999.

ISBN 3-87525-128-8

Band 97: Gunter Beitinger
**Herstellungs- und Prüfverfahren
für thermoplastische Schaltungsträger**
169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-129-6

Band 98: Jürgen Knoblach
**Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von
Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden**
155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-130-X

Band 99: Frank Breitenbach
**Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie
elektronischer SMT-Bauelemente**
147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-131-8

Band 100: Bernd Falk
**Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage
für Werkzeuge der Kaltmassivumformung**
134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-136-9

Band 101: Wolfgang Schlägl
**Integriertes Simulationsdaten-Management
für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung**
169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-137-7

Band 102: Christian Hinsel
**Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter
Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung**
130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-138-5

Band 103: Stefan Bobbert
**Simulationsgestützte Prozessauslegung
für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren**
123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8

Band 104: Harald Rottbauer
**Modulares Planungswerkzeug
zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion**
166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7

Band 106: Thomas Menzel
**Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung
und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse**
152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3

Band 107: Thomas Stöckel
**Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene
in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks**
147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-143-1

Band 108: Frank Pitter
**Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen
durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen**
158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-144-X

Band 109: Markus Korneli
**Integration lokaler CAP-Systeme
in einen globalen Fertigungsdatenverbund**
121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-146-6

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern – Prozessparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion
128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tabellen. 2001
ISBN 3-87525-159-8

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen
178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-147-4

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung
161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-151-2

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)
165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-152-0

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-153-9

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion
155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-157-1

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften
122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-156-3

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten
181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-164-4

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik
176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-165-2

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion
152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-166-0

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile
126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-175-X

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung
111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-183-0

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen
148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-181-4

Band 123: Mark Geisel

**Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen
mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik**
135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-180-6

Band 124: Gerd Eißer

**Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf
Thermoplastsubstraten für die MID-Technik**
148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-171-7

Band 125: Marc Fleckenstein

**Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen
elektronischer Kontakte**
159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-170-9

Band 126: Stefan Kaufmann

**Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen
von Silizium für Komponenten der Optoelektronik**
159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-172-5

Band 127: Thomas Fröhlich

**Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente
mit Diodenlaserstrahlung**
143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-186-5

Band 128: Achim Hofmann

**Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von
Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen**
113 Seiten, 48 Bilder, 4 Tabellen
ISBN 3-87525-182-2

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik
129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-169-5

Band 130: Thomas Pohl

**Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter
Formplatinen aus Aluminiumlegierungen**
133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tabellen. 2002
ISBN 3-87525-173-3

Band 131: Matthias Wenk

**Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die
flexible Sensorführung von Industrierobotern**
167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tabelle. 2002.
ISBN 3-87525-174-1

Band 132: Matthias Negendanck

**Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe
zum Laserstrahlschweißen**
116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tabellen
ISBN 3-87525-184-9

Band 133: Oliver Kreis

**Integrierte Fertigung –
Verfahrenintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und
Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation**
167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tabellen
ISBN 3-87525-176-8

Band 134: Stefan Trautner

**Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der
Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten**
179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-177-6

Band 135: Roland Meier

**Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher
spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**

155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tabellen. 2002.

ISBN 3-87525-178-4

Band 136: Jürgen Wunderlich

**Kostensimulation – Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung
komplexer Produktionssysteme**

202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tabellen. 2002.

ISBN 3-87525-179-2

Band 137: Stefan Novotny

**Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und
Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur**

132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tabellen. 2002.

ISBN 3-87525-185-7

Band 138: Andreas Licha

**Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter
Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter**

158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tabellen. 2003.

ISBN 3-87525-189-X

Band 139: Michael Eisenbarth

**Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik
für mechatronische Baugruppen**

207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tabellen. 2003.

ISBN 3-87525-190-3