

Lehrstuhl für
Montagesystemtechnik und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen

Ulrich Roßgoderer

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Lindemann

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Seliger,
Technische Universität Berlin

Die Dissertation wurde am 22.01.2002 bei der Technischen Universität
München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am
12.06.2002 angenommen.

Forschungsberichte



Band 168

Ulrich Roßgoderer

***System zur effizienten Layout-
und Prozessplanung von
hybriden Montageanlagen***

***herausgegeben von
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart***

Herbert Utz Verlag



Forschungsberichte iwb

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

herausgegeben von

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

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist
bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2002

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2002

ISBN 3-8316-0154-2

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089/277791-00 · Fax: 089/277791-01

Geleitwort des Herausgebers

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

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

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

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

Gunther Reinhart

Vorwort

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, dem Leiter dieses Instituts, gilt mein besonderer, herzlicher Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Günther Seliger, dem Leiter des Fachgebiets Montagetechnik und Fabrikbetrieb am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der Technischen Universität Berlin, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferats und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit bedanken.

Herzlich danken möchte ich ebenso Herrn Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann, dem Leiter des Lehrstuhls für Produktentwicklung der Technischen Universität München, für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts sowie allen Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, recht herzlich.

Schließlich bedanke ich mich bei meiner Partnerin Elke für das immer wieder entgegenbrachte Verständnis und die tatkräftige Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit. Meinen Eltern gilt der Dank dafür, dass Sie mir die erforderliche Ausbildung ermöglicht haben.

München, im Juli 2002

Ulrich Roßgoderer

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG.....	1
1.1	MOTIVATION.....	1
1.2	BETRACHTUNGSGEGENSTAND & ZIELSETZUNG.....	3
1.3	VORGEHENSWEISE.....	4
2	STAND DER TECHNIK.....	5
2.1	ÜBERSICHT.....	5
2.2	FLEXIBLE MONTAGESYSTEME.....	6
2.3	MONTAGEPLANUNGSMETHODE.....	8
2.4	PLANUNGSWERKZEUGE ZUR MONTAGESYSTEMGESTALTUNG.....	12
2.4.1	Übersicht.....	12
2.4.2	Technologien zur Modellierung und Bewertung von 3D- Simulationsmodellen.....	12
2.4.2.1	Offline-Programmierung von Industrierobotern.....	12
2.4.2.2	Simulation manueller Montagetätigkeiten.....	14
2.4.2.3	Virtual Reality Komponenten.....	16
2.4.2.4	Ansätze zur Planungsautomatisierung.....	18
2.4.3	Rechnergestützte Werkzeuge zur Montagesystemplanung.....	22
2.4.3.1	Montageplanungssysteme.....	22
2.4.3.2	3D-Simulationssysteme.....	24
2.4.3.3	Virtual Reality Systeme.....	25
2.5	ZUSAMMENFASSUNG DES STANDES DER TECHNIK.....	31
3	KONZEPTION UND SYSTEMENTWURF	34
3.1	ÜBERSICHT.....	34
3.2	ANNAHMEN FÜR DAS ZU KONZIPIERENDE SYSTEM.....	35
3.2.1	Planungsobjekt: Hybride Montagesysteme.....	36
3.2.2	Planungsmethode: Simultaneous Engineering.....	36
3.2.3	Planungshilfsmittel: 3D-Simulationsmodell.....	37
3.3	TRENNUNG VON STRUKTURELLEN UND RÄUMLICHEN PLANUNGSMETHODEN.....	38
3.4	KOMBINATION VON ALGORITHMEN UND VR-INTERAKTION.....	41
3.4.1	Algorithmen zur Planungsautomatisierung.....	42
3.4.2	VR-Techniken als Interaktionshilfsmittel.....	45
3.4.3	Vergleich und Kombination von Planungsautomatisierung und Interaktion.....	47
3.5	DREISTUFIGE METHODE ZUR 3D-MONTAGEPLANUNG.....	48
3.5.1	Übersicht – Systemunterteilung.....	48
3.5.2	Layouterstellung.....	50
3.5.2.1	Layoutstruktur als Eingangsgröße aus der Strukturplanung.....	50
3.5.2.2	Kombination von Algorithmen und Interaktion.....	51
3.5.2.3	Ergebnis der Layouterstellung.....	52
3.5.3	Prozessmodellierung.....	52
3.5.3.1	Prozessstruktur als Eingangsgröße aus der Strukturplanung.....	52
3.5.3.2	Kombination von Algorithmen und Interaktion.....	53
3.5.3.3	Ergebnis der Prozessmodellierung.....	54
3.5.4	Anordnungsoptimierung.....	55
3.6	SOFTWARETECHNISCHE UMSETZUNG.....	57
3.7	ZUSAMMENFASSUNG.....	59
4	LAYOUTERSTELLUNG	61
4.1	ÜBERSICHT.....	61
4.2	AUFGABEN DER LAYOUTERSTELLUNG.....	62
4.3	PLANUNG DER LAYOUTSTRUKTUR.....	62
4.3.1	Bestandteile einer Montagestation.....	62
4.3.2	Prozessorientierte Layouterstellung.....	63
4.3.3	Systemtechnische Umsetzung der Layoutstrukturplanung.....	66

Inhaltsverzeichnis

4.4	PLANUNG DER RÄUMLICHEN ANORDNUNG	68
4.4.1	Grundsätzliches Vorgehen	68
4.4.2	Import der CAD-Daten	68
4.4.3	Analyse der anordnungsbestimmenden Features	69
4.4.4	Automatische Generierung einer ersten Anordnung	71
4.4.5	Interaktive Modifikation der Anordnung	73
4.4.6	Systemtechnische Umsetzung der räumlichen Layouterstellung	74
4.5	ERGEBNIS DES PLANUNGSSCHRITTS „LAYOUTERSTELLUNG“	75
5	PROZESSMODELLIERUNG HYBRIDER MONTAGEANLAGEN	77
5.1	ÜBERSICHT	77
5.2	BEDEUTUNG DER PROZESSMODELLIERUNG	77
5.3	MODELLIERUNG AUTOMATISierter PROZESSE	79
5.3.1	Grundsätzliches Vorgehen	79
5.3.2	Umsetzung der Elementarprozesse in Bewegungsabläufe	80
5.3.3	Verknüpfung der Bewegungsabläufe mit dem Montagevorgangsplan	88
5.4	MODELLIERUNG MANUELLER BEWEGUNGSABLAUFE	89
5.4.1	Anforderungen an das zu realisierende VR-System	89
5.4.2	Hardware-Aufbau des realisierten VR-Systems	90
5.4.3	Software-Aufbau des realisierten VR-Systems	92
5.4.4	Anwendung zur Modellierung manueller Montageprozesse	96
5.4.4.1	Einstellung der Körperhaltung	96
5.4.4.2	Greifen und Loslassen von Objekten	98
5.4.4.3	Analyse der Bewegungen	99
5.5	SYSTEMTECHNISCHE UMSETZUNG	99
5.6	ERGEBNIS DES PLANUNGSSCHRITTES PROZESSMODELLIERUNG	100
6	ANORDNUNGSOPTIMIERUNG	101
6.1	ÜBERSICHT	101
6.2	GRUNDLAGEN DER ANORDNUNGSOPTIMIERUNG	102
6.3	DEFINITION DER OPTIMIERUNGSAUFGABE	106
6.3.1	Automatisierte Festlegung der Optimierungsvariablen	106
6.3.2	Festlegung der Zielfunktion	109
6.3.2.1	Zielfunktion für allgemeine kinematische Bewegungen	109
6.3.2.2	Zielfunktionen für manuelle Tätigkeiten	110
6.3.3	Festlegung der Randbedingungen	112
6.3.4	Prozessanpassung	113
6.4	DURCHFÜHRUNG DER OPTIMIERUNG	114
6.4.1	Hierarchische Optimierung	115
6.4.2	Grob- und Feinoptimierung	116
6.5	SYSTEMTECHNISCHE UMSETZUNG	120
6.6	ERGEBNIS DER ANORDNUNGSOPTIMIERUNG	121
7	ANWENDUNGSBEISPIELE	122
7.1	ÜBERSICHT	122
7.2	AUTOMATISIERTE LAYOUT- UND PROZESSPLANUNG	123
7.2.1	Layouterstellung	123
7.2.2	Prozessmodellierung	125
7.2.3	Layoutoptimierung	127
7.2.4	Ergebnis der automatisierten Layout- und Prozessplanung	128
7.3	EINSATZ DER OPTIMIERUNGsalgorithmen	129
7.3.1	Anwendung und Bewertung genetischer Algorithmen	130
7.3.2	Optimierung manueller Arbeitsplätze	132
7.4	VR GESTÜTZTE INTERAKTION	133
7.4.1	Erzeugung manueller Montageabläufe	133
7.4.2	Erzeugung automatisierter Bewegungsabläufe	137
7.5	BEWERTUNG DES SYSTEMS	139

8	ZUSAMMENFASSUNG	142
9	LITERATURVERZEICHNIS	145

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
3D	Dreidimensional
CA	Computer Aided; Rechnergestützt
CAD	Computer Aided Design; Rechnergestützte Konstruktion
CAVE	CAVE Automatic Virtual Environment
CORBA	Common Object Request Broker Architecture
DMU	Digital Mock-Up
FuE	Forschung und Entwicklung
GA	Genetischer Algorithmus
HMD	Head Mounted Display; Datenhelm
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LIN	Linear
MTM	Methods Time Measurement
NC	Numerical Control; Numerische Steuerung
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
OWAS	Ovako Working Posture Analysing System
PDM	Product-Data Management; Produktdaten-Management
PTP	Point to point; Punkt zu Punkt
QM	Qualitätsmanagement
RPC	Remote Procedure Call
SE	Simultaneous Engineering
TCP	Tool Center Point; Werkzeug Koordinaten Ursprung
TMU	Time Measurement Unit
USIS	Universal Simulation System
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VE	Virtual Environment; Virtuelle Umgebung
VR	Virtual Reality; Virtuelle Realität
VRML	Virtual Reality Modeling Language

1 Einleitung

1.1 Motivation

Das produzierende Gewerbe der neunziger Jahre ist geprägt durch Schlagworte wie „Globalisierung“, „Simultaneous/Concurrent Engineering“ und „Innovationsprozesse“. Damit Unternehmen in einem von weltweitem Wettbewerb geprägten Markt erfolgreich sein können, stehen sowohl Produktion als auch Entwicklung auf dem Prüfstand. Konzentrierten sich die Bestrebungen, wettbewerbsfähig zu bleiben, bislang vornehmlich auf die Produktivität, stehen nun zunehmend Geschäftsprozesse in Entwicklung und Planung von Produktionsanlagen im Vordergrund. Durch Einführung entsprechender Planungsmethoden und –werkzeuge soll bei verkürzter Planungszeit gleichzeitig die Qualität der Planungsergebnisse erhöht werden.

Ein wesentliches Hilfsmittel, um dieses Ziel zu erreichen, stellt die rechnergestützte Simulation (VDI-RICHTLINIE 3633 1996) von Produktionsanlagen dar. Anhand eines Simulationsmodells können die entscheidenden Eigenschaften einer Anlage zu einem sehr viel früheren Zeitpunkt ermittelt werden, als dies bislang der Fall ist (REINHART & VON PRAUN 1998). Während nach heutigem Stand Anlagen zum Teil oder komplett als realer Prototyp (z.B. in Form einer Vorserienanlage im Automobilbau) errichtet werden, um Aussagen über zu erzielende Produktionszeit und –qualität treffen zu können, sollen in Zukunft derartige Untersuchungen hauptsächlich an Simulationsmodellen stattfinden. Das zu erwartende Verbesserungspotential hinsichtlich Planungszeit, -kosten und –qualität ist beträchtlich. So können nach EVERSHEIM U.A. (1999) bei der Entwicklung von Drehgestellen von Schienenfahrzeugen durch die Einführung von 3D-CAD und Digital Mock-Up 15% der Konstruktionsstunden eingespart und die Durchlaufzeiten um rund 20% verkürzt werden. Ein anderes Beispiel geben EBBESMEYER U.A. (1999). Durch die Nachbildung einer Kraftwerksanlage im Rechner konnte zum einen das üblicherweise angefertigte Kunststoffmodell im Maßstab 1:25 eingespart werden. Ein einziges dieser realen Modelle verursacht Kosten in Höhe von 5 Millionen US-Dollar. Zusätzlich konnte das Design Review durch den Einsatz des virtuellen anstatt des realen Modells von fünf auf zwei Tage gekürzt werden. Innerhalb eines Design Reviews werden

fachgruppenübergreifend Konstruktionsalternativen erörtert und die Stimmigkeit verschiedener Teilmodelle untereinander geprüft.

Beide Untersuchungen konzentrieren sich auf das sogenannte „Virtuelle Produkt“ (vgl. SPUR & KRAUSE 1997, S. 3). Im einen Fall ist dieses Produkt ein Drehgestell im anderen eine Kraftwerksanlage. Zu einer umfassenden virtuellen Modellierung muss jedoch auch die Produktion miteinbezogen werden. Vor diesem Hintergrund definieren REINHART U.A. (1999B) den Begriff der „Virtuellen Produktion“ als die durchgängige Planung, Validierung und Steuerung von Produktionsprozessen und -anlagen mit Hilfe digitaler Modelle. Handlungsbedarf sehen die Autoren zum einen in der Weiterqualifikation der Planungswerkzeuge und Simulationsverfahren auf allen Ebenen, sei es die Fabrik-, Anlagen oder Detailprozessplanung. Zum anderen wird die Notwendigkeit der Systemintegration betont. Dies betrifft sowohl die Verknüpfung der einzelnen CA-Technologien als auch die Einbindung in die Geschäftsprozesse der Unternehmen.

Wie wichtig die gemeinsame Betrachtung von virtuellem Produkt und virtueller Produktion ist, wird aus einer in NEUGEBAUER (2000) dargestellten Untersuchung deutlich. Demnach geben 92% der befragten Unternehmen die mangelnde montagegerechte Produktgestaltung als Haupthemmnis für den Einsatz von Automatisierungstechnik an. Da der Einsatz von Automatisierungstechnik jedoch zur Senkung der Montagekosten beitragen kann, wird hier auf ein entsprechendes Rationalisierungspotential verzichtet.

Während 3D-CAD-Systeme und Systeme zur Modellierung von digitalen Fabriken bereits verfügbar und für sich produktiv einsetzbar sind, stellt sich die Frage, weshalb die Systeme in Kombination in Unternehmen noch nicht wirkungsvoll eingesetzt werden. Eine mögliche Antwort geben REINHART & FELDMANN (1997). Im Rahmen einer Umfrage unter deutschen produzierenden Unternehmen wurden Stand und Perspektive der Simulationstechnik ermittelt. Auf die Frage, was an Simulationswerkzeugen verbessert werden sollte, wünschten sich 50% eine verbesserte Bedienbarkeit der Systeme um die Modellerstellung zu vereinfachen. Mit Abstand an zweiter Stelle wurde die Notwendigkeit der Weiterentwicklung von Schnittstellen zu anderen Systemen mit 18% genannt.

1.2 Betrachtungsgegenstand & Zielsetzung

Basierend auf der dargestellten Situation ist es Ziel dieser Arbeit, aufzuzeigen wie ein Rechnerwerkzeug gestaltet sein muss, welches in einem Simultaneous Engineering Prozess zur konstruktionsbegleitenden Planung eines Montagesystems eingesetzt werden kann. Das Werkzeug soll ausschließlich die räumliche Anordnungs- und Prozessplanung erleichtern. Andere Planungsaspekte, wie beispielsweise die der Logistik, sind nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Das Montagesystem wurde deswegen als Planungsobjekt gewählt, da es wie oben dargestellt, noch Rationalisierungspotential in der Produktion bietet. Neben der üblichen Fokussierung auf die Automatisierungstechnik ist es jedoch von ebenso entscheidender Bedeutung, dass auch manuelle Bewegungsabläufe geplant werden können. Denn gerade in Montagesystemen mit kleinen Losgrößen und/oder hoher Variantenanzahl ist der Einsatz automatisierter Lösungen nicht wirtschaftlich (KUBA 1997, S. 1). Werden innerhalb eines Montagesystems sowohl manuelle als auch automatisierte Montageverrichtungen durchgeführt, so spricht man von einem Hybriden Montagesystem (SELIGER 1992).

Das Rechnerwerkzeug soll sich zum einen die Potentiale rechnergestützter Simulationsmodelle zu nutze machen. Zum anderen sollen jedoch die erkannten Schwächen behoben werden. So ist darauf zu achten, dass das System konstruktionsbegleitend eingesetzt werden kann. Analysen, die an dem virtuellen hybriden Montagesystem durchgeführt werden, sollen in der Konstruktionsphase verfügbar sein und das Produktdesign dadurch frühzeitig absichern. Da solche Verifizierungen in kurzen Abständen notwendig sein können, ist darauf zu achten, dass das Anlagenmodell schnell aufgebaut werden kann. Dazu können Planungsautomatismen hilfreich genutzt werden, welche Teilaufgaben algorithmisch lösen können und in kurzer Zeit eine Vielzahl von Lösungsalternativen generieren können. Für die Planung komplexer Montageabläufe wie z.B. manueller Bewegungen ist der Einsatz von fortgeschrittenen Bedientechniken zur Interaktion mit dreidimensionalen Simulationsmodellen zu prüfen. Diese ermöglichen im Gegensatz zu Planungsautomatismen die Nutzung der Erfahrung von Anlagenplanern und Anlagenbedienern. Durch die Kombination von automatisierter und interaktiver Vorgehensweise soll die Zeit zur Erstellung des Simulationsmodells deutlich reduziert werden.

1.3 Vorgehensweise

Der in Kapitel 2 dargestellte Stand der Technik soll aufzeigen, welche Methoden und Systeme heute verfügbar sind, um die komplexe Thematik der Montagesystemplanung zu unterstützen. Aufgeteilt in Planungsobjekt, –methode und –werkzeuge werden Stärken und Defizite dargestellt und daraus die Anforderungen an das zu entwickelnde System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen abgeleitet.

Darauf aufbauend erfolgt in Kapitel 3 die Entwicklung des Konzeptes für das System. Es erfolgt eine Unterteilung in einzelne Systembestandteile und die Definition von Anforderungen an die jeweiligen Bausteine.

Kapitel 4 beschreibt den ersten Baustein: das Teilsystem zum Grundaufbau des Layouts eines Montagesystems. Mittels anordnungsdefinierender Features und Strukturinformationen erfolgt die erste Zusammenstellung der Betriebsmittel und Produktteile zu einem räumlichen Layout.

Daraufhin wird, wie in Kapitel 5 dargestellt, die Prozessplanung für die durchzuführende Montageaufgabe durchgeführt. Unter Verwendung von impliziter Offline-Programmierung und Einsatz von VR-Technologie erfolgt die Modellierung automatisierter und manueller Montageabläufe.

Die Analyse dieser Abläufe ist Basis für die in Kapitel 6 dargestellte Anordnungsoptimierung des Layouts.

In Kapitel 7 wird die Anwendung des Gesamtsystems anhand einiger ausgewählter Beispiele aus der Montagesystemplanung dargestellt und analysiert.

Kapitel 8 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die vorliegende Arbeit. Die erzielten Fortschritte werden ebenso aufgezeigt wie Möglichkeiten zur Erweiterung des Systems.

2 Stand der Technik

2.1 Übersicht

Um die Montagesystemplanung zu verbessern, werden effektive Methoden zur Gestaltung des Planungsprozesses erforscht. Parallel dazu werden Rechnerwerkzeuge entwickelt, die den Planungsprozess optimal unterstützen sollen. Die Entwicklung von Methoden und Werkzeugen erfolgt in der Regel eng verzahnt, da bestimmte Methoden dedizierte Werkzeuge voraussetzen und umgekehrt. Die entscheidende Methode zur Verkürzung der Planungszeit, das **Simultaneous Engineering**, setzt z.B. einen reibungslosen Datenaustausch zwischen den beteiligten Abteilungen – Konstruktion und Montageplanung – innerhalb eines Unternehmens voraus. Ansonsten wäre es nicht möglich oder nicht effizient, Zwischenergebnisse auszutauschen und somit eine Parallelisierung der Entwicklungsschritte Produktkonstruktion und Produktionsplanung zu erreichen. Weitergehende Ansätze, wie das **Cooperative Engineering** oder **Collaborative Engineering**, bedingen den reibungslosen Datenaustausch über Standort- und/oder Unternehmensgrenzen hinweg.

Zur räumlichen Planung von Montagesystemen stehen dem Montageplaner mehrere Systemgattungen rechnerunterstützter Werkzeuge zur Verfügung. **Montageplanungssysteme** unterstützen die Erstellung von Ablaufstrukturen, die Ermittlung der benötigten Betriebsmittel und stellen Möglichkeiten zur Kostenermittlung zur Verfügung. Eine Detaillierungsstufe tiefer sind Werkzeuge zur räumlichen Planung der Montagesysteme angesiedelt. Ziel ist dabei die detaillierte Ausgestaltung sowohl der Montageprozesse als auch der räumlichen Anordnung des Montagesystems. In diesem Umfeld trifft man in der Regel auf drei wesentliche Schlüsselwörter: 3D-Simulation, Virtual Reality und Digital Mock-Up. Diese Begriffe stehen jeweils für eine bestimmte Gattung von Softwarewerkzeugen, mit denen digitale Modelle von Produkten und Produktionsanlagen erstellt und analysiert werden können.

Während **3D-Simulationssysteme** Wert auf einen hohen funktionellen Anteil zur Gestaltung automatisierter und manueller Arbeitsplätze legen, kommt es bei **VR-Systemen** insbesondere auf die Vereinfachung der Bedienung im virtuellen Raum an. Sogenannte DMU-Tools (**Digital-Mock-Up**) ermöglichen grundsätzliche Aussagen zur Montierbarkeit

eines Produktes und sollen die Verwendung physikalischer Prototypen gänzlich unnötig machen. Anhand der Untersuchung von Eigenschaften und Anwendungsfällen verschiedener solcher Softwarewerkzeuge werden Anforderungen an das zu konzipierende Rechnerwerkzeug abgeleitet.

Im folgenden wird mit Bezug zur Aufgabe der Montagesystemplanung der Stand der Technik bezüglich des Planungsobjektes, der Planungsmethode und der Planungswerkzeuge dargestellt. Da die Zielsetzung der Arbeit in der Entwicklung eines Werkzeuges zur Montagesystemgestaltung liegt, wird schwerpunktmäßig der Bereich der Planungswerkzeuge beleuchtet. Für eine angepasste Systementwicklung ist es jedoch unerlässlich, auch das Planungsobjekt an sich und verfügbare Planungsmethoden darzustellen.

2.2 Flexible Montagesysteme

Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Arbeit sollen flexible Montagesysteme sein (Bild 2-1). Der Begriff „flexibel“ ist in diesem Zusammenhang doppelt belegt. Zum einen sollen verschiedene Produktvarianten innerhalb eines Montagesystems montiert werden können. Zum anderen soll durch geeignete Maßnahmen auch die Stückzahl variabel gehalten werden (DÜRRSCHMIDT 1999, WESTKÄMPER U.A. 2001, S. 3-8). Diese Art von Montagesystemen wird in Unternehmen zunehmend eingesetzt, um der erhöhten Variantenvielfalt bei gleichzeitig kürzer werdender Produktlebensdauer und sinkender Losgröße zu begegnen. Nach NEUGEBAUER (2000) wird diese Entwicklung von 95,6% aus 159 befragten Herstellern erwartet, welche Automatisierungstechnik in den Technologiefeldern Robotertechnik, Montagetechnik, Materialflusstechnik, Verpackungstechnik, Steuerungs- und Regelungstechnik sowie Sensortechnik entwickeln.

Eine Teillösung des Problems der flexiblen Gestaltung eines Montagesystems liegt in der Modularisierung und Hybridisierung (FICHTMÜLLER 1996, LOTHER U.A. 1998, SPATH & BAUMEISTER 2000, WESTKÄMPER 2001). **Modularisierung** bedeutet, dass einzelne Montageoperationen auf Montagemodule verteilt werden. Diese Montagemodule können durch die Verwendung standardisierter mechanischer und elektrischer Schnittstellen schnell ausgetauscht werden und tragen dadurch zur Verkürzung der durch Produktmix oder Änderung der Ausbringungsmenge verursachten Rüstzeiten bei. Gleichzeitig können durch Wiederverwendung einzelner Module nach Stilllegung einer

Montagestation die Investitionskosten verringert werden (WEULE & SCHMÄLZLE 1999). Während das Grundgerüst des Montagesystems über einen Zeitraum von mehreren Jahren abgeschrieben werden kann, können produktspezifische Module in wirtschaftlich sinnvollerer Zeiträumen getrennt behandelt werden (GRUNDLER 2000). **Hybridisierung** bedeutet, dass innerhalb einer Montageanlage Tätigkeiten teils automatisiert, teils manuell durchgeführt werden. Eine Vielzahl grundlegender Arbeiten beschäftigen sich mit der Thematik hybrider Montagesysteme und zeigen auf, dass die Integration hybrider Systeme in das industrielle Umfeld wirtschaftlich sinnvoll ist (KÖGEL 1993, SELIGER & BARBEY 1992). Zum Thema der Systemgestaltung werden unterschiedliche Ausprägungen hybrider Montagesysteme sowie Integrationsformen manueller Arbeitsplätze aufgezeigt und analysiert (ERICSSON U.A. 1994, HANK 1991, HIDDE & ZÖLLNER 1992). Es wird zudem betont, dass der Mitarbeiter in einem Montagesystem nicht als reiner Kostenfaktor zu betrachten ist, sondern einen entscheidenden Beitrag zur Flexibilisierung des Gesamtsystems leistet (ROSSKOPF 2001).



Bild 2-1: Beispiel für ein flexibles Montagesystem (Foto: iwb)

Die zwei wesentlichen Merkmale von flexiblen Montagesystemen, die im weiteren Verlauf der Betrachtungen beachtet werden müssen sind daher:

- Strukturierter Aufbau von Montagesystemen mittels Modultechnik
- Manuelle und automatisierte Tätigkeiten innerhalb eines Systems, auch im Wechsel

2.3 Montageplanungsmethode

Die Montageplanung hat die Aufgabe, ausgehend von einem Montageproblem ein System zu entwickeln, mit dem es unter den gegebenen Bedingungen möglich ist, Einzelteile oder Baugruppen zusammenzufügen (SCHÄFER 1992, S. 10). Die Montageplanung umfaßt dabei mehrere Planungsphasen mit einer Vielzahl an Aktivitäten. Funktional lassen sich diese Aktivitäten in die folgenden vier Bereiche einteilen (LINDERMAIER 1998, S. 35ff):

- Analyse von Produkt und Randbedingungen
- Grob- und Feinplanung des Montageablaufs
- Anordnung, Konfiguration, Auswahl und Detaillierung von Betriebsmitteln sowie
- Kontinuierliche Lösungsbewertung und –auswahl

Diese vier Bereiche werden von verschiedenen Autoren weiter detailliert. LINDERMAIER nennt zwei Hauptdefizite der existierenden Ansätze. Zum einen werden Realisierungs-, Inbetriebnahme- und Betriebsphasen ungenügend berücksichtigt, obwohl erst in diesen Phasen eine Erfüllungsgradmessung der ursprünglichen Planziele vorgenommen werden kann. Zum anderen wird die fehlende Ausnutzung von Optimierungspotentialen beim Einsatz von simulierten Montagesystemen bemängelt.

Neben der detaillierten Auflistung der im Rahmen der Montageplanung notwendigen Aktivitäten ist die zeitliche Abfolge der Aktivitäten von erheblicher Bedeutung. In der Optimierung dieser Abfolge steckt erhebliches Rationalisierungspotential. Die Ausnutzung dieses Potentials ist Ziel des Simultaneous Engineering (SE, auch Concurrent Engineering). Nach LINCKE (1995) ist Simultaneous Engineering eine Methode der Arbeitsorganisation, bei der von Beginn der Produktentstehung an alle betroffenen Bereiche parallel in sich überlappenden Tätigkeiten zusammenarbeiten und auf diese Weise rechtzeitig ihr spezifisches Wissen einbringen. Wie aus dieser Definition hervorgeht, ist SE ein genereller Ansatz zur Verbesserung von

Entwicklungsprozessen. SE findet deswegen Anwendung auf mehreren Ebenen. KÜHNLE & GALLOS (1999) beschreiben z.B. wie durch Einsatz von SE in der Fabrikplanung Entwicklungszeiten verkürzt und die Qualität des Planungsergebnis verbessert werden kann. Als wesentliche Stütze des SE-Prozesses wird auch hier der Einsatz von Simulationswerkzeugen angesehen. KIM U.A. (1996) betrachten die Auswirkung von Concurrent Engineering auf die Zusammenarbeit bzw. das Ineinandergreifen von Konstruktion und Montageplanung. In Weiterführung der „Design for Assembly“ Methodik (BOOTHROYD & DEWHURST 1989) sehen sie die Notwendigkeit, dass die Montageplanung ein essentieller Bestandteil des Konstruktionsbewertungsprozesses wird.

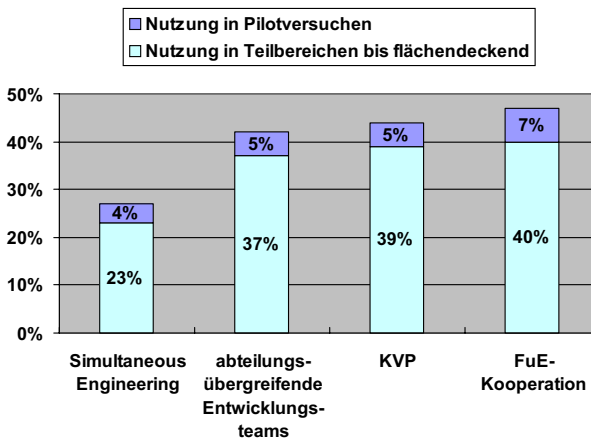


Bild 2-2: Verbreitung auf Produktinnovationen zielender Elemente neuer Produktionskonzepte (LAY 1998)

Die Bedeutung von Simultaneous Engineering für Unternehmen unterstreichen die von LAY (1998) dargestellten Ergebnisse einer Umfrage unter 1305 Betrieben der Investitionsgüterindustrie. Die Umfrage sollte ermitteln, in welchem Zusammenhang der Innovationsgrad von Produkten und der Einsatz neuer Produktionskonzepte wie SE stehen. Obwohl hier der SE-Prozess mit 27% bei weit weniger Betrieben etabliert ist als andere innovationsorientierte Verbesserungsmaßnahmen (Bild 2-2), ist der Anteil

der Betriebe mit Produktinnovationen, die SE einsetzen mit, 80% der höchste (Bild 2-3).

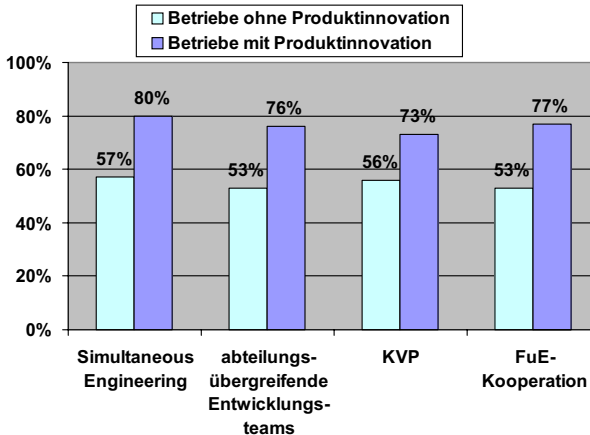


Bild 2-3: Anteil von Betrieben mit Produktinnovationen in Abhängigkeit des Einsatzes neuer Produktionskonzepte (LAY 1998)

Dies zeigt, dass Simultaneous Engineering als Maßnahme zur Steigerung der Produktion innovativer Produkte noch unterschätzt wird. Die Erfolge der Unternehmen, die SE einsetzen, lassen jedoch gleichzeitig erwarten, dass SE eine weit höhere Verbreitung finden wird.

Die Effizienz von SE zu verbessern ist Ziel des Sonderforschungsbereichs 336 (MILBERG U.A. 1997). Durch den Einsatz von Rechnerwerkzeugen (z.B. Virtual Prototyping Tools) wird hier die Parallelisierung von Phasen der Konstruktion und Montageplanung ermöglicht. Diese Idee wird weiter detailliert, indem sogenannte Prozessbausteine eingeführt werden (LINDEMANN U.A. 1999). Im Gegensatz zu Vorgehensplänen für die Konstruktion (vgl. VDI-RICHTLINIE 2221 1993) oder geschlossenen Systematiken (vgl. BULLINGER 1986) beschreibt diese Methodik innerhalb eines integrierten Prozessbausteins (Bild 2-4) die zu generierenden Informationen und abzusichernden Eigenschaften, bezogen auf Produkt, Montagevorgang und –anlage zugleich. Dadurch soll erreicht werden, dass innerhalb des komplexen Netzwerkes aus Randbedingungen, welche

Konstruktion und Montageplanung vorgeben, ein Gesamtoptimum hinsichtlich Produkteigenschaften und produktionsrelevanter Zielgrößen erreicht wird. Die insgesamt ca. 80 erarbeiteten Bausteine werden nach entsprechend definierten Vernetzungsregeln zu einem integrierten Prozessplan für die Produkt- und Produktionsentwicklung konfiguriert (REINHART U.A. 2000). Da in den Bausteinen unternehmens- und projektspezifische Anpassungsmöglichkeiten vorgesehen sind, ist eine generelle Anwendbarkeit der Methodik gewährleistet. Die Umkonfigurierung des Bausteinnetzwerks zur Projektlaufzeit ist gleichermaßen berücksichtigt. Die Methode unterstützt damit die geforderte Wandlungsfähigkeit von Entwicklungsorganisationen und –prozessen, die für Produktionsunternehmen unerlässlich ist.

Die wesentlichen Merkmale der Montageplanungsmethodik, die im weiteren Verlauf der Betrachtungen beachtet werden müssen sind daher:

- Beachtung der Realisierungsphase des Montagesystems
- Ausnutzung des Optimierungspotentials virtueller Montagesysteme
- Unterstützung des Simultaneous Engineering Prozess
- Klare Definition von Ein- und Ausgangsdaten für einzelne Planungsschritte um leichte Konfigurierbarkeit und damit Wandlungsfähigkeit zu erreichen

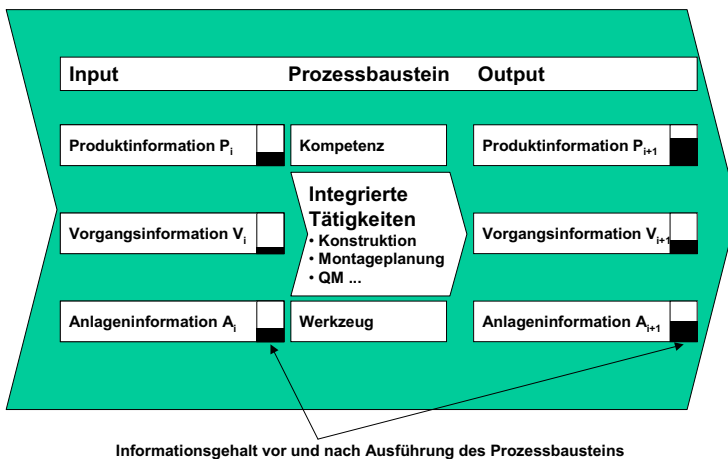


Bild 2-4: Prozessbaustein nach REINHART & GRUNWALD (2000)

2.4 Planungswerkzeuge zur Montagesystemgestaltung

2.4.1 Übersicht

Um die im vorigen Kapitel dargestellten innovativen Methoden zur optimierten Produkt- und Prozessentwicklung zu ermöglichen, werden rechnergestützte Werkzeuge benötigt (EVERSHEIM & SCHENKE 1999, BLEY & FRANKE 2001). Diese ermöglichen zum einen den geforderten integrierten Entwicklungsprozess, bei dem es zu ständigem Datenaustausch zwischen Konstruktion und Montageplanung kommt. Zum anderen ermöglichen diese Werkzeuge die effiziente Lösung von als Prozessbaustein formulierten Teilaufgaben der Montagesystementwicklung.

Zunächst werden einzelne Technologien betrachtet, welche die Erstellung und Analyse dreidimensionaler Simulationsmodelle erleichtern sollen. Im Anschluss daran wird eine Übersicht der Rechnerwerkzeuge gegeben, welche sich diese Technologien einzeln oder in Kombination zu Nutze machen, um die Montagesystemplanung zu unterstützen.

2.4.2 Technologien zur Modellierung und Bewertung von 3D-Simulationsmodellen

Entsprechend des Anspruchs der vorliegenden Arbeit, die Gestaltung von hybriden Montagesystemen durch effiziente Rechnerunterstützung zu vereinfachen, werden die folgenden vier Technologien betrachtet:

- Offline-Programmierung von Industrierobotern
- Modellierung und Analyse von manuellen Montagetätigkeiten
- Einsatz von Virtual-Reality-Komponenten zur Verbesserung der Interaktion
- Planungsautomatisierung zur Effizienzsteigerung des Gesamtplanungsprozesses

2.4.2.1 Offline-Programmierung von Industrierobotern

Nach KUGELMANN (1999), S. 5ff kann zwischen drei Prinzipien der Offline-Programmierung von Robotern unterschieden werden. Bei der **textuellen Programmierung** wird der Programmcode durch direktes

Editieren erzeugt. Dies erfordert jedoch eine genaue Kenntnis aller Eigenschaften der Roboterkinematik (z.B. Stellungsparameter). Beim **Teach-In** wird der Roboter in die gewünschte Stellung bewegt und diese im Ablaufprogramm abgespeichert. Diese Technik wird sowohl bei der Programmierung am realen Roboter verwendet, als auch bei der Verwendung eines rechnergestützten Robotersimulationssystems. Letztere Technik wird auch als Offline-Programmierung bezeichnet, da der Betrieb des realen Roboters dadurch nicht behindert wird (HESSELER 1994). Für diese Art der Programmierung ist bereits deutlich weniger Spezialisten-Know-How notwendig. Die fortgeschrittenste Art der Roboterprogrammierung stellt die **aufgabenorientierte Programmierung** dar. Dabei werden prozessorientierte Teilaufgaben in einer Hochsprache formuliert (z.B. „Greife Teil A“). Durch Algorithmen werden daraus dann Roboterpositionen und –stellungen berechnet, welche die Robotersteuerung benötigt, um den gewünschten Bewegungsablauf anzusteuern.

Während textuelle und Teach-In Programmierung sich fest in den Betrieben etabliert haben (vgl. Abschnitt 2.4.3.2, auch HERKOMMER U.A. 1991) erfordert die komplexe Thematik der aufgabenorientierten Programmierung noch einiges an Forschungs- und Entwicklungsarbeiten (HEß 1994). Im folgenden Überblick werden deshalb nur solche Arbeiten berücksichtigt, welche die aufgabenorientierte Programmierung zum Ziel haben.

Bezogen auf den vorliegenden Anwendungsfall der Planung von Montagevorgängen wurden einige Technologien entwickelt, welche die drei Teilvorgänge einer Handhabungsaufgabe in Roboterprogramme umsetzen sollen. Diese drei Teilvorgänge (vgl. Bild 2-5) sind nach HÖRMANN & HÖRMANN (1990):

- Greifvorgang
- Transfer
- Ablegevorgang

Während einige Arbeiten (DINI 1993, BICKENDORF 1994, WÖRN U.A. 1998, SUN 1998) sich mit der Lösung von Teilproblemen der Handhabungsaufgabe beschäftigen, existieren ebenso Ansätze (LOZANO-PÉREZ U.A. 1989, REINISCH 1992, Lüth 1993, WEEKS 1997, KUGELMANN 1999), die den Handhabungsvorgang als Ganzes im Fokus haben. DILLMANN U.A. (1999) verfolgen den Ansatz, den Montagevorgang durch Demonstration zu programmieren. Das bedeutet, dass ein Bediener die

Aufgabe vorführt und ein Roboter gestützt durch entsprechende Sensorik, die Aufgabe aufnimmt, analysiert und in ein Ablaufprogramm umsetzt. Um die generierten Programme robust in einer Montagestation ablaufen zu lassen, kommen Verfahren zur automatischen Zellenkalibrierung zum Einsatz (KUGELMANN 1999, BLEY U.A. 2001). Dadurch werden die im Rechner modellierten Stationen mit den realen Aufbauten abgeglichen. HIRZINGER U.A. (1999) erreichen durch Einsatz von Kraft- und Momentensensorik im Roboter, dass das Handhabungsgerät selbst robuster gegenüber Lageabweichungen reagieren kann.

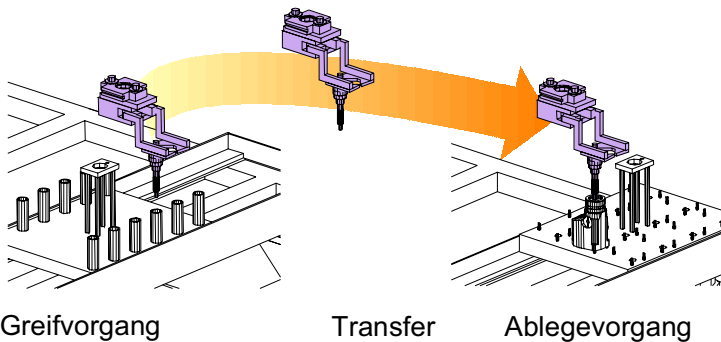


Bild 2-5: Aufbau eines Handhabungsvorgangs nach HÖRMANN & HÖRMANN (1990)

Allen Ansätzen ist gemein, dass sie die Programmierung eines Roboters grundsätzlich vereinfachen und effizienter gestalten. Was die Ansätze jedoch nicht leisten, ist die Verbindung zur Layoutplanung. Es wird weder berücksichtigt, dass die Auswahl der Betriebsmittel den Prozess beeinflussen kann, noch wie durch Änderung der Layoutanordnung der Prozess verbessert werden kann.

2.4.2.2 Simulation manueller Montagetätigkeiten

Neben den automatisierten Montagevorgängen spielen wie in Kapitel 2.2 bereits dargestellt, manuelle Montageaufgaben eine entscheidende Rolle im Fertigungsprozess.

Ebenso wie für die Programmierung von Robotern wurden rechnergestützte Werkzeuge entwickelt, welche die Modellierung (z.B.

WILEY & HAHN 1997) und Analyse dreidimensionaler menschlicher Bewegungsabläufe erleichtern sollen. Unter den zahlreichen virtuellen Menschmodellen (Übersichten z.B. in: GEYER 1997 S. 24 und BAUER 1997 S. 151ff) sind im industriellen Einsatz im wesentlichen die Modelle JACK, RAMSIS, ANTHROPOS, eM-Human (ehemals ROBCAD/Man oder AnyMAN) zu finden. Diese Modelle, die früher z.T. unter anderen Bezeichnungen entwickelt wurden, seien im folgenden kurz charakterisiert.

JACK (BADLER U.A. 1993, BADLER 1997)

Das Modell JACK besteht aus 37 Körpersegmenten und 88 Gelenk-Freiheitsgraden. Es existieren Stand-Alone-Systeme basierend auf JACK, aber auch Integrationen in CAD- und Animationssysteme. Konzipiert als echtzeitfähiges Modell können Parameter wie Geschlecht oder Körpergröße vor der eigentlichen Simulation festgelegt werden. Zu den Modellierungsfunktionen zählt die Berechnung von stabilen Körperhaltungen basierend auf zu definierenden Haltepunkten für bestimmte Gliedmaßen. Aber auch Bewegungsabläufe wie Gehen sind parametrierbar. Die Bewertungsmethoden umfassen Analysen zur Reichweitenüberprüfung, Sichtbereichs- und Kollisionsprüfung. Die Analyse von Kraft- und Belastungssituationen ist für statische Fälle möglich.

RAMSIS (SEIDL 1994)

Das Modell RAMSIS wird in Zusammenarbeit der Fa. TECMATH, der TU München und Vertretern der deutschen Automobilindustrie entwickelt. Der Einsatzschwerpunkt ist die Analyse der Sitzposition einer Person im Fahrgastraum eines Automobils. Die Anforderung liegt hier eher auf der Genauigkeit der berechneten Sitzposition als auf der Echtzeitfähigkeit. So kann die Berechnung einer Position durchaus mehrere Minuten beanspruchen. Die Analysen beziehen sich dementsprechend auf statische Positionen und umfassen Erreichbarkeit, Sichtbereich und Komfortanalysen.

ANTHROPOS (RÖBLER & LIPPMANN 1997)

Auch das Modell ANTHROPOS wurde ursprünglich im universitären Umfeld entwickelt. Haupteinsatzzweck ist die Ergonomieanalyse von Produkten und Arbeitsplätzen. Bei diesem Modell wurde verstärkt Wert darauf gelegt, dass das Aussehen des simulierten Menschen möglichst gut dem realer Personen entspricht. Im Rahmen der Erstellung von Arbeitsanweisungen ist dies z.B. notwendig, um eine entsprechende

Akzeptanz bei der Zielgruppe der Anweisungen zu erhalten. Unter dem Namen VirtualANTHROPOS ist die Erweiterung des Menschmodells um VR-Technologien bekannt. Anwendungsgebiet ist hier die ergonomische Gestaltung von Arbeitsplätzen.

eM-Human (KUMMETSTEINER 1994, DEITZ 1995)

Das Modell eM-Human wurde von Anfang an für den Einsatz innerhalb der simulierten Umgebung eines Produktionsszenarios konzipiert. Die Modellierung und Analyse erfolgt stets im Kontext mit allen anderen Gegenständen am Arbeitsplatz (z.B. Betriebsmittel, Hilfseinrichtungen). Dementsprechend können auch erweiterte Informationen von Betriebsmitteln (z.B. Greifframes) verwendet werden, um die Haltungs- und Bewegungsmodellierung zu vereinfachen. Neben den gängigen Verfahren zur Ergonomieanalyse wird auch die MTM-Methode zur Zeitanalyse angeboten.

2.4.2.3 Virtual Reality Komponenten

Im folgenden seien kurz die wichtigsten heute eingesetzten Komponenten der VR-Technologie, unterteilt in Ausgabe- und Eingabemedien, aufgeführt (KALAWSKI 1994).

Ausgabemedien

Die minimale Ausstattung um einen dreidimensionalen Ausgabeeffekt einer virtuellen Szene zu erzielen ist die Verwendung von sog. **Stereobrillen**. Ausgeführt als aktive oder passive Medien ermöglichen sie es, den dreidimensionalen Eindruck schon mittels eines einfachen Computermonitors zu erzielen. Durch Projektion der virtuellen Szene auf eine oder mehrere Großprojektionssysteme entstehen Ausgabeeinheiten die als **Workbench** (1 oder 2 Projektionsflächen) oder **CAVE** (4 – 6 Projektionsflächen in Würfelanordnung) bezeichnet werden. In Verbindung mit Großprojektionen ist ein ermüdungsfreies Arbeiten auch für längere Zeit möglich, da der Benutzer nach wie vor die reale Umgebung wahrnehmen kann. Nachteile ergeben sich prinzipbedingt dadurch, dass reale Gegenstände zwischen Projektionsfläche und Augen gelangen können und dadurch unerwünschte Überdeckungseffekte auftreten können.

Alternativ eignet sich der Einsatz von sog. **Head Mounted Displays** (HMD, auch Datenhelm) zur dreidimensionalen Darstellung des Simulationsmodells. Der Benutzer setzt dabei einen Helm auf, in dem direkt vor den Augen zwei kleine Projektionsmedien eingearbeitet sind.

Da der Benutzer hier nur noch die virtuelle Szene sieht, ergeben sich keine Überdeckungsprobleme. Ebenso kann er sich komplett in der virtuellen Szene bewegen, was ansonsten nur mit einer 6-seitigen CAVE möglich wäre. Der Nachteil besteht darin, dass durch den Verlust des Realitätsbezugs bedingte Gleichgewichtsstörungen auftreten können. Diese und andere unter dem Stichwort „Simulatorkrankheit“ zusammengefasste Phänomene sind seit längerem Gegenstand arbeitswissenschaftlicher Untersuchungen (FALTER 1993).

Neben diesen optischen Ausgabemedien kommen zunehmend sog. haptische Ausgabemedien zum Einsatz. Diese ermöglichen es, Kraft- und Momenteneindrücke an den Benutzer zurückzumelden. Die meisten dieser Systeme weisen einen beschränkten Arbeitsbereich auf und sind deswegen hauptsächlich für den Desktop-Betrieb geeignet. Als problematisch erweist sich hier die echtzeit-gerechte Berechnung von Kräften und Momenten. Um einen realistischen Eindruck zu erzielen, müssen mit entsprechend vereinfachten Kontaktmodellen im 1000 Hz Rhythmus Kollisionsberechnungen durchgeführt werden (GREGORY U.A. 1999).

Eingabemedien

Als wesentliches Eingabemedien für VR-Umgebungen dienen sog. **Tracking-Systeme**. Durch magnetische oder optische Markierungen, die an Eingabeinstrumenten oder Körperteilen befestigt sind, kann die Position und Orientierung dieser Komponenten im Raum erkannt werden. Magnetische Systeme bieten den Vorteil, dass kein Sichtkontakt zwischen dem Messinstrument und der Markierung bestehen muss. Als nachteilig erweist sich der Einfluss von metallischen Gegenständen im Messfeld. Dadurch kann es zum einen zu statischen aber auch dynamischen Verzerrungen kommen, die zu Offsets oder Zittern der Messwerte führen. Optische Tracker sind demgegenüber unempfindlich müssen jedoch so angeordnet werden, dass zum Messinstrument (Kamera) Sichtkontakt bestehen muss. Das Problem kann durch Einsatz sich ergänzender Messpunkte etwas gemindert werden. Als weitere Gattung existieren mechanische Trackingsysteme die in der Regel einen vergleichsweise geringen Arbeitsraum aufweisen. Populäre Vertreter sind hier 3D-Mäuse (auch Spacemouse) oder aber auch Stabkinematiken (z.B. PHANTOM). Vorteil dieser Geräte ist die extrem hohe Genauigkeit in Verbindung mit der Stabilität der Messwerte. Darüber hinaus existieren noch Systeme, die nach dem Kreiselpinzip arbeiten und damit nur Orientierungen erfassen können, sowie Ultraschallsysteme zur Positionsbestimmung.

Um die menschliche Hand als natürliches Eingabemedium zu verwenden, wurde die Gattung der **Datenhandschuhe** (Data Glove) entwickelt. Mit unterschiedlicher Anzahl von Sensoren (bis zu 22 Stück pro Hand) werden die Fingergelenkwinkel gemessen und können von einer geeigneten Software zu Interaktionszwecken weiterverarbeitet werden. Die Verwendung eines Datenhandschuhs macht meist nur in Verbindung mit einem Trackingsystem Sinn, damit die Position und Orientierung der Hand im Raum erfasst und verarbeitet werden kann.

2.4.2.4 Ansätze zur Planungsautomatisierung

Neben den Entwicklungen aus dem VR-Bereich, welche die Benutzerinteraktion verbessern, werden parallel Methoden und Algorithmen entwickelt, mit denen Teile der Montageplanung automatisiert werden.

Zwei wesentliche Technologien lassen sich hier aus der Literatur mit Bezug auf die Montageplanung erkennen, welche im folgenden näher betrachtet werden sollen. Zum einen der Einsatz von Algorithmen zur Layout- und Prozessoptimierung. Zum anderen der Einsatz von Featuretechnologie zur Bestimmung von relativen Anordnungen z.B. von Betriebsmittel und Produktteil.

Einsatz von Optimierungsalgorithmen

Unter dem Begriff Optimierungsverfahren wurde eine Vielzahl von Algorithmen entwickelt, welche unterschiedlichste Anwendungsgebiete haben. Die im Zusammenhang mit Rechnerwerkzeugen interessante Klasse der „Numerischen Optimierungsverfahren“ wurde z.B. von Diess (1988) weiter unterteilt (vgl. Bild 2-6). Im Zusammenhang mit der Layout- und Prozessoptimierung geometrischer Situationen kommen zumeist die Verfahren ohne analytische Ableitung zum Einsatz.

FENTON U.A. (1992) beschreiben in einem Artikel die Verwendung von Optimierungsverfahren zur Taktzeitoptimierung einer Roboterstation. Als Optimierungsparameter wurde der Standort eines einzelnen Roboters verwendet. Es wurde lediglich die plane Verschiebung des Handhabungsgerätes erlaubt. Die Zielfunktion war die Ausführungszeit für eine vorgegebene Handhabungsaufgabe. Die Implementierung erfolgte auf Basis des Systems eM-Workplace (ROBCAD). In einer Analyse wurde ermittelt, dass die Differenz aus maximaler und minimaler Taktzeit lediglich 12,6% betrug. Dies legt den Schluss nahe, dass weitere Optimierungsparameter in die Rechnung Eingang finden sollten (z.B.

Orientierung des Gerätes), um den Optimierungsraum und damit auch die Spanne von maximaler und minimaler Taktzeit zu vergrößern.

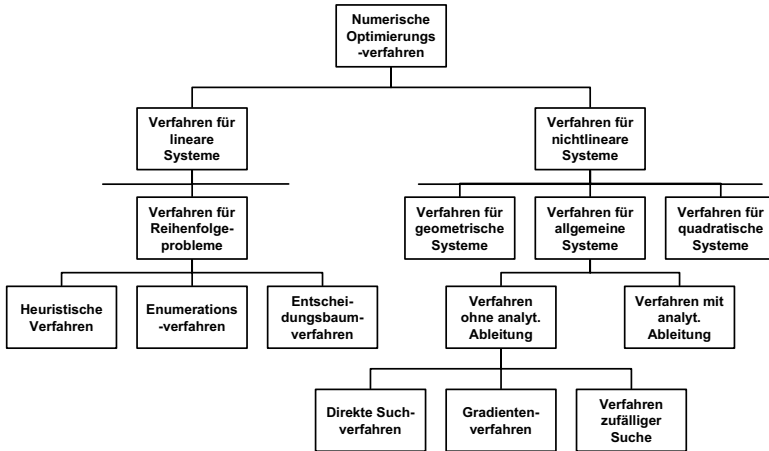


Bild 2-6: Einteilung numerischer Optimierungsverfahren nach DISS (1988)

WOENCKHAUS (1994) untersucht verschiedene numerische Optimierungsverfahren auf ihre Eignung für Planungsaufgaben im Rahmen der Montagesystemplanung. Der Autor analysiert den Einsatz der Verfahren zur Lösung von Anordnungsproblemen. Er kommt zu dem Schluss, dass Verfahren ohne Zufallsanteil (z.B. Hooke-Jeeves) zwar Lösungen mit gutem Zeitverhalten finden, jedoch nur mit einer geringen Wahrscheinlichkeit das globale Optimum. Dies resultiert aus dem extrem unstetigen Güterwertverlauf bei der betrachteten Problemstellung. Für diese Klasse der Problemstellungen haben sich in anderen Anwendungsbereichen die genetischen Algorithmen (GOLDBERG 1989, BÄCK & SCHWEFEL 1993) als geeignet erwiesen (VISSER U.A. 1996, STACHE 1997, EBLENKAMP 1996). Da während des Einsatzes genetischer Algorithmen (GA) jedoch wesentlich mehr Berechnungen der Zielfunktion durchgeführt werden müssen, erkauft man sich diesen Vorteil mit längeren Berechnungszeiten.

Mit Bezug zur Robotik wurden GAs erfolgreich z.B. zur Konfiguration von Roboterkinematiken eingesetzt. FARRITOR U.A. (1996) beschreiben,

wie eine aus Modulen zusammengesetzte Kinematik durch GAs automatisch für einen spezifischen Verwendungszweck konfiguriert werden kann. Da der Lösungsraum sehr groß sein kann, muss vor Einsatz der GAs entsprechend des Verwendungszweckes eine Vorauswahl getroffen werden. Nach dieser Vorauswahl können die GAs neben der Konfiguration des Roboters auch eine Bewegungsbeschreibung für die durchzuführende Aufgabe (z.B. eine Inspektionsaufgabe) erzeugen. CHEDMAIL & RAMSTEIN (1996) kombinieren die Konfiguration einer Roboterkinematik mit der Ermittlung des optimalen Standortes. Getestet wird die Algorithmen-Implementierung anhand einer einfachen Handhabungsaufgabe und einer roboterunterstützten Waschanlage für Flugzeuge. Für beide Fälle konnten Kinematikkonfigurationen und Standorte mittels genetischer Algorithmen ermittelt werden. Die Autoren zeigen auf, dass GAs gegenüber einer kompletten Zufallssuche effizienter sind.

BARRAL U.A. 1999 sehen für ihren Anwendungsfall des robotergestützten Punktschweißens Vorteile für die Methode des Simulated Annealing (METROPOLIS U.A. 1953). Als Grund dafür wird angeführt, dass diese Methode nur wenige Bewertungszyklen benötigt, um ein gutes Ergebnis zu erzielen. Angewendet wurde die Methode auf die Problematik des robotergestützten Punktschweißens an einem Automobil. Neben der Standortoptimierung des Roboters wurde auch die Reihenfolge, in der die einzelnen Schweißpunkte angefahren werden, optimiert. Damit die Simulated Annealing Methode jedoch einsetzbar war, mussten von Hand Einschränkungen des Lösungsraumes durchgeführt werden. Ein direkter Vergleich mit genetischen Algorithmen wurde nicht durchgeführt.

Einsatz von Featuretechnologie

Die Featuretechnologie findet schon seit längerer Zeit im CAD-Umfeld Verwendung (SPUR & KRAUSE 1997, S. 175ff). Ursprünglich war die Featuretechnologie dazu gedacht, Operationen aus dem Bereich der Fertigungsplanung und NC-Programmentwicklung den geometrischen Ausprägungen des CAD-Modells zuzuweisen. Aber auch der umgekehrte Weg, die Ermittlung von Features anhand von technischen Zeichnungen, wird beschrieben (GRABOWSKI U.A. 1997). Durch die ermittelten Features ist der Aufbau eines Produktmodells möglich, sowohl in Form von Strukturinformation als auch eines räumlichen Rechnermodells.

Der Begriff wird zwischenzeitlich jedoch weiter gefasst und findet auch im Rahmen der Roboterprogrammierung (BICKENDORF 2000) und Montageprozessplanung Verwendung (HUCK 1990). Dementsprechend

allgemein ist auch die aktuelle Definition eines Feature nach VDI-RICHTLINIE 2218 (1999). Demnach ist ein Feature eine Aggregation von Geometrieelementen mit Semantik. KAISER (1997) schlägt entsprechend die Verwendung von Features zur vernetzten Entwicklung von Produkt und Produktionsprozess vor. Durch ein gemeinsames featurebasiertes Produktmodell lässt sich demnach die Zusammenarbeit zwischen Konstruktion, Arbeitsplanung und Fertigung deutlich verbessern. Nach REINHART & KRESS (2000) besteht der Nutzen der Featuretechnologie in der Verknüpfung von Geometrieelementen mit Eigenschaften aus anderen Modellsichten. Im vorliegenden Fall entspricht die Montageplanung dieser anderen Modellsicht.

MATTHES U.A. (1997) beschreiben ein Konzept der featureorientierten Produktbeschreibung zur konstruktionsbegleitenden Montageplanung. Sogenannte Komplex-Features beschreiben dort die montage-technischen Zusammenhänge von Produktteilen. Hier sind Parallelen erkennbar zu den bereits beschriebenen Methode der impliziten Offline-Programmierung. Der Schwerpunkt liegt jedoch auf Seiten der Klassifizierung möglicher technischer Gestaltungselemente (Verbindungen, Drehbewegungselemente, ...) und deren Auswirkung auf den geometrischen Montageverlauf der Produktteile. Eine Einbeziehung der ausführenden Ressourcen (Roboter, Mensch) findet nicht statt.

JAYARAM U.A. (1997) beschreiben, wie die Interaktion in einem VR-System vereinfacht werden kann, indem geometrische Randbedingungen aus dem CAD-System berücksichtigt werden. Beispiele für solche Randbedingungen nennen KIM U.A. (2000). Während der Interaktion mit Objekten in der VR-Umgebung werden fortlaufend Zusammenbauinformationen überprüft (z.B. Position eines Stiftes in einer Bohrung). Sobald eine geometrische Randbedingung (z.B. Symmetrieachsen von Stift und Bohrung fluchten) erfüllt ist, ist eine Bewegung nur noch unter Einhaltung dieser Randbedingung möglich. Dies erleichtert die präzise Platzierung von Objekten im virtuellen Raum wesentlich. Als problematisch erweist sich, zu erkennen, ob die Randbedingungen eingehalten sind. Für den praktischen Einsatz ist es notwendig, dass die Randbedingung auch erkannt wird, wenn sie lediglich „fast“ erfüllt ist, da es aufgrund der Ungenauigkeit von Ein- und Ausgabemedien nicht möglich ist, z.B. Symmetrieachsen exakt aufeinander zu platzieren. Ähnliche Ansätze werden von verschiedenen anderen Autoren verfolgt. GUPTA U.A. (1998) verwenden diese Technologie z.B. um den Montageablaufplan zu generieren. Sie sehen dabei auch bereits die Notwendigkeit der Einbettung des Systems in den Gesamtmontageplanungsprozess. JUNG

& WACHSMUTH (1998) benutzen die Technologie, um einzelne Bauteile mittels natürlichsprachiger Anweisungen (z.B. „Stecke Stift in Bohrung“) zu montieren.

2.4.3 Rechnergestützte Werkzeuge zur Montagesystemplanung

Nach der detaillierten Darstellung verfügbarer Technologien zur Modellierung und Analyse dreidimensionaler Planungsinhalte sollen im folgenden Systeme dargestellt werden, welche für Teilaspekte der Montagesystemplanung eingesetzt werden.

Angesichts der Vielfalt der Systeme welche die Montageplanung auf unterschiedlichsten Ebenen unterstützen (z.B. HEGER 1998, S. 46ff), fällt eine generelle Klassifizierung schwer. Grob lassen sich zwei Klassen von Systemen erkennen. Die erste Gattung, die sogenannten Montageplanungssysteme, unterstützt vornehmlich Planungsaufgaben auf struktureller Ebene. Diese Systeme sollen insbesondere das Arbeiten mit komplexen Baugruppenstrukturen und daraus resultierenden umfassenden Montageprozessstrukturen vereinfachen. Trotz der Fokussierung auf Anlagen- und Prozessstrukturen ist es dabei wesentlich den Zusammenhang zur räumlichen Ausprägung der Planung zu erhalten. Deshalb sind diese Systeme üblicherweise mit der zweiten Gattung, den 3D-Simulationssystemen und VR-Systemen, gekoppelt. Diese ermöglichen räumliche Detailplanungen wie z.B. Offline-Programmierung, Bahnplanung und Bewertung manueller Bewegungsabläufe.

2.4.3.1 Montageplanungssysteme

Einen Überblick über den Entwicklungsstand der Montageplanungssysteme mit Schwerpunkt auf manuellen Montageprozessen gibt HEGER (1998), S. 34-47. Der Autor unterteilt hierbei in Systeme zur Modellierung, Bewertung, Analyse und integrierte Systeme. Für die Prozessmodellierung werden dabei verschiedene Ansätze diskutiert (unter anderem: ELMARAGHY & LAPERRIÈRE 1992, RICHTER 1991), die unter Verwendung der Feature-Technologie die Modellierung vereinfachen sollen. Diesen und auch anderen aktuelleren diskutierten Ansätzen (z.B. GUPTA U.A. 1998, JUNG U.A. 2000) ist gemein, dass Informationen, welche die räumliche Relativlage zweier Bauteile während des Montageablaufes beschreiben, in Form von Zusatzinformationen (z.B. Matrizen, Frames) mit den CAD-Modelle von Produkt oder Betriebsmittel assoziiert werden.

Heger kommt zu dem Schluss, dass Modellierungs- und Bewertungsmethoden der Planungssysteme sehr gut ausgeprägt sind. Er kritisiert jedoch die mangelnde Integration zu VR-Systemen, wodurch der räumliche Kontext bei der Planung ungenügend berücksichtigt wird.

Andere Autoren (ZHA 1999, ZHAO & MASOOD 1999) sehen den Hauptzweck der Montageplanung darin, die Montagereihenfolge eines Produktes zu definieren. Unter Verwendung von Expertensystemen und/oder Optimierungsalgorithmen soll basierend auf der Produktstruktur eine optimale Montagereihenfolge generiert werden. Jedoch ist die Montagereihenfolge nur ein Schritt von mehreren im Rahmen der Montageplanung. Laut einer Umfrage von AMMER (1982) deckt dieser Schritt lediglich 25% der Gesamtplanungsaufgabe ab. Die restlichen 75% entfallen auf Ablaufplanung (räumlich und strukturell), Auswahl von Fertigungsmitteln, Festlegen von Layoutstrukturen und Festlegen von Steuerstrategien für die Montageanlage (auch unter Berücksichtigung einer Variantenfertigung).

Im Rahmen der Entwicklung einer Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung betrachtet FELDMANN (1997) verschiedene Planungssysteme (u.a. COSEM, EMMA, ERGOMAS, IDAP). Es existierten bereits eine Vielzahl von Systemen, die auch bereits unterschiedliche Teilaufgaben der Montageplanung integrieren. Jedoch unterstützt keines der betrachteten Systeme den Aufbau eines kompletten rechnerinternen Modells der Montageanlage. Dadurch ist die Weiterverwendung von Planungsergebnissen sowohl innerhalb der Montageplanung als auch für den eigentlichen Betrieb der Anlage nur beschränkt möglich. CUIPER (2000) greift dieses Defizit auf und beschreibt in seiner Arbeit ein Planungssystem, dass die durchgängige Datenverwaltung von der Produktentstehung bis zur Inbetriebnahme zum Ziel hat. Eine ähnliche Zielsetzung verfolgen FELDMANN & COLOMBO (1999). Die Autoren beschreiben die Verwendung von Petri-Netzen als Grundlage zur Modellierung der Abläufe innerhalb eines Montagesystems. Der Fokus beider Arbeiten liegt jedoch auf Seiten der Strukturplanung und Anlagensteuerung und nicht auf der Unterstützung der dreidimensionalen Montageplanung.

Die Hauptforderungen für den effizienten Einsatz von Montageplanungssystemen sind demnach:

- Durchgängige Verwendung von Planungsergebnissen
- Beachtung des räumlichen Kontext der Planung

- Berücksichtigung der Akteure des Montagesystems (Werker, Roboter)
- Beachtung der Realisierungsphase des Montagesystems

2.4.3.2 3D-Simulationssysteme

Zur Systemklasse der 3D-Simulationssysteme findet sich eine Übersicht z.B. in KUGELMANN (1999), S. 6ff. Diese Systeme sind seit geraumer Zeit am Markt etabliert und nicht mehr wesentlicher Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten. Produkte mit den Namen eM-Workplace (ehemals ROBCAD), IGRIP, COSIMIR, SILMA und WORKSPACE sind heutzutage im täglichen industriellen Einsatz zu finden. Anwendungsgebiete sind u.a. die virtuelle Montage- und Demontagesimulation (HESSELBACH & WESTERNHAGEN 1999), Roboter-Offline-Programmierung, Planung manueller Montageabläufe und Layoutplanung für Fertigungssysteme (WOLLSTADT 1999).

Aktuelle Entwicklungen gehen dahin, dass die Qualität der Simulation verbessert wird, indem anstatt der bislang nachgebildeten Steuerungsmodelle für Roboter oder Werkzeugmaschinen die „echten“ Steuerungsmodelle der Hersteller zum Einsatz kommen (WILLNOW U.A. 2000). Dies kann entweder durch Verwendung der Originalsteuerungssoftware (ANGERBAUER U.A. 1996) oder durch die Ankopplung an die reale Hardware-Steuerung erfolgen (BESTLE U.A. 1998).

Unter dem Schlagwort Prozessorientierung erfolgen Verbesserungen im Bereich der Offline-Programmierung. Dabei soll verstärkt der reale Bearbeitungsprozeß während der Programmierung im Simulationssystem berücksichtigt werden (z.B. BAUER 1998, FREUND U.A. 1998).

Im kommerziellen Bereich wird unter dem Schlagwort e-Manufacturing die Präsentation der 3D-Simulationsergebnisse in elektronisch leicht zugänglicher Form verstanden (HEIMBERG 2000). Durch geeignete Schnittstellen werden Ergebnisse von 3D-Simulationsläufen in Form von Filmen oder kompletten 3D-Modellen im Internet-Browser (KOYTEK 1997) zur Verfügung gestellt. Der Nutzen besteht in der unternehmensinternen Kommunikation oder aber auch in der Zusammenarbeit mit Zulieferern.

Anwender von 3D-Simulationssystemen bemängeln im Wesentlichen (REINHART & FELDMANN 1997):

- die Komplexität der Bedienung/Interaktion mit den dreidimensionalen Anlagenmodellen
- fehlende Schnittstellen, bzw. mangelnde Integration in den Gesamtplanungsprozess

Dem Problem der komplexen Interaktion wird durch Einsatz der VR-Technologien begegnet (siehe 2.4.3.3). Bzgl. der Schnittstellen beschreibt MIKOSCH (1996), wie sich die Situation durch Einsatz genormter Dateiformate für CAD-Modelle und Roboterprogramme verbessern lässt. Der Einsatz genormter und damit kompatibler Dateiformate ist jedoch nur ein erster Schritt, um die Integration zu verbessern. Der zweite Schritt ist die Einbindung des Simulationssystems in den Planungsprozess, sprich die Integration auf Workflow-Ebene. Ohne diese Integration sind durchgängige Analysen, wie z.B. Kostenanalysen nicht möglich, da keine Verbindung zwischen den Prozessplanungsdaten des Simulationssystems und dem Planungssystem besteht.

2.4.3.3 Virtual Reality Systeme

Neben den beschriebenen Systemen der 3D-Simulation werden Systeme entwickelt, die sich durch die Verwendung von Ein- und Ausgabegeräten aus dem Virtual Reality Bereich auszeichnen. Nach GROBMANN (1997) wird bald keine technische Entscheidung ohne „virtuelle Realität“ zu treffen sein, sofern man diesen Begriff als Synonym für aussagefähige und wirklichkeitsnahe Prozessdarstellung zur Analyse oder Prognose des Verhaltens von Systemen akzeptiert.

Systeme der virtuellen Realität sollen es dem Benutzer ermöglichen, in natürlicherer Art und Weise mit der simulierten dreidimensionalen Umgebung zu interagieren, als es bislang mittels Monitor, Tastatur und Maus möglich ist (BUCK 1996). Eine derartige intuitiv bedienbare Nachbildung der Umwelt wird auch als „Virtuelle Umgebung“ oder „Virtual Environment (VE)“ bezeichnet.

Neben der Verbesserung der intuitiven Handhabung ist unerlässlich, auch die Intelligenz der Mensch-Maschine-Schnittstelle zu erhöhen. BILLINGHURST & SAVAGE-CARMONA (1996) kommen dabei zu der Erkenntnis, dass dies durch Kombination multi-modaler Ein- und Ausgabegeräte mit Expertensystemen möglich ist. Sie nehmen dabei Bezug auf NEGROPONTE (1970), dessen Gedanken die Idee eines natürlichen Unterhaltungscomputers entsprang, mit dem sich Menschen genauso natürlich verständigen können wie mit anderen Menschen. Dies

sollte für alle Kommunikationswege gelten: Sprache, Gestik, Mimik, etc. Dieses Prinzip der natürlichen Verständigung soll durch Kombination von intuitiv bedienbarer VR-Gerätschaft und intelligenter Auswertungsverfahren erzielt werden.

Ähnliche Schlüsse ziehen DEISINGER U.A. (2000A). Sie untersuchten die Anwendbarkeit von VR-Systemen in der Produktkonstruktion. Untersucht wurde, in welcher Art und Weise intuitive Ein- und Ausgabeprinzipien wie das Großprojektionssystem „CAVE“ (CRUZ-NEIRA U.A. 1993) und das Eingabegerät „MIKE II“ (HÄFNER U.A. 1999) in die Produktkonstruktion miteinbezogen werden können. Die Probanden der Fallstudie begrüßen diese Form der freien Interaktion grundsätzlich. Die Autoren ziehen jedoch das Fazit, dass eine Kombination mit analytischen Methoden notwendig ist, um aus frei definierten Designs mathematisch eindeutige Konstruktionen erzeugen. Ebenso kommen FERNANDO U.A. (1994) und MINE (1997) zu dem Schluss, dass die Interaktion in virtuellen Umgebungen unter einer zu großen Bewegungsfreiheit leidet. Deshalb sollten gezielte Interaktionseinschränkungen implementiert werden.

Eine Übersicht technischer Anwendungen von VR-Systemen findet sich z.B. in HEGER (1998), S. 50ff. Im folgenden werden verschiedene VR-Systeme geordnet nach ihren Anwendungsschwerpunkten dargestellt. Es wird nicht nur der Schwerpunkt „Montage“ beleuchtet, da sich auch aus für andere technische Anwendungen konzipierte Systeme Aussagen zur Natur der VR-Systeme und ihrer Eigenschaften machen lassen. Deshalb werden die folgenden Aufgabenschwerpunkte betrachtet:

- Konstruktion
- Montage (umfasst Layout- und Prozessplanung)
- Teilefertigung
- Fabrikplanung

VR-Systeme mit Schwerpunkt Konstruktion

GAUSEMEIER U.A. (1998) beschreiben anhand der Konstruktion eines Informationsterminals die durchgängige Unterstützung des Produktentwicklungsprozess durch virtuelles Prototyping. Orientiert an den Prozessschritten „Produktplanung/Design“, „Konzipierung“, „Gestaltung“, „Detaillierung“ und „Arbeitsplanung“ wird jeweils erläutert, wie eine Unterstützung durch virtuelles Prototyping aussehen kann und was sie bewirkt. Als Fazit wird gezogen, dass auf die Verwendung realer Prototypen in absehbarer Zeit nicht verzichtet werden

kann, da noch nicht alle Sinneseindrücke des Menschen in ausreichender Genauigkeit abgebildet werden können. Merkmale, die das Produktaussehen betreffen, können jedoch heute schon sehr effizient am Rechnermodell erprobt und abgesichert werden.

Im Mittelpunkt der Arbeiten von DANI & GADH (1997) steht die Ausarbeitung von Produktkonzeptionen unter Zuhilfenahme von VR. Innerhalb des Systems COVIRDS wird mittels Spracheingabe und eines Datenhandschuhs die Erzeugung bestimmter konstruktiver Elemente ermöglicht. Dies schließt die Erzeugung von Flächenelementen, Verformung von Flächen und das Hinzufügen von Features ein. Ein Vergleich zur Erzeugung dieser Elemente in herkömmlichen CAD-Systemen wird nicht gezogen.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgen TRIKA U.A. (1997). Dem Problem der schwierigen exakten Positionierung begegnen sie mittels Spracheingabe der Koordinaten. Eine Effizienzsteigerung gegenüber herkömmlichen CAD-Systemen kann hier bezweifelt werden. Abhilfe könnte der von JUNG U.A. (2000) beschriebene Ansatz leisten. Auch hier wird wieder die Spracheingabe als hochgradig intuitives Befehlsmedium für das rechnergestützte Konstruieren angesehen. Es werden einfache mündliche Befehle wie „stecke die lange Schraube oben in das Flugzeug“ in komplexe geometrische Aktionen umgewandelt. Unter Verwendung von sogenannten Verbindungsports werden automatisch Bewegungsbahnen und Montagepositionen berechnet.

VR-Systeme mit Schwerpunkt Montage

Bereits NEUGEBAUER (1992) beschreibt, wie mittels VR ein Industrieroboter bewegt werden kann. Die Vorzüge liegen in der kurzen Einlernphase für die Systembedienung und die universelle Anwendbarkeit im industriellen, medizinischen oder Raumfahrtumfeld. Aus diesen ersten Arbeiten entstand das System VR4RobotS (FLAIG & THRAINSSON 1996). Derselben Zielsetzung folgend, beschreiben KUHLEN & PAULY (1994) die Anwendung virtueller Realität in der Robotik. Unter Verwendung von Spaceball, Datenhandschuh und eines Head-Mounted-Displays lässt sich in ihrem System ein Spielzeugroboter bewegen und programmieren.

RÄSS (1998) beschreibt in einem Artikel den Einsatz von VR in der detaillierten Montageplanung im Rahmen des Projektes VIRTASS. Im wesentlichen sollen mittels des virtuellen Menschmodells ANTHROPOS manuelle Montagetätigkeiten aufgezeichnet werden und anschließend zur weiteren Verarbeitung im Planungssystem ERGOPlan abgelegt werden.

Eine Anwendung des Konzepts ist nicht ersichtlich und damit nicht bewertbar.

Das System VADE (JAYARAM U.A. 1997) unterstützt die virtuelle Überprüfung der Produktmontage. Fügeuntersuchungen werden durch die Verwendung von Montage-Randbedingungen erleichtert. Diese Randbedingungen (auch Constraints) werden als Informationen direkt aus dem CAD-System übernommen. Die Erzeugung von Hüllvolumina während der Tätigkeit erleichtert die Überprüfung auf Kollisionsfreiheit bzw. auf sichere Durchführbarkeit der Montageoperation.

Im System VEDA (GUPTA U.A. 1997) wird ein Force-Feedback-System verwendet, um während der Interaktion die natürlichen Randbedingungen der Montageoperation abbilden zu können. Die Autoren kommen in einem Experiment zu dem Schluss, dass eine in VEDA virtuell durchgeführte Montageoperation doppelt so viel Zeit benötigt wie die gleiche real durchgeführte Montageoperation. Die Autoren sehen die Möglichkeit, zum einen durch bessere Übereinstimmung von visuellem und haptischen Feedback und zum anderen durch ein genaueres Kräftemodell dieses Verhältnis zu verbessern. In weiterführenden Arbeiten (GUPTA U.A. 1998) wurde ein komplettes System zur Simulation von Montageprozessen entworfen. Das System mit typischem Systemaufbau (vgl. Bild 2-7) soll dabei insbesondere die verwendeten direkten Montagehilfsmittel (z.B. Schraubenzieher) und den zur Verfügung stehenden Arbeitsraum berücksichtigen. Eine detaillierte Betrachtung unter Einbeziehung von Roboter- oder Menschmodellen wurde nicht durchgeführt. Der Einsatz spezifischer VR-Hardware ist ebenso nicht erkennbar.

RÖBLER & LIPPMANN (1997) beschreiben das auf dem Menschmodell ANTHROPOS und dem VR-System LIGHTNING (BLACH U.A. 1998) basierende System VirtualANTHROPOS. Das System ermöglicht zum einen die Steuerung des Menschmodells mittels zweier Datenhandschuhe bei gleichzeitiger Visualisierung über einen Datenhelm. Damit ist in der virtuellen Umgebung eine Aussage über die Montierbarkeit von Produkten und die Ergonomiesituation möglich. Es existiert eine Integration zu einem Werkzeug für Arbeitsplatzgestaltung um die manuellen Bewegungsdaten weiterverarbeiten zu können. Daraus abgeleitet wurde das System ERGONAUT, dessen Einsatz im Rahmen einer Produktergonomiestudie von DEISINGER U.A. (2000B) beschrieben wird.

2.4 Planungswerkzeuge zur Montagesystemgestaltung

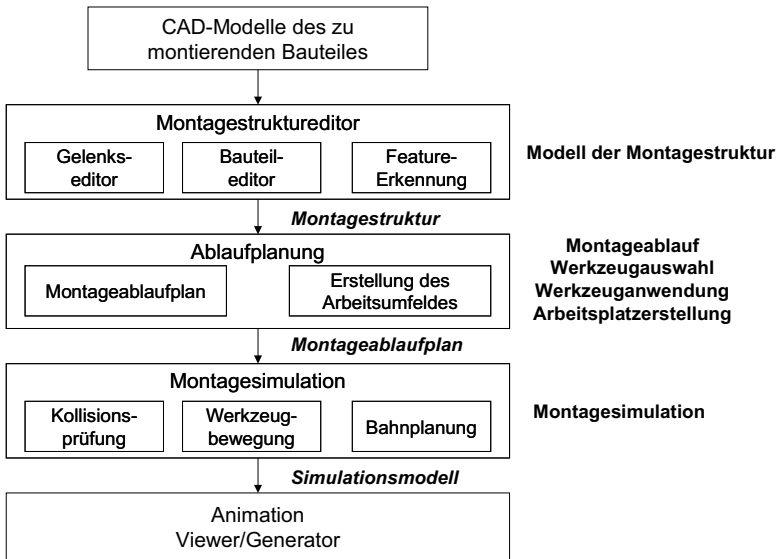


Bild 2-7: Montagesimulationssystem nach GUPTA U.A. (1998)

Während BAUER (1997) in seinem System SYVERA den Schwerpunkt auf die Unterstützung der ergonomischen Produktgestaltung legt, ist es mittels des von HEGER (1998) entwickelten Systems möglich, VR-gestützt Montageabläufe zu gestalten und in einem separaten Tool hinsichtlich ihres Zeitverhaltens auszuwerten. Beide Systeme verwenden LIGHTNING als VR-Plattform und ANTHROPOS als Menschmodell.

Neben anderen Anwendungen beschreiben RIX & SCHROEDER (2000) das System VIRGO, mit dem Ergonomie- und Sichtfelduntersuchungen in einer Fahrgastzelle möglich sind. Basierend auf dem Menschmodell RAMSIS erfolgt die Ergonomieuntersuchung von Bedienelementen direkt im CAD-System des Anwenders. Für eine weitere Anwendung aus dem Automobilbereich, die Einbau- und Montagesimulation, betonen die Autoren die Wichtigkeit der Integration von VR-Systemen hin zu den CAD- und PDM-Systemen, welche die Quelle für die zu untersuchenden Produktdaten sind. Eine Integration zu Prozessplanungswerkzeugen wird hingegen nicht genannt.

VR-Systeme mit Schwerpunkt Fertigung

Nach WEINERT U.A. (1998) liegt der Nutzen von VR in der Produktionstechnik besonders in der räumlichen Visualisierung, der multimedialen Informationsdarstellung sowie speziell der interaktiven Simulation zeitlicher und räumlicher Prozesse. Diese Tatsache nutzt WEINERT aus, um die Fertigung von Zerspanungswerkzeugen zu optimieren.

VR-Systeme mit Schwerpunkt Fabrikplanung

KREITLER U.A. (1995) untersucht die Anwendbarkeit von VR im Rahmen der Fabrikplanung. In der Arbeit wird untersucht, an welchen Stellen in der Fabrikplanung der Einsatz von VR-Hilfsmitteln einen konkreten Vorteil gegenüber herkömmlichen rechnerunterstützten Vorgehensweisen bietet. Mittels eines prototypischen Systems wurde dies am Beispiel der Fabrikationsstätte eines Zulieferers der Luftfahrtindustrie erprobt. Grundsätzlich wurde der Einsatz von VR als sinnvoll erachtet, jedoch muss in VR-Systemen größerer Wert auf die dreidimensionale Bedienbarkeit gelegt werden. Ansonsten treten leicht Effekte wie Orientierungslosigkeit innerhalb der virtuellen Umgebung auf. Als Vorteil wurde angesehen, dass es für den Anwender vergleichsweise einfach ist, Maschinen oder komplette Fabrikbereiche neu anzuordnen und sofort ein neues räumliches Abbild zu bekommen. Viele layoutorientierte Randbedingungen können dadurch sehr effizient überprüft werden.

In DREWS & WEYRICH (1997) wird die Implementierung des Systems „Virtual Workbench“ beschrieben. Der Schwerpunkt des Systems liegt in der groben Raumgestaltung in Fabrikationsbereichen mit Ansätzen zum Bewegen kinematischer Elemente. Eine Anwendung außerhalb des üblichen Systemtests während der Entwicklung ist nicht ersichtlich und damit nicht bewertbar.

EBBESMEYER U.A. (1995) beschreiben die Entwicklung eines virtuellen Industrieunternehmens. Ziel ist die möglichst realitätsnahe Abbildung des Fabrikationsbereiches mit den dort eingesetzten Werkzeugmaschinen, Robotern und Transporteinrichtungen. Schwerpunkt dabei ist die Darstellung des Modellunternehmens zu Schulungszwecken. Die Modellierung wird mit Standardwerkzeugen wie etwa I-DEAS oder ROBCAD durchgeführt.

Ein Anwendungsbeispiel für den Einsatz von VR in der Planung und Projektierung komplexer Anlagen wird in EBBESMEYER U.A. (1999) erläutert. Neben Messfunktionen und Kollisionüberprüfungen stand hier

die Integration zu anderen Systemen im Vordergrund, die in der Kraftwerksplanung bereits eingesetzt werden. Der Nutzen des Systems bestand unter anderem darin, dass der Prozess des Design Reviews auf weniger als zwei Tage reduziert werden konnte (gegenüber fünf Arbeitstagen bei Verwendung eines physischen Prototypen). Die Verwendung VR-üblicher Hardware beschränkte sich dabei auf eine Großbildprojektion. Die Benutzerführung erfolgte komplett zweidimensional.

Das System ISAAC (MINE 1997) demonstriert wie Objekte im virtuellen Raum auf einfache Art und Weise angeordnet werden können. Die wesentliche Aussage ist, dass eine einfache intuitive Interaktion alleine nicht genügt. Vielmehr muss die Interaktion geeignet eingeschränkt werden (z.B. Drehung um bestimmte Achsen, Verschieben in einer Ebene) um VR effizient einsetzen zu können.

2.5 Zusammenfassung des Standes der Technik

Ein System das in möglichst umfassender Weise die räumliche Layout- und Prozessplanung effizient unterstützen soll, muss zusammengefasst folgende Anforderungen erfüllen:

- Unterstützung von automatisierten und manuellen Tätigkeiten
- Unterstützung des Simultaneous Engineering Ansatzes durch Integration zu Strukturplanungssystemen
- Kontinuierliche Weiterverwendung von Planungsergebnissen während aller Planungsschritte und auch zur Inbetriebnahme
- Reduzierung der Interaktionskomplexität mit dreidimensionalen Simulationsmodellen unter Berücksichtigung geometrischer Randbedingungen
- Unterstützung von Layout- und Prozessplanung gleichermaßen
- Unterstützung von Planungsautomatismen

Tabelle 2-1 verdeutlicht, wie sich die in Kapitel 2.4.2 dargestellten Systeme bzgl. dieser Anforderungen einordnen lassen. Wie zu erkennen ist, existieren zahlreiche Systeme die jeweils Einzelaufgaben wie Roboterprogrammierung oder Simulation manueller Bewegungsvorgänge unterstützen. Werden beide Planungsaufgaben unterstützt fehlt die notwendige Unterstützung durch Planungsautomatismen und/oder VR-Hilfsmitteln. So lassen die Systeme, welche die Planung manueller

Bewegungsabläufe ermöglichen, Algorithmen zur Planungsautomatisierung in diesem Bereich gänzlich vermissen (GEYER 1997, S. 132). Das Potential der Kombination von Planungsautomatismen und Interaktion wird z.B. aus den Ausführungen von LEES & WASHINGTON (1995) oder BAYAZIT U.A. (1999) ersichtlich. Letztgenannte Autoren kommen dort zu dem Schluss, dass die Kombination der beiden Verfahren half, Bahnplanungsprobleme schneller zu lösen, und dass komplexere Probleme gelöst werden konnten, als mit jedem Verfahren einzeln.

In den folgenden Kapiteln wird daher ein System vorgestellt, das zum Ziel, hat möglichst allen Anforderungen gleichermaßen gerecht zu werden.

2.5 Zusammenfassung des Standes der Technik

	Planung von		Systemcharakter				Einsatz in				Montage- typ
	Layout	Prozess	3D-Unterstützung	VR-Unterstützung	Automatisierungsgrad	Integrationsgrad	Fabrikplanung	Konstruktion	Fertigung	Montage	Manuell Automatisiert
● volle Berücksichtigung ◐ teilweise Berücksichtigung											
KREITLER U.A. 1995	●	◐	●	●			●				
NEUGEBAUER 1992		●	●	●						●	●
FLAIG & THRAINSSON 1996	●	●	●	●						●	◐ ●
RÄSS 1998	●	●	●	●		◐				●	●
DREWS & WEYRICH 1997	●	◐	●	●			●			◐	◐
WEINERT U.A. 1998		●	●	◐	◐				●		
EBBESMEYER U.A. 1995	●	◐	●	●			●		◐	◐	◐ ◐
EBBESMEYER U.A. 1999	●	◐	●	◐		●	●	◐			
GAUSEMEIER U.A. 1998		◐	●	●				●		◐	
DANI & GADH 1997			●	●				●			
MINE 1997	◐		●	●			◐				
TRIKA U.A. 1997			●	●				●			
JAYARAM U.A. 1997		◐	●	●		◐		◐		◐	◐
GUPTA U.A. 1997		●	●	●						●	●
GUPTA U.A. 1998B	◐	●	●		◐	◐		◐		●	◐
RÖSLER & LIPPMANN 1997	◐	●	●	●		◐		◐		●	●
BAUER 1997	◐	●	●	●				●			
HEGER 1998		●	●	●	◐	◐				●	●
RIX & SCHROEDER 2000	◐	●	●	●		◐		●		●	●
FENTON U.A. 1992	●		●		●					●	●
JUNG U.A. 2000		●	●	●	●	◐		●		◐	◐
eM-Workplace (ehemals ROBCAD)	●	●	●			◐			◐	●	● ●
IGRIP	●	●	●			◐				●	● ●
COSIMIR	●	●	●	◐	◐					●	●
SILMA	●	●	●							●	●
WORKSPACE	●	●	●							●	●

Tabelle 2-1: Übersicht über 3D-Layout- und Prozessplanungssysteme

3 Konzeption und Systementwurf

3.1 Übersicht

Im vorliegenden Kapitel wird das Konzept für ein System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen vorgestellt. Es werden dazu die zu lösenden Planungsinhalte und die dazu erforderlichen Planungsmethodiken und –hilfsmittel dargestellt. Daraus lassen sich die grundlegenden Annahmen für das zu entwickelnde System ableiten.

Ziel des hier vorgestellten Konzeptes und des daraus entwickelten Systems ist die beschleunigte Erstellung von 3D-Simulationsmodellen von Montagesystemen. Um dieses Ziel zu erreichen werden verschiedene neue Maßnahmen zur Verbesserung des Planungsprozess entwickelt (vgl. Bild 3-1).

Zunächst wird in Kapitel 3.3 das dazu erarbeitete Prinzip der Trennung von struktureller und räumlicher Planung erläutert. Durch die differenzierte Betrachtung dieser beiden Planungsinhalte ist eine Komplexitätsreduzierung der Planungsaufgabe möglich.

Als weiteres Mittel zur Effizienzsteigerung wird in Kapitel 3.4 eine geeignete Kombination von Algorithmen zur Planungsautomatisierung und Interaktionsmethoden zur intuitiven Planung vorgestellt. Durch die Kombination dieser beiden Vorgehensweisen können schneller als bisher qualitativ hochwertige Planungsergebnisse erreicht werden.

Im Anschluss wird in Kapitel 3.5 eine systematisierte mehrstufige Vorgehensweise in der räumlichen Planung von Montageanlagen vorgeschlagen. In drei Schritten wird dabei das Anlagenmodell erstellt, analysiert und optimiert. Dies erfolgt unter Zuhilfenahme der oben genannten Methoden und Hilfsmittel zur Effizienzsteigerung der Planung.

Das informationstechnische Konzept des zu entwickelnden Systems wird abschließend in Kapitel 3.6 skizziert. Anhand dessen wird die Verbindung zu anderen Systemen, die im Rahmen der Montageplanung eingesetzt werden (z.B. CAD-System, Strukturplanung), verdeutlicht.

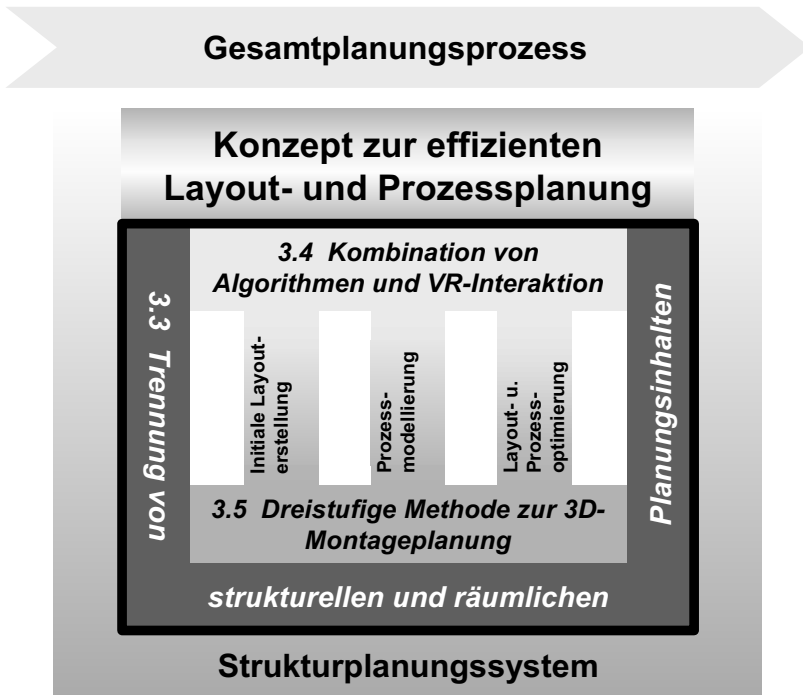


Bild 3-1: Bestandteile des Konzepts zur effizienten Layout- und Prozessplanung

3.2 Annahmen für das zu konzipierende System

Das zu entwickelnde System soll der Unterstützung eines Planungsprozesses dienen. Gemäß der allgemeinen Definition von Planung (z.B. KETTNER U.A. 1984) werden strukturiert nach dem Gegenstand der Planung, den eingesetzten Methoden und den zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln die grundlegenden Annahmen für Konzept und System dargestellt.

3.2.1 Planungsobjekt: Hybride Montagesysteme

Das System soll sowohl die Neuplanung als auch die Umplanung von Montageanlagen unterstützen. Eine Umplanung von existierenden Anlagen soll dergestalt unterstützt werden, dass ein Zugriff auf vorangegangene Planungsergebnisse möglich ist. Umplanungen beinhalten die Veränderung von Montageprozessen oder den Austausch von Betriebsmitteln im Falle einer Produktveränderung (z.B. bedingt durch ein „Facelift“).

In Produktionsbetrieben sind zu einem großen Teil sowohl manuelle als auch automatisierte Montagetätigkeiten innerhalb eines Montagebereiches zu finden. Wie in Kapitel 2 dargestellt, liegt dies darin begründet, dass einerseits einfache Bewegungsabläufe ökonomisch sinnvoller durch Handhabungsgeräte durchgeführt werden. Andererseits mangelt es jedoch Robotern und Automaten an der notwendigen Flexibilität und Intelligenz, welche Mitarbeiter in das Montagesystem einbringen können. Daher soll das System sowohl die Planung manueller als auch automatisierter Montagebereiche geeignet unterstützen.

3.2.2 Planungsmethode: Simultaneous Engineering

Das Ziel einer effizienten Montageplanung ist die frühzeitige Absicherung von Produkt- und Produktionseigenschaften (AMBROSY U.A. 1995). Dazu müssen sowohl organisatorische als auch technische Lösungen gefunden werden.

Die organisatorische Lösung besteht in der Parallelisierung von Konstruktion und Montageplanung (vgl. Bild 3-2). Im Gegensatz zum streng sequentiellen Vorgehen, bei dem erst nach der Auskonstruktion eines Produktes die Montageplanung beginnt, werden hierbei bereits während der Konstruktionsphase Zwischenergebnisse an die Montageplanung weitergereicht. Entsprechend dem Entwicklungsstand der Ergebnisse können dort bereits entsprechende Planungsschritte durchgeführt werden (z.B. Planung des Montagevorranggraphen auf Basis der Produktstruktur). Zum einen wird dadurch die Entwicklungszeit insgesamt verkürzt, zum anderen können Ergebnisse der Montageplanung (z.B. Montierbarkeit von einzelnen Komponenten) in die Konstruktion zurückfließen und dadurch Fehler früher erkannt und beseitigt werden. Diese auch als Simultaneous oder Concurrent Engineering bekannte

planerische Vorgehensweise dient als Grundlage für das zu entwickelnde System.

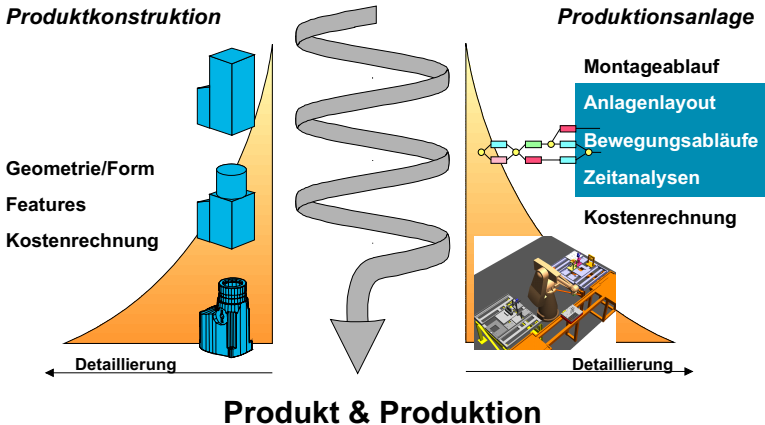


Bild 3-2: Parallele Absicherung von Produkt- und Produktionseigenschaften (ROßGODERER 1998)

3.2.3 Planungshilfsmittel: 3D-Simulationsmodell

Die technische Lösung zur frühzeitigen Überprüfung, ob und wie ein Produkt montierbar ist, besteht in der Abbildung des Montagesystems in Form eines 3D-Simulationsmodells. Dadurch ist es möglich, für bestimmte Aussagen auf den Einsatz von aufwendigen physikalischen Prototypen zu verzichten und damit die Planungszeit deutlich zu verkürzen.

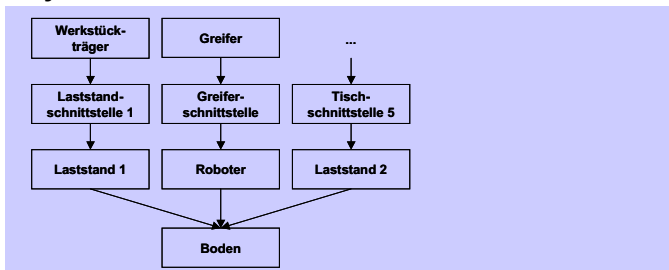
Mittels des Simulationsmodells der Montageanlage sollen direkt oder indirekt folgende Aussagen getroffen werden können:

- Welche Betriebsmittel müssen zur Erfüllung der Montageaufgabe eingesetzt werden?
- Wie müssen diese Betriebsmittel angeordnet werden, um eine optimale Erfüllung der Aufgabe hinsichtlich Kosten, Zeit und Qualität zu erreichen?

- Welche Zeiten werden erzielt?
- Welche Kosten sind zu erwarten?
- Welche Qualität kann gewährleistet werden?
- Welche Gesamtbewertung hinsichtlich Zeit, Kosten und Qualität ergibt sich für die Montageanlage?

Das zu erstellende Simulationsmodell muss demnach sowohl die Anordnung von Komponenten als auch Bewegungsabläufe (= Prozesse) enthalten. Basierend auf dem Simulationsmodell müssen Bewertungsverfahren implementiert werden, welche die gewünschten Analysen ermöglichen.

Layoutstruktur



Prozessstruktur

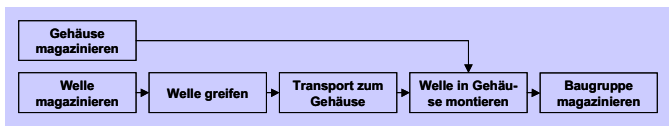


Bild 3-3: Strukturinformationen in einem Montagesystem

3.3 Trennung von strukturellen und räumlichen Planungsinhalten

Betrachtet man die zu lösenden Aufgaben „Prozessplanung“ und „Layoutgestaltung“ näher, kann man erkennen, dass im Rahmen einer

3.3 Trennung von strukturellen und räumlichen Planungsinhalten

systematischen Montageplanung in zwei Stufen vorgegangen werden kann. Zunächst wird eine Struktur des Prozesses oder des Layouts festgelegt (vgl. Bild 3-3) und erst danach mit der Lösung der räumlichen Probleme begonnen. Diese Aufteilung hat zweierlei Gründe.

Einerseits ist es nicht für jedes Teilsystem eines Montagesystems notwendig eine räumliche Planung durchzuführen. Dies kann daran liegen, dass dieses Teilsystem im Rahmen einer Änderungsplanung nicht verändert werden muss oder aber die räumlichen Verhältnisse so einfach sind, dass eine detaillierte Betrachtung unnötig ist. Die Bewertung des Montagesystems erfolgt in solch einem Fall, anstatt durch Berechnung im Simulationssystem, üblicherweise auf Basis von Erfahrungs- oder Schätzwerten (vgl. Bild 3-4).

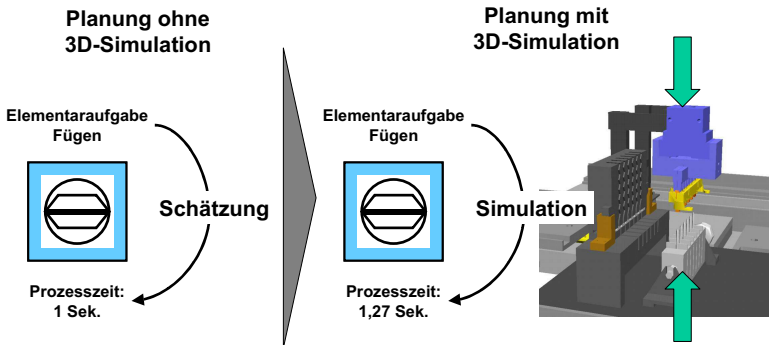


Bild 3-4: Planung mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad

Der zweite Grund für die Trennung von strukturellen und räumlichen Planungsinhalten ist die unterschiedlich notwendige Qualifikation zur Bearbeitung der Planungsinhalte. Im Rahmen der Strukturplanung muss der Planer in der Lage sein, komplexe Sachverhalte systemtechnischer Natur lösen zu können. So muss er basierend auf der Produktstruktur oder einer vorhandenen Planung einen Montageablaufplan erstellen. Dieser Montageablaufplan besteht aus zahlreichen Elementarprozessen, die geeignet miteinander verknüpft werden müssen. Bei der Verknüpfung muss berücksichtigt werden, dass die einzelnen Produktteile in der vorgedachten Reihenfolge montierbar sind. Zugleich müssen Zeit, Kosten und Qualität der Montage berücksichtigt bzw. eingehalten werden. Zur

Lösung räumlicher Planungsprobleme sind ein gutes Verständnis für dreidimensionale Zusammenhänge und Kenntnis von CAD-Techniken Grundvoraussetzung. Der Planungsingenieur muss beispielsweise in der Lage sein, ausgehend von einer bestimmten räumlichen Anordnung von Gegenständen eine Verbesserung der Ergonomie zu erzielen, indem er die Anordnung verändert. Dies ist nicht möglich ohne abschätzen zu können, wie sich Positionsänderungen von Gegenständen auf den Bewegungsablauf der manuellen Tätigkeit auswirken.

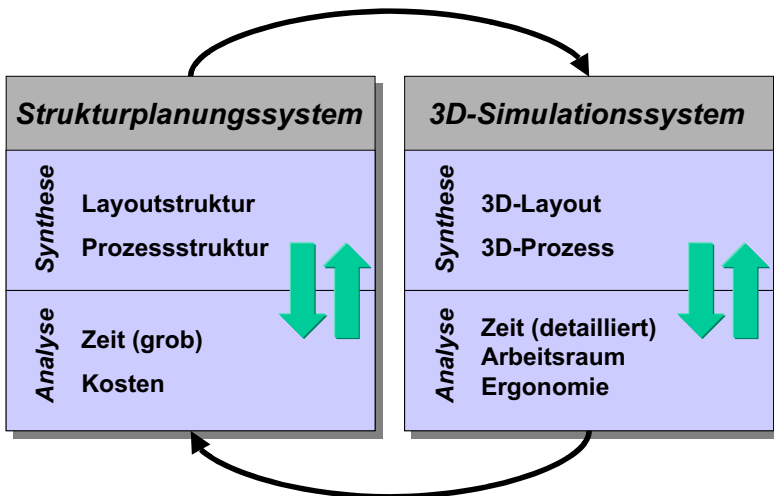


Bild 3-5: Aufgabenteilung zwischen struktureller und räumlicher Montageplanung

Die Trennung von strukturellen und räumlichen Planungsinhalten soll daher auch Grundlage für das zu entwickelnde Planungssystem sein. Das Planungssystem soll es ermöglichen, in der Strukturplanung erzeugte Informationen direkt nutzen und weiterverarbeiten zu können. Die Aufteilung der Planungsinhalte auf zwei unterschiedliche Systeme bedingt eine dichte Integration der beiden Systeme damit Daten beim Transport von einem zum anderen System nicht verfälscht werden oder verloren gehen.

Durch die klare Trennung der strukturellen und räumlichen Planungsinhalte sowohl in organisatorischer als auch technischer Hinsicht

wird eine Komplexitätsreduzierung der Gesamtaufgabe erreicht. Die beiden Teilaufgaben können klar voneinander abgegrenzt werden (siehe Bild 3-5). Durch den Austausch der jeweiligen Planungsergebnisse zwischen den Teilsystemen wird die Effizienz der Planung trotz Systemaufteilung gewährleistet.

In mehreren Iterationsschleifen kann im Wechselspiel zwischen Strukturplanung und 3D-Planung eine hinsichtlich Zeit, Kosten und Qualität verbesserte Montageanlage geplant werden. Im 3D-Simulationssystem können dabei folgende Bewertungskriterien ermittelt werden:

- Faktor Zeit: Montageprozesszeiten für automatisierte und manuelle Tätigkeiten
- Faktor Qualität: Eignung von Handhabungsgeräten hinsichtlich Arbeitsraum
- Faktor Qualität: Ergonomie manueller Arbeitsplätze

Die Bewertung hinsichtlich dieser Faktoren wird nach Abschluss der 3D-Planung an das Strukturplanungssystem zurückgegeben und steht dort zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung. So kann dort z.B. auf Basis der ermittelten Montageprozesszeiten eine Kostenbewertung erfolgen, da detaillierte Angaben über Investitionskosten von Betriebsmitteln, Stundensätzen von Personal etc. verfügbar sind (MILBERG U.A. 1997, S. 52ff). Sollte sich dabei herausstellen, dass z.B. ein Betriebsmittel aufgrund zu hoher Kosten ausgetauscht werden muss, erfolgt der erneute Anstoß der räumlichen Planung unter Verwendung eines günstigeren Betriebsmittel. Auf diese Weise wird im steten Wechselspiel von Struktur- und 3D-Planung ein optimiertes Gesamtsystem erreicht.

3.4 Kombination von Algorithmen und VR-Interaktion

Verschiedene Werkzeuge zur dreidimensionalen Layout und Prozessplanung unterscheiden sich sowohl in Ihrer Funktionalität als auch in Ihrer grundsätzliche Methodik zur Lösung der Planungsaufgabe. Während in marktüblichen 3D-Simulationssystemen zunehmend Algorithmen zur Automatisierung von Planungsaufgaben zum Einsatz kommen, werden andererseits zahlreiche Virtual-Reality-Systeme entwickelt, welche die rein interaktive Planung zum Inhalt haben.

3.4.1 Algorithmen zur Planungsautomatisierung

Viele in der Praxis vorkommende Planungsaufgaben lassen sich durch den Einsatz von mathematischen Optimierungsverfahren automatisieren. Dies rührt daher, dass diese Problemstellungen in der Regel Optimierungsprobleme darstellen. Ein solches Optimierungsproblem lässt sich allgemein wie folgt formulieren:

„Minimiere den Wert einer **Zielfunktion** indem bestimmte **Optimierungsvariablen** variiert werden und bestimmte **Randbedingungen** eingehalten werden.“

Will man nun Optimierungsverfahren auf eine derartig gestaltete Planungsaufgabe anwenden, gilt es die Zielfunktion, die Optimierungsvariablen und die gewünschten Randbedingungen festzulegen.

Angewandt auf eine typische Problemstellung in der dreidimensionalen Montageplanung, der Bewegungsbahnplanung für Roboter (vgl. Bild 3-6), ergibt sich die in Tabelle 3-1 dargestellte mögliche Zuordnung.

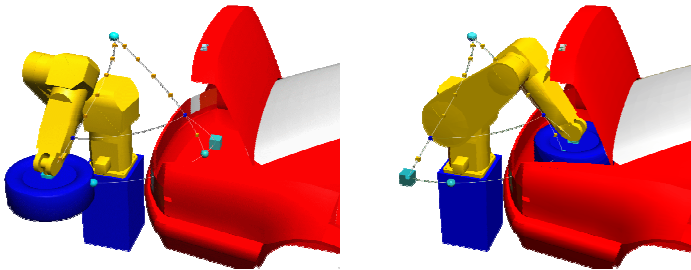


Bild 3-6: Anwendung der Bahnplanung in der Automobilmontage (nach Kugelmann 1996)

Diese Zuordnung ist nur eine von mehreren Möglichkeiten. Zum Beispiel könnte in der Zielfunktion neben der Bewegungszeit zusätzlich die Belastung in den Antriebsgelenken berücksichtigt werden um die Lebenszeit des Roboters zu maximieren. Gleiches gilt für Optimierungsvariablen und Randbedingungen. Auch hier wurde nur eine von mehreren Möglichkeiten dargestellt.

Wie die Gestaltung von Zielfunktion, Optimierungsvariablen und Randbedingungen genau aussieht, hängt stark vom betrachteten Einzelfall, sprich der zu lösenden Planungsaufgabe ab. Eine wesentliche Aufgabe beim Einsatz von Optimierungsalgorithmen zur Planungsautomatisierung ist daher die genaue Analyse der Planungsaufgabe und die daraus resultierende Definition der Optimierungsaufgabe.

Zielfunktion	<ul style="list-style-type: none">• Zeit für die Bewegung
Optimierungsvariable	<ul style="list-style-type: none">• Bewegungstrajektorie des Tool Center Point
Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none">• Einhaltung der durch die Roboterkinematik gesetzten Randbedingungen (Achswinkelgrenzen, Höchstgeschwindigkeiten und Maximalbeschleunigungen)• Keine Kollision mit anderen Gegenständen

Tabelle 3-1: Bewegungsbahnplanung als Optimierungsaufgabe

Der Vorteil der Optimierungsalgorithmen besteht zum einen darin, dass nach erfolgter Definition der Eingabeparameter (Zielfunktion, Optimierungsvariable, Randbedingungen) ein Berechnungsvorgang angestoßen werden kann, der ohne jegliche weitere Benutzerinteraktion eine Vielzahl von Varianten erzeugt und bewertet. Die Berechnungsdauer hängt dabei von der Komplexität von Zielfunktion und Randbedingungen und der Anzahl der Optimierungsvariablen ab. Da keine Interaktion notwendig ist, können solche Berechnungsaufgaben jedoch parallel zu anderen Tätigkeiten erledigt werden. Im Normalfall sollte sich ein Ergebnis jedoch in ein bis zwei Stunden ermitteln lassen können.

Das Ergebnis des Berechnungsvorganges ist sowohl von den Eingabeparametern als auch von der Art des Optimierungsalgorithmus abhängig. Dieser Zusammenhang wurde in Verbindung mit der räumlichen Montageplanung zum Beispiel in WOENCKHAUS (1994) eingehend diskutiert. Aufgrund dieser Abhängigkeit ist es wichtig bei der Dokumentation der Montageplanung nicht nur das Ergebnis festzuhalten, sondern auch die Eingabeparameter und Algorithmen welche zu diesem Ergebnis führten. Mit diesen Angaben lässt sich die Lösung der Planungsaufgabe jederzeit eindeutig und unmissverständlich

nachvollziehen. Die Objektivität und Reproduzierbarkeit des Planungsergebnisses ist somit gewährleistet.

Die Lösung von Planungsproblemstellungen mittels Optimierungsalgorithmen ist dabei nicht in jedem Fall möglich. Es können nur solche Probleme automatisiert gelöst werden, die sich in Form von Algorithmen abbilden lassen. Nicht jede Randbedingung oder Zielvorgabe einer Planungsaufgabe lässt sich jedoch in Form einer algorithmisch auswertbaren Sprache darstellen.

Ein Beispiel hierfür stellt die Bewertung eines manuellen Arbeitsplatzes mittels der Ergonomieanalyse OWAS dar (OWAS 1981). Dieses Analyseverfahren ermittelt in Abhängigkeit der aktuellen Körperhaltung das Verbesserungspotential der Haltung im Hinblick auf ergonomische Aspekte. Dazu wird die aktuelle Haltung mit Haltungsintervallen in einem Tabellenwerk verglichen und eine Maßnahmenklasse abgeleitet (vgl. Tabelle 3-2). Die benötigten Eingangsparameter können problemlos aus dem dreidimensionalen Simulationsmodell abgeleitet werden (GEYER 1997, S. 111). Ein mögliches Ergebnis der Analyse ist jedoch, dass die aktuelle Körperhaltung nicht klassifizierbar ist. In diesem Fall kann nur der Planer selbst die ergonomische Situation des Arbeitsplatzes bewerten.

Maßnahmenklasse	Körperhaltung	Maßnahmen
1	Normal	Keine
2	Belastend	In der nächsten Zeit
3	Deutlich belastend	So schnell wie möglich
4	Deutlich schwer belastend	Unmittelbar
5	Keine Klassifizierung	Ursachen ermitteln

Tabelle 3-2: OWAS Maßnahmenklassen

In anderen Fällen kann die Definition der Eingabeparameter für die Optimierung erheblichen Aufwand verursachen. Dies ist dann der Fall, wenn komplexe Randbedingungen in Form einer formalen Sprache (z.B. Programmiersprache) eingegeben werden müssen. In der Regel besitzt ein Montageplaner nicht die Qualifikation um diese Aufgabe durchzuführen.

Ein letzter nicht zu unterschätzender Nachteil von Optimierungsalgorithmen ist die Tatsache, dass der Algorithmus nicht notwendigerweise das bestmögliche Ergebnis ermittelt. Dies kann zu Akzeptanz-

problemen führen, falls einem erfahrenen Planer ein Ergebnis präsentiert wird, das ganz offensichtlich nicht das optimale darstellt.

Ist man sich der Nachteile und Vorteile von Optimierungsalgorithmen bewusst, stellen diese eine wertvolle Hilfe im Planungsprozess dar.

3.4.2 VR-Techniken als Interaktionshilfsmittel

Die ausgeprägteste und am weitesten fortgeschrittene Interaktionstechnik im 3D-Umfeld wird gemeinhin durch den Begriff Virtual Reality (VR) beschrieben. Zahlreiche Forschungsinstitutionen, Softwarefirmen, Hardwarehersteller aber auch Endanwender erforschen diese Technik, entwickeln Anwendungen und bewerten ihre Einsetzbarkeit.

Die verschiedenen Facetten von VR können in die Kernbausteine „Eingabe“ und „Ausgabe“ einer interaktiven Benutzerführung einsortiert werden. Auf Seiten der Ausgabe besteht das Ziel, dem Benutzer ein möglichst perfektes Sinnesabbild eines virtuellen Modells zu vermitteln. Auf Seiten der Eingabe wird eine möglichst natürliche Nutzung der aktorischen oder effektauslösenden Fähigkeiten des Menschen angestrebt.

Ausgabe durch	Eingabe durch
<ul style="list-style-type: none">• Optik• Haptik (Kraft)• Akustik• Olfaktorik (Geruch)• Temperatur	<ul style="list-style-type: none">• Sprache• Körperbewegung<ul style="list-style-type: none">• Finger• Körperhaltung• Augenbewegung• Hirnströme

Tabelle 3-3: Angesprochene Sinnesreize und Eingabemöglichkeiten in VR-Systemen

Die Stärke der Verwendung von VR-Techniken zur Modellierung von Montageanlagen und –prozessen liegt in der direkten Einbringung von Erfahrungswissen. Der Planer kann durch direkte Interaktion mit der virtuellen Montageanlage das Simulationsmodell erweitern und modifizieren. Durch unmittelbares Feedback auf Aktionen des Anwenders kann in einem schnellen Regelkreis das Modell stetig verbessert werden.

Da die Kernidee der VR die möglichst natürliche Interaktion mit einem Rechnermodell ist, erschließt sich zudem ein neuer Anwenderkreis für die Modellierung der Montageanlage. Es ist nämlich nun kein Spezialisten-Know-how mehr notwendig, um bestimmte Teilaspekte des Simulationsmodells zu gestalten. Dadurch entsteht die Chance, Mitarbeiter aus der Produktion direkt in den Planungsprozess einzubinden. Im Idealfall kann der Mitarbeiter welcher später die Aufgabe in der Produktionsanlage durchführen soll, die Aufgabe am virtuellen Anlagenmodell selbst mitgestalten. Ein Beispiel dafür stellt die Anordnung von Greifbehältern an einem Montagearbeitsplatz dar. Jedoch muss dafür der virtuelle Arbeitsplatz in einer Qualität visualisiert werden, dass der Mitarbeiter tatsächlich den Eindruck hat, an seinem Arbeitsplatz zu stehen. Zum anderen muss durch die Wahl des Eingabegerätes gewährleistet sein, dass das Ändern der Behälteranordnung nahezu wie in der Realität erfolgen kann.

Diese Art und Weise der Planung wirkt sich positiv auf die Akzeptanz des Planungsergebnisses aus. Der Planer aber auch der Produktionsmitarbeiter kann selbst die Montageanlage testen und nach seinen Wünschen gestalten. Möglich wird das durch die nahezu natürliche Mensch-Maschine-Kommunikation mit der in VR-Systemen mit der 3D-Umgebung interagiert werden kann. Zum Verschieben von Objekten oder Bewegen von Kinematiken in einer 3D-Szene ist kein Spezialisten-Know-How mehr gefordert. Durch kurze Erklärung der VR-Eingabemechanismen wird nahezu jeder in die Lage versetzt, die Montageanlage am virtuellen Modell zu analysieren und zu modifizieren.

Dies kann natürlich gleichzeitig ein Nachteil sein. Denn im Gegensatz zur objektiven Bewertung einer Montageanlage durch ein analytisches Verfahren spielen hier subjektive Einflüsse eine große Rolle. Diese Einflüsse spiegeln sich als implizites Wissen im Planungsergebnis wieder. Sofern dieses Wissen bzw. die Erfahrung nicht explizit dokumentiert ist, ist das Planungsergebnis nicht mehr nachvollziehbar.

Im Gegensatz zur Lösung einer Planungsaufgabe mittels Algorithmen wird bei der interaktiven Vorgehensweise der Bediener bis zum Erhalt des Planungsergebnisses durchgängig benötigt. Dadurch steigt indirekt der Planungsaufwand, da ein höherer Personaleinsatz zur Ermittlung der Lösung notwendig ist. Da jede Interaktion mit dem Planungssystem zudem die Gefahr von Fehleingaben birgt, müssen ggf. Planungsschritte mehrfach wiederholt werden, um ihre Korrektheit sicherzustellen.

3.4.3 Vergleich und Kombination von Planungsautomatisierung und Interaktion

Sowohl automatisierte als auch interaktive Vorgehensweisen haben jeweils Stärken und Schwächen (vgl. Tabelle 3-4). Das zu entwickelnde Planungssystem soll den Benutzer deswegen dabei unterstützen zu entscheiden, welche Methode in jedem Planungsschritt einzusetzen ist. Dazu werden die Stärken und Schwächen an den jeweiligen Planungsinhalten gespiegelt und darauf basierend die Eignung der Methode bewertet.

	Stärke	Schwäche
Automatisierte Planung	<ul style="list-style-type: none"> • Wenig Benutzerinteraktion • Reproduzierbarkeit der Planung • Objektives Planungsergebnis • Hohe Anzahl von durchgespielten Planungsvarianten ohne Zusatzaufwand seitens des Planers • Planungszeit = Definition + Rechenzeit + Ergebnisanalyse, wobei lediglich Definition und Ergebnisanalyse vom Bediener durchgeführt werden müssen 	<ul style="list-style-type: none"> • Begrenztes Einsatzgebiet je nach Leistungsfähigkeit der Algorithmen • Zum Teil aufwendige Definition der Eingangsdaten für die Algorithmen • Keine Erfolgsgarantie der Algorithmen
Intuitive Planung	<ul style="list-style-type: none"> • Leichte Einbringung von Erfahrungswissen • Akzeptanz des Planungsergebnisses 	<ul style="list-style-type: none"> • Interaktion als Fehlerquelle • Planungszeit = Arbeitszeit des Bedieners • Subjektives Planungsergebnis

Tabelle 3-4: Vergleich von automatisierter und interaktiver Planung

Neben dieser Entscheidungsunterstützung für den Planer muss ähnlich wie bei der Trennung von struktureller und räumlicher Planung darauf geachtet werden, dass durch die Aufteilung in automatisierte und interaktive Planungsinhalte kein Zusatzaufwand entsteht. In Analogie ist eine integrierte Lösung zu entwerfen, welche das vorgeschlagene Vorgehen in optimaler Weise unterstützt.

Die jeweiligen Defizite der Methodiken können, wie später in den einzelnen Planungsstufen gezeigt werden wird, durch Nutzung der vorgestellten Trennung von struktureller und räumlicher Planung und der Aufteilung in automatisierte und interaktive Planungsinhalte abgeschwächt werden. So kann durch eine integrierte Lösung zum Beispiel der Aufwand für die Definition von Eingangsdaten für Algorithmen verringert werden. Auf Seiten der interaktiven Planung verspricht der Einsatz von Techniken aus dem Bereich der Virtual Reality Zeitersparnis und Qualitätssteigerungen für komplexe räumliche Planungsinhalte.

3.5 Dreistufige Methode zur 3D-Montageplanung

3.5.1 Übersicht – Systemunterteilung

Ausgehend von den bisher beschriebenen Aufgaben, die es während der räumlichen Planung eines Montagesystems zu lösen gilt, lässt sich ein dreistufiges Vorgehen im Simulationssystem definieren (Bild 3-7).

In der ersten als „Initiale Layouterstellung“ bezeichneten Stufe erfolgen die ersten Schritte in der Modellerstellung der Montagestation. Die in der Strukturplanung ausgewählten Betriebsmittel müssen in Form Ihrer dreidimensionalen Repräsentation in das 3D-Simulationssystem geladen werden. Gleiches gilt für die Produktteile, welche an der Montagestation verarbeitet werden. Im Anschluss müssen die einzelnen 3D-Modelle so angeordnet werden, dass sich ein realistisches Abbild der Station ergibt.

Im Anschluss kann im zweiten als „Prozessmodellierung“ bezeichneten Schritt, die Erstellung der räumlichen Bewegungsabläufe erfolgen. Dazu zählen zum einen Bewegungen von Robotern und anderen automatisierten Handhabungseinrichtungen. Zum anderen gehören hierzu auch manuelle Bewegungsabläufe, die zur Montage der betrachteten Produktteile notwendig sind.

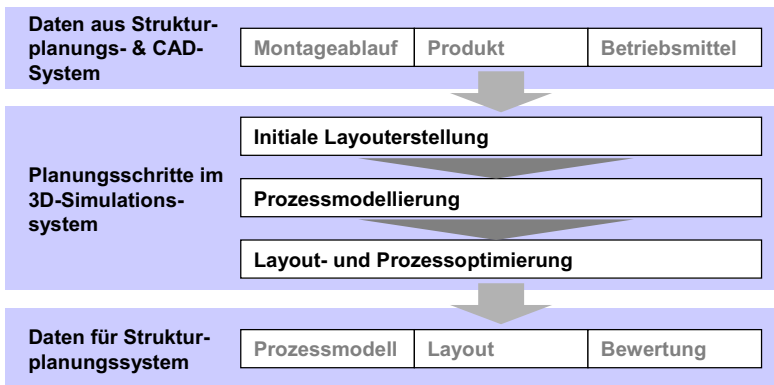


Bild 3-7: Dreistufiges Vorgehen zur räumlichen Planung einer Montagestation

Im dritten und letzten Schritt, der „Layout- und Prozessoptimierung“ wird nun schließlich das so erstellte Simulationsmodell optimiert. Dazu wird die Anordnung der Betriebsmittel und die damit verbundenen Prozessschritte so verändert, dass die für die Montagestation bekannten Zielvorgaben erfüllt werden. Die Zielvorgaben werden durch Simulation der Prozesse ermittelt. Lassen sich die Zielvorgaben nicht erreichen, erfolgt eine Rückmeldung in die Strukturplanung (vgl. Bild 3-5). Dort muss dann unter Nutzung der Simulationsergebnisse eine Lösung auf höherer Ebene gefunden werden.

Das Resultat der so durchgeführten Simulationsstudie besteht aus mehreren Elementen:

- Layout
- Prozessmodell
- Analyseergebnisse

Neben der schon aus der Strukturplanung ableitbaren Stückliste wurde nun die Anordnung der Betriebsmittel zum Aufbau der Montagestation ermittelt. Das erstellte Prozessmodell kann zum einen den Anlauf von automatisierten Handhabungsgeräten verkürzen. Zum anderen dient es der Unterweisung des Personals zur Durchführung von manuellen Tätigkeiten. Die Analyseergebnisse schließlich geben Aufschluss über die Einhaltung der Zielvorgaben für die Montagestation.

Ausgehend von dieser grundsätzlichen Vorgehensweise wird in den nächsten drei Abschnitten dargestellt, wie sich die Prinzipien „Trennung von strukturellen und räumlichen Planungsinhalten“ und „Kombination von Algorithmen und VR-Interaktion“ effektiv auf die einzelnen Planungsschritte anwenden lassen. Details zur systemtechnischen Unterstützung der einzelnen Planungsschritte finden sich in den Kapiteln 4 bis 6.

3.5.2 Layouterstellung

3.5.2.1 Layoutstruktur als Eingangsgröße aus der Strukturplanung

Analog zur Aufteilung eines Produktes in verschiedene Baugruppen oder Module kann auch eine Montagestation als Struktur dargestellt werden. In Bild 3-8 ist die Teilstruktur einer automatisierten Montagestation dargestellt. Die Darstellung wurde so gewählt, dass sie dem natürlichen Aufbau der Station entspricht. Dementsprechend ist die Wurzel der Baumstruktur der Boden, auf dem die Montagestation aufgebaut werden soll. Auf dem Boden sind die beiden Laststände und der Roboter verankert usw.

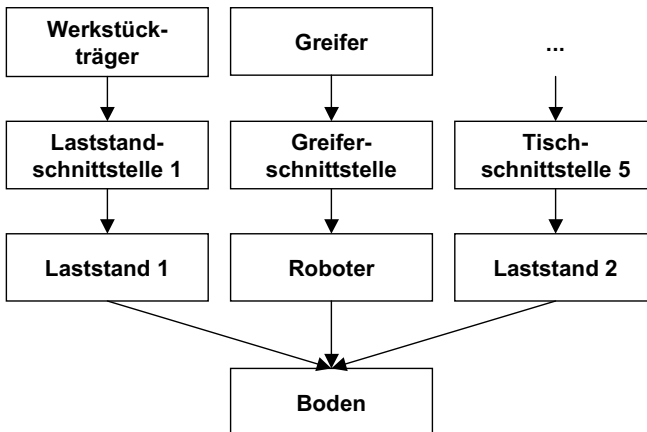


Bild 3-8: Strukturelle Darstellung einer Montagestation

Die Strukturierung der Montagestation ermöglicht zweierlei. Zum einen ist bei einem Austausch von einzelnen Betriebsmitteln ersichtlich, auf welche anderen Komponenten der Montagestation dies direkte Auswirkungen hat. Zum Beispiel kann es notwendig sein, den Roboter auszutauschen, weil in der 3D-Simulation festgestellt wird, dass dessen Arbeitsraum nicht ausreichend ist. Durch den Blick auf die Struktur ist erkennbar, dass dementsprechend auch die Greiferschnittstelle an den neuen Roboter angepasst werden muss. Ebenso kann sich eine andere Befestigung auf der Hallenfläche ergeben. Der logische Aufbau einer Montagestation stellt damit eine wertvolle Information dar, welche die Strukturplanung erleichtert.

Zum anderen kann die strukturelle Darstellung als Anleitung zur Anordnung der Komponenten dienen. Durch die gerichtete Kantenbeziehung ist zum Beispiel festgelegt, dass der Werkstückträger räumlich relativ zur Laststandschnittstelle Nr. 1 angeordnet werden muss. Das Erstellen der Stationsstruktur kann vollständig in der Strukturplanung erfolgen und erleichtert jedoch zugleich die räumliche Planung der Station.

3.5.2.2 Kombination von Algorithmen und Interaktion

Eine weitere Erleichterung des Layoutaufbaus stellt die Verwendung von semantischen Informationen der CAD-Modelle von Betriebsmittel und Produkten dar. So können in üblichen CAD-Systemen neben der Form von Komponenten auch Bedeutungen von einzelnen Komponentenformteilen definiert werden, sog. Features. Weist man der Bodenfläche des Roboters z.B. die Eigenschaft „Aufstellfläche“ zu, kann dies zur räumlichen Anordnung des Roboters auf dem Boden genutzt werden. Dazu muss lediglich die Aufstellfläche mit der Fläche des Bodens zur Deckung gebracht werden. Sind genügend Komponenten solche Funktionsflächen zugewiesen worden, kann auf diese Art und Weise die Montagestation Schritt für Schritt räumlich aufgebaut werden. Notwendig sind dafür Algorithmen, die in geeigneter Weise anordnungsbestimmende Features zweier Komponenten zur Ermittlung der relativen räumlichen Anordnung verwenden.

Am Beispiel der Anordnung des Roboters auf den Boden ist ersichtlich, dass die räumliche Lage nicht eindeutig ermittelbar ist. Der Roboter lässt sich grundsätzlich auf der ganzen Bodenfläche verschieben und um die Hochachse verdrehen. Diese sogenannten verbleibenden Freiheitsgrade können in einem interaktiven Planungsschritt dazu genutzt werden um eine erste Anordnung der Betriebsmittel zu generieren. Dadurch können

z.B. einzelne Elemente des Montagesystems in Reichweite des Handhabungsgerätes gebracht werden. Dies ist für den zweiten Schritt der Stationsplanung, der „Prozessmodellierung“ von Vorteil.

3.5.2.3 Ergebnis der Layouterstellung

Ergebnis der ersten Stufe in der räumlichen Planung einer Montagestation ist die logische Struktur der Station und eine erste räumliche Anordnung der beteiligten Produktteile und Betriebsmittel (Bild 3-9). Als Eingangsinformation dient die Stückliste aus dem Strukturplanungssystem. Aus dem CAD-System werden Informationen über die Form der Komponenten und ihrer anordnungsbestimmenden Features übernommen.

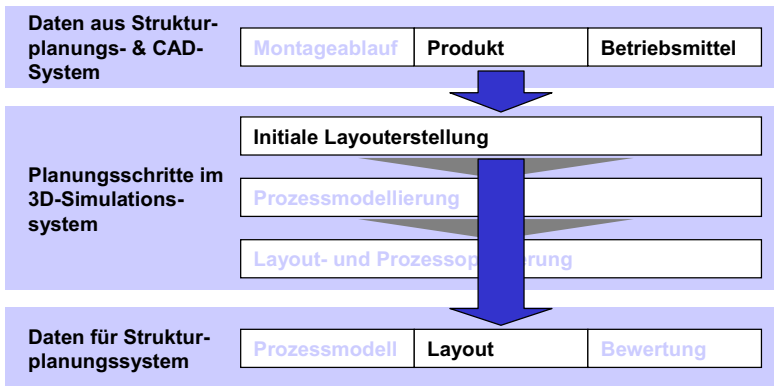


Bild 3-9: Ein- und Ausgangsdaten der initialen Layouterstellung

3.5.3 Prozessmodellierung

3.5.3.1 Prozessstruktur als Eingangsgröße aus der Strukturplanung

Ähnlich wie Produkt und Montagestation lässt sich auch der Montageprozess in Form einer Struktur darstellen. Die Pfeile stellen hier jedoch keine räumliche oder hierarchische Beziehung dar, sondern eine zeitlich logische Abfolge (vgl. Bild 3-10). Die einzelnen Teilprozess-

schritte des Gesamtprozesses werden gemäß der in der VDI-RICHTLINIE 2860 (1990) definierten Notation beschrieben.

Auf Ebene der Strukturplanung dient diese Form der Darstellung des Montageprozesses als Grundlage für alle weiteren Planungen. Die Auswahl von Betriebsmitteln erfolgt orientiert an den einzelnen Prozessschritten. Durch das Abschätzen oder simulationsgestützte Ermitteln von Prozesszeiten können Zeit- und Kostenanalysen durchgeführt werden. Durch Darstellung des kritischen Pfades können Engpässe erkannt und beseitigt werden.

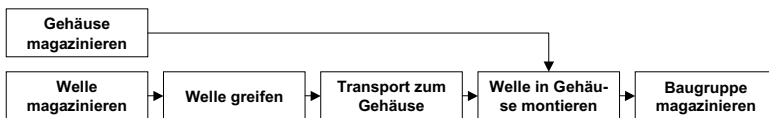


Bild 3-10: Strukturelle Beschreibung eines Montageprozesses

Für die räumliche Planung hat die Beschreibung genau wie die Montagesstationsstruktur Anleitungscharakter zur Erzeugung der Bewegungsabläufe.

3.5.3.2 Kombination von Algorithmen und Interaktion

Die strukturelle Darstellung der Montageaufgabe in Form des Ablaufplanes dient zur Generierung der räumlichen Bewegungsabläufe. Die Kombination von Algorithmen zur Planungsautomatisierung und Hilfsmitteln zur Interaktion erweist sich auch hier wieder als sinnvoll.

So können mittels heute verfügbarer Planungsalgorithmen viele der Teilprozessschritte für Handhabungsgeräte automatisch in die zugehörigen räumlichen Bewegungsabläufe umgesetzt werden. Ermöglicht wird dies durch die im Rahmen der impliziten Offline-Programmierung entwickelten Verfahren zur Bahn-, Greif- und Transportplanung für automatisierte Handhabungsgeräte.

Während diese Verfahren gerade für Roboter sehr weit entwickelt sind, herrscht auf Seiten der automatisierten Generierung manueller Bewegungsabläufe noch ein erhebliches Defizit. Dies resultiert insbesondere aus der erhöhten Komplexität der menschlichen Kinematik. Anthropometrische Simulationsmodelle enthalten in der Regel über 100 kinematische Achsen im Gegensatz zu 6 Achsen eines Roboters. Bei der

Umsetzung der Prozessbeschreibung müssen jedoch Bewegungen für jede einzelne Achse berechnet werden. Hinzu kommt die Tatsache, dass bei manuellen Tätigkeiten ergonomischen Aspekten Rechnung getragen werden muss. Eine einfache Berücksichtigung der Achswinkelbegrenzung zur Ermittlung zulässiger Bewegungen ist längst nicht ausreichend.

Menschliche Bewegungsabläufe müssen daher weitestgehend interaktiv erzeugt werden. Der Einsatz von Eingabegeräten aus dem Bereich der VR verschafft hierbei gegenüber den normalen Interaktionsmedien wie Maus und Tastatur einen Produktivitätszuwachs. So lassen sich durch Verwendung von Datenhandschuhen Fingerbewegungen messen und direkt auf das anthropometrische Simulationsmodell übertragen. Über entsprechende Trackingsysteme ist es möglich, die Position der Hände und des Kopfes bis hin zur kompletten Körperhaltung zu messen und in das Simulationssystem zu übertragen.

3.5.3.3 Ergebnis der Prozessmodellierung

Resultat der erfolgten Prozessmodellierung sind die räumlichen Bewegungsabläufe für automatisierte und manuelle Teilprozessschritte (Bild 3-11). Die Abläufe wurden auf Basis des Montagablaufplanes Schritt für Schritt generiert. Für automatisierte Prozessschritte kann dabei auf Methoden der impliziten Offline-Programmierung zurückgegriffen werden. Manuelle Prozessschritte werden mittels VR-Eingabegeräten generiert.

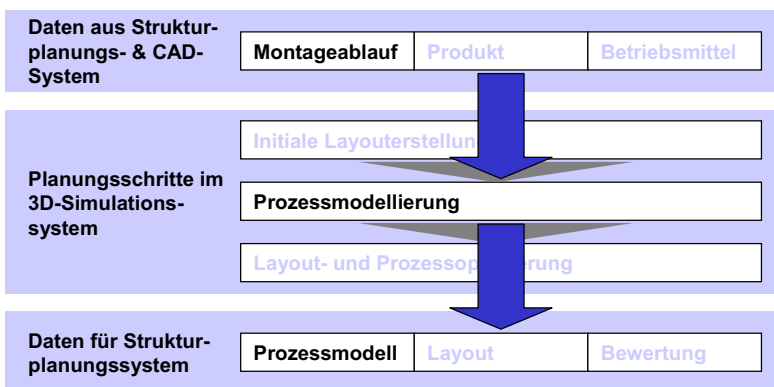


Bild 3-11: Ein- und Ausgabedaten der Prozessmodellierung

3.5.4 Anordnungsoptimierung

Der letzte Schritt im vorgeschlagenen dreistufigen Vorgehen zur Layout- und Prozessmodellierung stellt die Anordnungsoptimierung dar. Auf Basis der bisherigen Planungsergebnisse aus den Schritten „Initiale Layouterstellung“ und „Prozessmodellierung“ werden verbliebene Freiheitsgrade variiert, so dass sich eine Verbesserung des Planungsergebnisses ergibt.

In Bild 3-12 ist links das grundlegende Prinzip dargestellt, nachdem diese Anordnungsoptimierung unter Verwendung von Optimierungsalgorithmen ablaufen kann. Der grundsätzliche Ablauf wurde dabei aus WOENCKHAUS (1994) übernommen. Das dort beschriebene Konzept wird in mehreren Punkten erweitert.

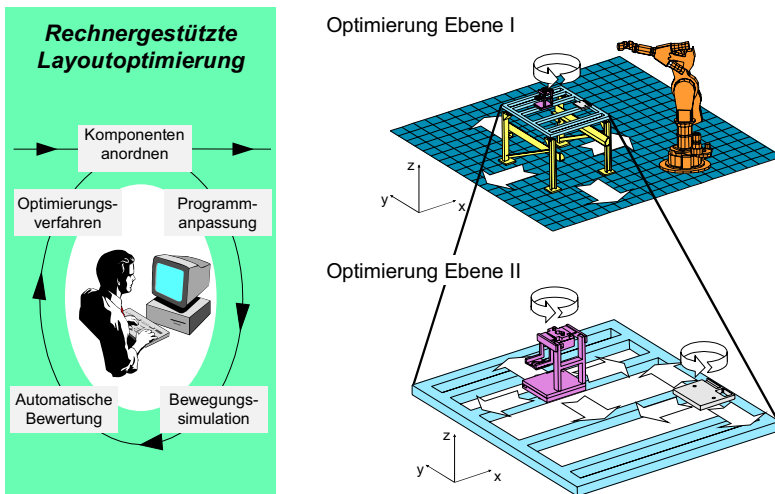


Bild 3-12: Prinzip der hierarchischen Anordnungsoptimierung

Zum einen kann durch die Verwendung der Daten aus den vorangegangenen Schritten „Layouterstellung“ und „Prozessmodellierung“ die manuelle Definition der Optimierungsaufgabe weitgehend entfallen. Zur Definition des Parameterraumes in Dimension und Intervall werden die für den Layoutaufbau verwendeten anordnungsbestimmenden Features verwendet. Die Paarung solcher

Features hat nicht unbedingt eine eindeutige relative Anordnung zur Folge. Bestimmte Freiheitsgrade lassen sich variieren, ohne dass die durch die Paarung vorgegebenen Randbedingungen verletzt werden. Diese Freiheitsgrade spannen den Parameterraum für die Anordnungsoptimierung auf.

Zum anderen wird die logische Struktur der Montageanlage dazu benutzt, um die Optimierungsaufgabe in mehrere hierarchische Ebenen zu zerlegen (Bild 3-12 rechts). Dadurch wird eine Komplexitätsreduzierung der Optimierungsaufgabe erreicht. Aus der Abbildung geht das Prinzip hervor. Unter Zuhilfenahme der logischen Montagestationsstruktur wird der Reihe nach ein Element des Baumes nach dem anderen als Basis für die Optimierung definiert. Im Rahmen der Optimierung einer Hierarchie werden die ungebundenen Freiheitsgrade der direkten Kinder des Basiselementes zur Aufspannung des Parameterraumes benutzt und der Optimierungslauf gestartet. Auf diese Art und Weise wird Schritt für Schritt die komplette Montagestation hinsichtlich der Komponentenanordnung optimiert.

Neben der Optimierung der Anordnung erfolgt eine teilweise Prozessoptimierung unter Verwendung der impliziten Offline-Programmierung. Bewegungsabläufe sind in der Regel von einer bestimmten Anordnung abhängig, bzw. auf diese abgestimmt um z.B. Kollisionen zu vermeiden. Verändert sich die Anordnung muss demnach auch der Bewegungsablauf neu generiert werden. Dies kann für Bewegungen, die mittels Methoden der impliziten Offline-Programmierung generiert wurden, automatisch während des Optimierungslaufes passieren. Andere Bewegungen müssen ggf. nachträglich per Hand verändert werden.

Die bei WOENCKHAUS (1994) schon angedachte Optimierung von manuellen Montagearbeitsplätzen wird in der vorliegenden Arbeit durch die Einbindung von Ergonomieanalysen ausdetailliert.

Das Ergebnis der Anordnungs- und Prozessoptimierung ist ein hinsichtlich der Zielvorgaben optimiertes Layout der Montagestation. Ebenso wurden die Prozesse auf die optimierte Anordnung abgestimmt. Ein weiteres Resultat ist die detaillierte Analyse der Montagestation, die in jedem Optimierungsschritt erneut erstellt wurde (Bild 3-13). Dadurch erhält der Anwender spezifische Aussagen darüber, ob die Zielvorgaben eingehalten werden können oder nicht.

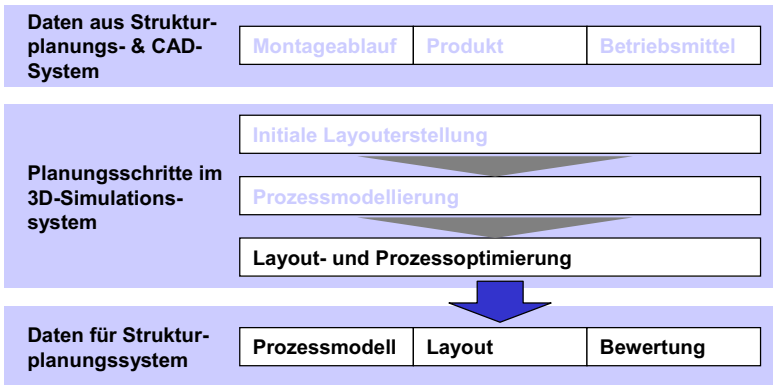


Bild 3-13: Ein- und Ausgabedaten der Layout- und Prozessoptimierung

3.6 Softwaretechnische Umsetzung

Als Basis für die Systementwicklung dient die UNIX-Version des graphischen 3D-Simulationssystems AnySIM (LINER 1997). Dieses System wurde ausgewählt, da auf den bereits vorhandenen Funktionalitäten aufgebaut werden kann. So unterstützt AnySIM die Offline-Programmierung von Robotern aber auch die Simulation manueller Bewegungsabläufe. Die implementierte Ermittlung von Prozesszeiten zusammen mit anderen Verfahren zur Kollisionüberprüfung und Ergonomieanalyse dient als Grundlage für die Bewertung einer Montagestation. Darüber hinaus diente das System als Grundlage für die Implementierung von Layoutoptimierung (WOENCKHAUS 1994) und impliziter Offline-Programmierung (KUGELMANN 1999). Mittels der Kommunikationsschnittstelle AnySIM/open ist es möglich, das System mit anderen Programmen zu integrieren. Die Schnittstelle basiert auf dem Interprozesskommunikationsstandard RPC (Remote Procedure Call – BLOOMER 1992).

Als Strukturplanungssystem, aus dem Daten über Montageablauf, Produkt und Betriebsmittel übernommen werden können, kommt das System CosMonAut zum Einsatz (FELDMANN 1997). Das System ermöglicht unter anderem die produktorientierte Erstellung von Montageablaufplänen

und Auswahl von Betriebsmitteln. Analysemethoden hinsichtlich Zeit und Kosten können in jedem Planungsstadium angewendet und kontinuierlich verfeinert werden. Dem System CosMonAut liegt eine objektorientierte Datenbank zugrunde, welche alle Strukturdaten aber auch Verweise auf CAD-Modellen von Produkt und Betriebsmitteln enthält.

Die CAD-Modelle werden mit dem System Pro/ENGINEER (N.N. 1996) erzeugt. Dieses System unterstützt die notwendige Funktionalität zur Definition von anordnungsbestimmenden Features. Dazu wurden die in Pro/ENGINEER generisch unterstützten Features speziell klassifiziert und an die Bedürfnisse der Montagesystemplanung angepasst (REINHART & LOFERER 1996).

Zur Realisierung der angestrebten Funktionalität zur effektiven Layout- und Prozessplanung muss das System AnySIM erweitert werden. Dies betrifft die Implementierung von weiteren Algorithmen zur Planungsautomatisierung und die Integration von neuen Interaktionshilfsmitteln aus dem VR-Bereich. Neben der nahtlosen Integration der drei Planungsstufen innerhalb des 3D-Simulationssystems müssen auch Schnittstellen zu Strukturplanungs- und CAD-System geschaffen werden um einen reibungslosen Datentransfer zu gewährleisten (CUIPER U.A. 1996).

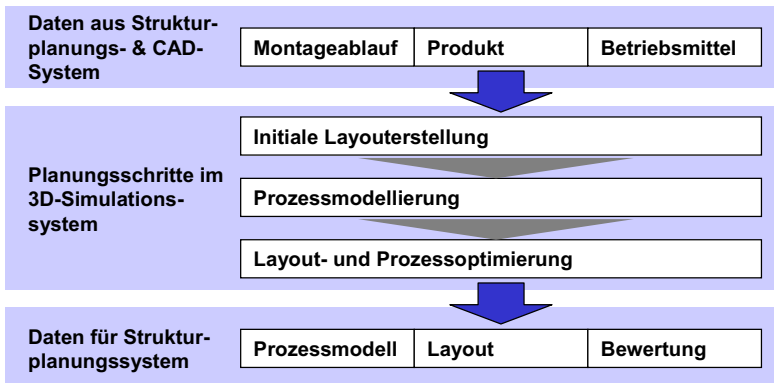


Bild 3-14: Integration des 3D-Planungssystems zu Strukturplanung und CAD

3.7 Zusammenfassung

Das vorgeschlagene Konzept unterstützt die Planung von Montageanlagen in einer rechnergestützten 3D-Umgebung. Es werden sowohl manuelle als auch automatisierte Montagestationen berücksichtigt. Das Konzept beschränkt sich auf die Planung einzelner Stationen. Die Planung und Simulation mehrerer Stationen und deren materialflusstechnische Vernetzung ist Gegenstand zahlreicher anderer Arbeiten (vgl. LEHMANN 1997, S. 19ff für eine Übersicht).

Durch die Trennung von strukturellen und räumlichen Planungsinhalten erfolgt eine Komplexitätsreduzierung der Planungsaufgabe. Die Kombination von automatisierten Planungsmodulen mit innovativen Interaktionsmedien stellt eine effiziente Planung sicher. Der Planer wird durch eine entsprechende Methodik darin unterstützt in jedem Planungsschritt das geeignete Planungswerkzeug zu verwenden (siehe Tabelle 3-5). Die informationstechnische Integration der Planungswerkzeuge stellt den reibungsarmen Übergang zwischen Planungsschritten und –werkzeugen sicher.

Insgesamt unterstützt das konzipierte System demnach das eingangs formulierte Ziel, die Simulationsmodellerstellung von Montagesystemen zu beschleunigen.

In den folgenden drei Kapiteln werden die Umsetzungen für die Unterstützung der drei Planungsphasen „Initiale Layouterstellung“, „Prozessmodellierung“ und „Layout- und Prozessoptimierung“ detailliert dargestellt. Im darauffolgenden Kapitel wird die Anwendung des Planungswerkzeuges gezeigt und eine Bewertung durchgeführt.

Schritt	Verwendete Strukturinformation	Erzeugte 3D-Information	Algorithmen zur Planungsautomatisierung	VR-gestützte Interaktion
Layouterstellung	<ul style="list-style-type: none"> Layoutstruktur 	<ul style="list-style-type: none"> Räumliche Anlagenanordnung 	<ul style="list-style-type: none"> Automatische Layoutkonfiguration durch anordnungsbestimmende Features 	<ul style="list-style-type: none"> Veränderung der Anordnung unter Nutzung der Freiheitsgrade
Prozessmodellierung	<ul style="list-style-type: none"> Prozessstruktur 	<ul style="list-style-type: none"> Räumliche Bewegungsabläufe 	<ul style="list-style-type: none"> Implizite Offline-Programmierung (Bahnplanung, Greifplanung, Transportplanung, Fügebewegungen) Greifplanung für das Menschmodell 	<ul style="list-style-type: none"> Generierung manueller Bewegungsabläufe
Anordnungs- und Prozessoptimierung	<ul style="list-style-type: none"> Layoutstruktur Prozessstruktur 	<ul style="list-style-type: none"> Räumliche Anlagenanordnung Räumliche Bewegungsabläufe 	<ul style="list-style-type: none"> Optimierungsalgorithmen Ermittlung der Zielerfüllungskriterien (Taktzeitermittlung, MTM-Analyse, OWAS-Ergonomie-Analyse, ...) Implizite Offline-Programmierung 	<ul style="list-style-type: none"> Auswahl von optimierten Alternativen Veränderung der optimierten Alternativen unter Berücksichtigung nicht-formalisierbarer Randbedingungen (Erfahrung, Gefühl)

Tabelle 3-5: Übersicht über die im konzipierten System durchzuführenden Planungsschritte

4 Layouterstellung

4.1 Übersicht

Der erste Schritt im vorgeschlagenen dreistufigen Konzept zur effizienten Anlagenplanung besteht in der Erstellung des Layouts. Als Layout wird dabei die Zusammenstellung der für die Montageaufgabe notwendigen Komponenten und Produkte bezeichnet. Das Layout enthält darüber hinaus Informationen über die relative räumliche Lage der einzelnen Layoutobjekte zueinander.

Zunächst wird die Notwendigkeit dieses Planungsschrittes erläutert. Entsprechend dem der Arbeit zugrundeliegendem Prinzip der zielgerichteten Modellierung wird erklärt, welche Aussagen anhand der statischen räumlichen Anordnung gemacht werden können und welche nicht.

Ergebnis der im folgenden dargestellten strukturierten Layouterstellung ist die Zusammenstellung aller für die Montage notwendiger Betriebsmittel und deren logische Struktur. Ebenso ist darin die Zuordnung von einzelnen Produktteilen zu diesen Betriebsmitteln vorgegeben (z.B. Anordnung in Magazinen).

Dieser strukturierte Layoutaufbau enthält noch keinerlei räumliche Information über die Anordnung der Komponenten. Erst durch die Verknüpfung von CAD-Modellen mit dieser Struktur kann in einem, weitgehend automatisierten, Prozess das räumliche Abbild einer Produktionsanlage erstellt werden. Die dazu notwendigen Informationen und Verfahren werden im vorliegenden Kapitel beschrieben.

Ergebnis der betrachteten Planungsstufe „Layouterstellung“ ist die statische räumliche Anordnung sämtlicher am Montageprozess beteiligter Betriebsmittel und Produktteile. Erste Aussagen, die anhand dieses soweit detaillierten Simulationsmodells gemacht werden können, sind im wesentlichen die Stückliste für den Aufbau der Anlage und eine erste Abschätzung für den Platzbedarf der Anlage.

4.2 Aufgaben der Layouterstellung

Die Layouterstellung ist der erste Schritt in der Erstellung des räumlichen Simulationsmodells einer Produktionsanlage. Der Planer sieht sich dabei mit folgenden Aufgaben konfrontiert:

- Aufnahme der Ist-Situation in Abhängigkeit von einer Neu- oder Umplanung
- Ermittlung der beteiligten Produktteile
- Ermittlung der notwendigen Betriebsmittel
- Räumliche Anordnung aller Komponenten zu einem sinnvollen Aufbau

Um diese Aufgaben zu erfüllen, benötigt der Planer folgende Informationen:

- Informationen über den Montageprozess
- Raumsituation für den Aufbau der Anlage

4.3 Planung der Layoutstruktur

4.3.1 Bestandteile einer Montagestation

Eine Montagestation setzt sich aus den Produktteilen, die in der Anlage montiert werden und den Betriebsmitteln, die zur Montage der Produktteile notwendig sind, zusammen. Zu den Betriebsmitteln werden dabei auch Mitarbeiter gerechnet, die manuelle Tätigkeiten in der Station auszuführen haben. Die Betriebsmittel können wiederum in aktive und passive Komponenten unterteilt werden. Als aktive Komponenten werden dabei Betriebsmittel bezeichnet, die direkt den Montageprozess beeinflussen (z.B. Roboter oder Mitarbeiter). Passive Komponenten sind Hilfseinrichtungen, welche für die Montage notwendig sind, jedoch selbst nicht den Bewegungsablauf direkt beeinflussen (z.B. Magazine oder Tische).

Diese Unterscheidung der Betriebsmittel spielt in späteren Planungsstufen eine wesentliche Rolle. Im aktuell betrachteten Planungsschritt „Layouterstellung“ geht es darum, die Bestandteile der Montagestation zu ermitteln und zu einer ersten räumlichen Anordnung zusammenzusetzen.

4.3.2 Prozessorientierte Layouterstellung

Im folgenden soll das Konzept der prozessorientierten Layouterstellung dargestellt werden. Dieses Konzept kann dem Planer gewissermaßen als Leitfaden zur systematisierten Erstellung des Layouts dienen. Zusätzlich ermöglicht die Systematisierung dieses Planungsschrittes das Design eines Softwaremoduls zur Unterstützung des Planers für den Schritt der Layouterstellung.

Dem Planer stehen für den vorliegenden Planungsschritt Informationen über die zu verwendenden Betriebsmittel, das zu montierende Produkt und der Montageablaufplan vor. Diese Informationen stehen im Strukturplanungssystem bereits zur Verfügung (vgl. Bild 4-5).

Für die räumliche Anordnung der Stationskomponenten ist dies jedoch noch nicht ausreichend. Um zu bestimmen, in welcher relativen Raumlage einzelne Betriebsmittel und Produktteile zu einander stehen, muss zusätzlich die Struktur des Layouts erzeugt werden, d.h. die Beziehungsstruktur aller geometrischen Komponenten der Montagestation.

Als Basis zur Layoutstrukturermittlung dient der Montageablaufplan. Die Idee ist dabei, für jeden einzelnen Prozess-Schritt des Gesamtplanes eine Teilstruktur des Layouts zu erstellen. Die Gesamtlayoutstruktur kann anschließend durch Vereinigung der Teilstrukturen gebildet werden.

Ein beispielhafter Ausschnitt aus einem Montageablaufplan ist in Bild 4-1 zu sehen. Dargestellt sind die einzelnen Schritte der Montage der Welle einer Bohrmaschine in das Gehäuse der Bohrmaschine. Gehäuse und Welle sind dabei im Ausgangszustand magaziniert. Aus dem Ablaufplan ist ersichtlich, dass im folgenden die Welle gegriffen wird und zum Gehäuse transportiert wird. Nach dem eigentlichen Fügevorgang wird die resultierende Baugruppe wiederum magaziniert.



Bild 4-1: Ausschnitt aus einem Montageablaufplan zur Montage eines Bohrmaschinengetriebes

Anhand von Bild 4-2 wird die Erstellung der Layoutstruktur zu einem einzelnen Schritt des Montageablaufplanes deutlich. Zunächst erfolgt eine Zusammenstellung der für diesen Schritt notwendigen Betriebsmittel. Der Planer wählt dazu im Strukturplanungssystem aus einer Betriebsmittelbibliothek die zu verwendenden Komponenten aus. Er kann zusätzlich auf die Layoutstruktur von vorangegangenen Prozess-Schritten (z.B. „Gehäuse magazinieren“, „Welle greifen“) zugreifen um den Auswahlprozess zu beschleunigen.

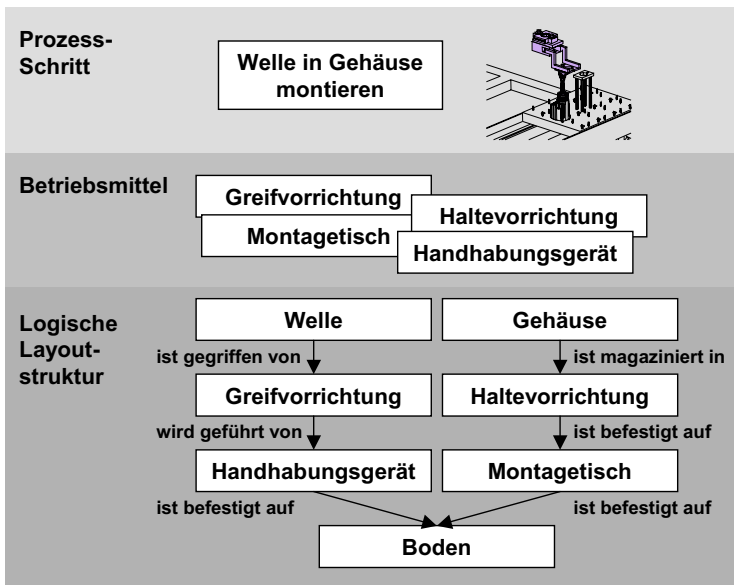


Bild 4-2: Erstellung der Layoutstruktur für einen Prozess-Schritt

Danach wird festgelegt, in welcher logischen Beziehung die einzelnen Betriebsmittel und Produktteile zueinander stehen. Es handelt sich hierbei um gerichtete Eltern-Kind-Beziehungen, d.h. eine Komponente kann immer genau einer anderen logisch zugeordnet werden. Die Zuordnung eines Betriebsmittels oder Produktteils zu mehreren anderen zu einem Zeitpunkt ist nicht vorgesehen. Die Bedeutung einer solchen Beziehung wäre beispielsweise, dass ein Mitarbeiter in der Montage nicht nur einer Station zugeordnet werden kann, sondern Tätigkeiten in mehreren

Stationen verrichtet. Eine Erweiterung des Konzeptes hinsichtlich dieser dynamischen Zuordnung von Ressourcen ist jedoch prinzipiell möglich. In Bild 4-3 ist der beschriebenen Layoutstruktur zur Veranschaulichung die räumliche Repräsentation der Montageanlage gegenübergestellt.

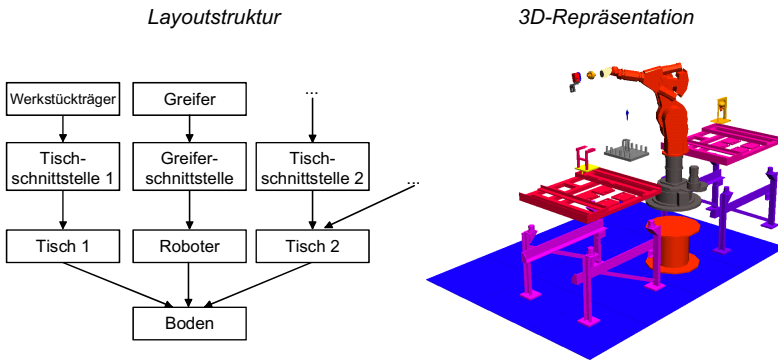


Bild 4-3: Montagestation dargestellt als Layoutstruktur und in ihrer korrespondierenden räumlichen Ausprägung

Auf diese Art und Weise wird für jeden Prozess-Schritt ein Teil der Gesamtlayoutstruktur geplant. In Zwischenschritten oder zum Abschluss müssen diese Teilstrukturen kombiniert werden. Das prinzipielle Vorgehen soll anhand von Bild 4-4 erläutert werden, das die Teilstrukturen der Prozess-Schritte „Welle in Gehäuse montieren“ und „Baugruppe magazinieren“ vereint. Zu erkennen ist, dass einige Betriebsmittel in beiden Prozess-Schritten verwendet werden. Da die gemeinsam verwendeten Komponenten auch identische logische Beziehungen haben, ist die Vereinigung in diesem Fall die Schnittmenge der beiden Strukturen (dargestellt durch grau umrandete Kästen) und damit automatisiert erstellbar. Gäbe es unterschiedliche Beziehungen, z.B. dass das Handhabungsgerät einem anderen Boden (sprich Stationsbereich) zugeordnet wäre, müsste der Planer an dieser Stelle eine Entscheidung über die Zuordnung selbst treffen. Eine weitere Besonderheit, welche der Planer bei der Erstellung der Gesamtstruktur beachten muss, ist die Tatsache, dass bedingt durch den Prozess sich Layoutstrukturänderungen ergeben. So ist in einem Prozess-Schritt die Welle der Greifvorrichtung zugeordnet, im nächsten jedoch die montierte Baugruppe bestehend aus Welle und Gehäuse. Auch solche Redundanzen

müssen manuell behoben werden, da allein der Planer die Semantik der Verbindung interpretieren kann.

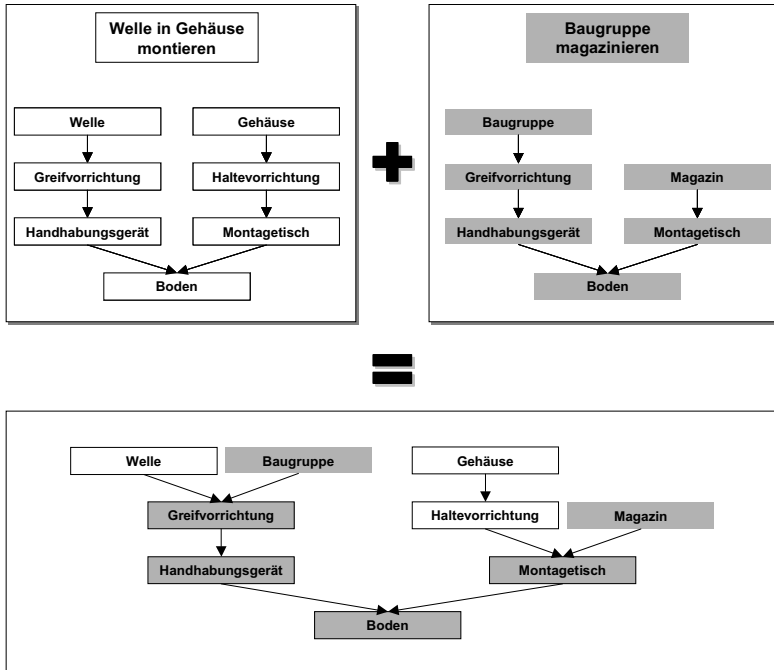


Bild 4-4: Vereinigung von Layoutteilstrukturen

4.3.3 Systemtechnische Umsetzung der Layoutstrukturplanung

Da für die reine Layoutstrukturplanung noch keinerlei 3D-Information notwendig ist, ist dieser Teil der initialen Layouterstellung im Strukturplanungssystem CosMonAut (FELDMANN 1997, S. 129/130) realisiert.

In Bild 4-5 ist dargestellt, welche Schritte in diesem System vor der Planung der Layoutstruktur bereits durchgeführt werden können. Ausgehend von der Struktur des Produktes wird in dem System ein Montageablaufplan abgeleitet. Der Ablaufplan enthält Angaben über die Art der Teilprozesse gemäß VDI 2860 und die jeweilig betroffenen

Produktteile. Die Ableitung des Ablaufplanes geschieht automatisch unter Zuhilfenahme von vordefinierten Regeln und einer Wissensbasis. Im nächsten Schritt wird dieser Ablaufplan ggf. um einzelne Montageprozessschritte ergänzt. Gemäß der bereits beschriebenen Methode des prozessorientierten Layoutaufbaus werden dann für die einzelnen Prozessschritte die notwendigen Betriebsmittel ausgewählt und zueinander und zu den Produktteilen in Beziehung gesetzt.

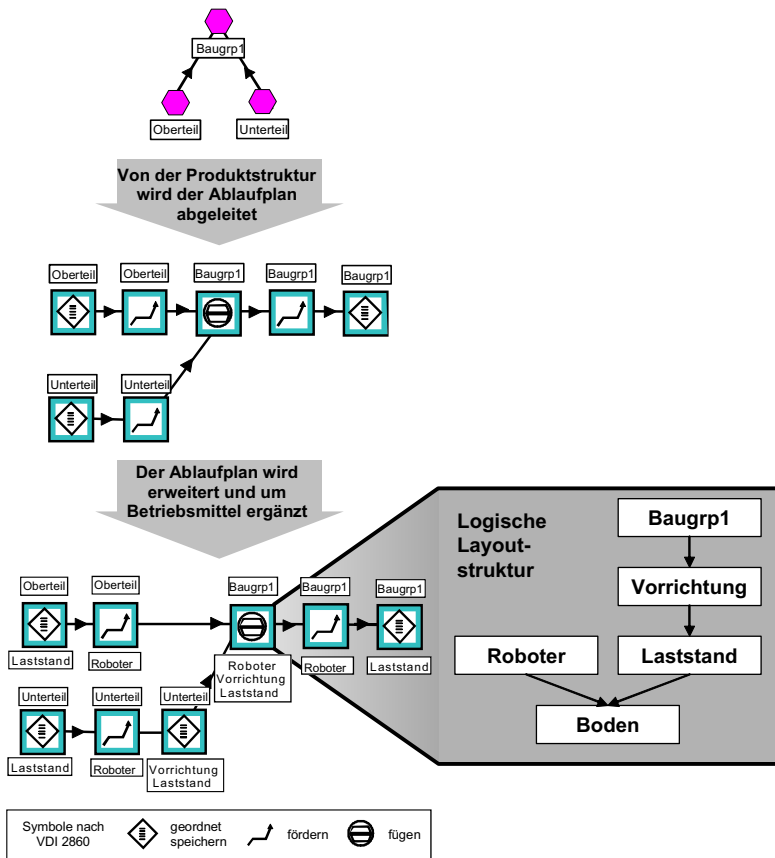


Bild 4-5: Planungsschritte in der Strukturplanung (nach CUIPER & ROßGODERER 1997)

Mit diesen Vorgaben kann ein in das Strukturplanungssystem integrierter Editor gestartet werden, der die Erstellung der Layoutstruktur ermöglicht. Im Ausgangszustand werden in dem Editor alle Komponenten (Betriebsmittel und Produktteile) dargestellt, die an dem betrachteten Prozessschritt beteiligt sind. Durch Definition der logischen Abhängigkeit zwischen den einzelnen Komponenten durch den Planer entsteht die gewünschte Montagestationsstruktur.

4.4 Planung der räumlichen Anordnung

4.4.1 Grundsätzliches Vorgehen

Basierend auf der Layoutstrukturinformation kann nun die Erstellung einer ersten räumlichen Anordnung erfolgen. Folgende Teilschritte können dabei innerhalb des vorgeschlagenen Systems identifiziert werden:

- Import der CAD-Daten
- Analyse der anordnungsbestimmenden Features
- Automatische Generierung einer ersten Anordnung
- Interaktive Modifikation der Anordnung unter Berücksichtigung verbleibender Freiheitsgrade

4.4.2 Import der CAD-Daten

Das verwendete Strukturplanungssystem CosMonAut verwaltet zu jedem Element in seiner Datenbank die entsprechenden CAD-Modelle. Durch die Anbindung des 3D-Simulationssystems an das System CosMonAut kann auf diese CAD-Modelle zugegriffen werden. Dazu muss lediglich der zu betrachtende Prozessschritt ausgewählt werden und der Datenexport in das 3D-Simulationssystem gestartet werden. Daraufhin werden alle am Prozessschritt beteiligten Komponenten als CAD-Modelle importiert. Als Datenformat kommen dabei alle durch AnySIM bearbeitbaren Formate in Frage.

Ein mögliches Ergebnis dieses Imports ist in Bild 4-6 zu sehen. Wie zu erkennen ist, ist die Anordnung der CAD-Modelle zunächst nicht sinnvoll. Sie ist allein abhängig von den Generierungskoordinatensystemen

der jeweiligen Modelle. Die Erstellung einer sinnvollen Anordnung gemäss der bereits geplanten Layoutstruktur ist Aufgabe des nächsten Schrittes.

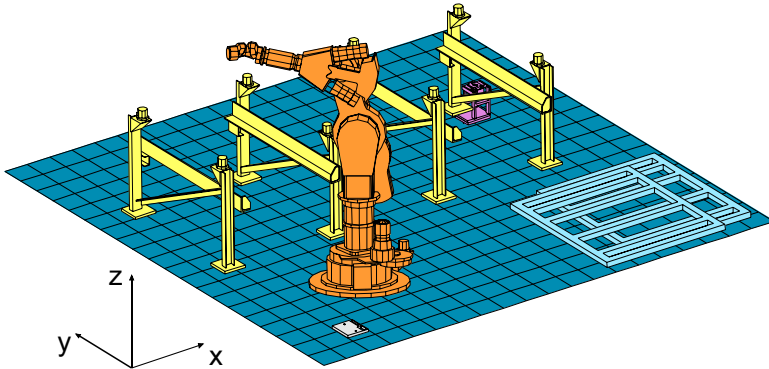


Bild 4-6: *Layout nach dem Import der CAD-Daten*

4.4.3 Analyse der anordnungsbestimmenden Features

Neben der Information über die Gestalt der Betriebsmittel und Produkte enthalten die importierten CAD-Modelle weitergehende Daten über die Bedeutung bestimmter gestaltender Elemente. Ganz allgemein werden diese Zusatzdaten als Features bezeichnet. Es existieren mehrere Klassen von Features (vgl. z.B. SPUR & KRAUSE 1997, S. 175ff). An dieser Stelle interessiert nur die Klasse von Features, die eine Bedeutung für die Anordnung von Komponenten besitzen. Diese Klasse wird weiterhin als anordnungsbestimmende Features bezeichnet.

Unter dem Begriff Verbindungsfeatures werden alle Features zusammengefasst, die in der Anlagenplanung verwendet werden, um zwei Teile in eine definierte Lage zueinander zu bringen. Dabei kann es sich um feste oder variable Verbindungen handeln (Bild 4-7). Ein Beispiel für eine feste Verbindung ist die Anordnung eines Greifers bezüglich eines Roboters. Aufgrund von Schnittstellen für Versorgungseinrichtungen des Greifers ist hier immer eine feste räumliche Konfiguration des Greifers vorgegeben. Beispiele für variable Verbindungen stellen die in Bild 4-7 dargestellten Ablageflächen dar. Sie definieren die Relativkonfiguration

zweier Komponenten lediglich in einer Ebene. Es bleiben daher drei Freiheitsgrade ungebunden, um die Komponenten zueinander anzuordnen. Ein anderes Beispiel hierfür sind Symmetrieachsen von Zylindern und Bohrungen. Werden diese zur Deckung gebracht, um eine Relativanordnung zu erzeugen, verbleiben zwei ungebundene Freiheitsgrade.

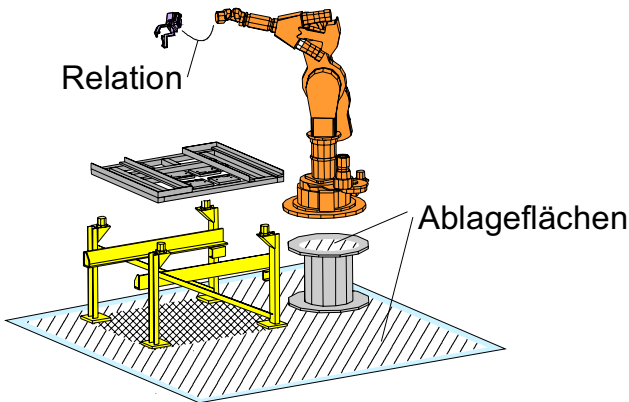


Bild 4-7: Beispiele für anordnungsbestimmende Features in einer Montagestation

Wie an den Beispielen zu erkennen ist, geht es bei der Analyse der anordnungsbestimmenden Features darum, immer eine komplementäre Paarung zu finden deren zwei Komponenten relativ zueinander anzuordnen sind. Soll ein Tisch auf den Boden platziert werden und der Boden besitzt eine Aufstellfläche, so muss die am Tisch definierte Abstellfläche damit zur Deckung gebracht werden. Gleiches gilt für Symmetrieachsen und andere mögliche anordnungsbestimmende Features.

Die durch die Analyse der anordnungsbestimmenden Feature ermittelten ungebundenen Freiheitsgrade lassen sich als Zusatzinformation an die Verbindungslinien der Layoutstruktur hinzufügen (Bild 4-8). Diese Zusatzinformation wird zur Erzeugung der ersten Anordnung und zur späteren Anordnungsoptimierung verwendet.

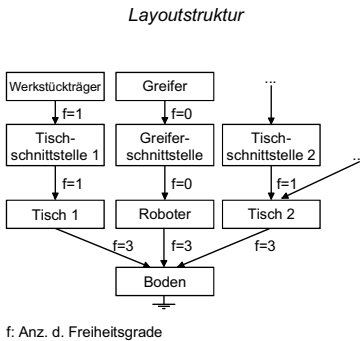


Bild 4-8: Die Anzahl ungebundener Freiheitsgrade als Zusatzinformation der Layoutstruktur

4.4.4 Automatische Generierung einer ersten Anordnung

Die Informationen aus der Featureanalyse werden im nächsten Schritt dazu verwendet, die importierten CAD-Modelle zu einer ersten vernünftigen Konfiguration anzuordnen.

Ausgehend von der Wurzel der Layoutstruktur wird dazu Schritt für Schritt jedes Element der Struktur platziert. Die Baumstruktur wird nach dem Breadth-First-Schema abgearbeitet, d.h. es werden zunächst alle direkten Nachfolger eines Elements berücksichtigt, bevor die Nachfolgeelemente traversiert werden. Für jedes Element werden dabei die folgenden Aufgaben gelöst:

- Ermittlung einer komplementären Featurepaarung zum Vorgänger im Baum
- Anordnung gemäß der Featurepaarung
- Vermeidung von Kollisionen durch Nutzung ungebundener Freiheitsgrade der Featurepaarung

In Bild 4-9 ist dieses Vorgehen anschaulich dargestellt. In Schritt (1) wird der erste Montagetisch unter Ausnutzung der Abstell-/Aufstellflächenbeziehung relativ zum Boden angeordnet. Da keine Kollision auftritt, verbleibt er in der Ausgangsposition. In Schritt (2) wird nun gemäß der Layoutstruktur der zweite Tisch angeordnet. Dies erfolgt unter Ausnutzung der selben Featurepaarung wie für den ersten Tisch. Da sich

jedoch bei dieser Anordnung eine Kollision mit dem ersten Tisch ergibt, werden nun die ungebundenen Freiheitsgrade der Featurepaarung genutzt um eine kollisionsfreie Konfiguration zu erzeugen. In einem einfachen Iterationsverfahren erfolgt eine Variation der Freiheitsgrade in einstellbarer Schrittweite. Dabei werden zunächst die translatorischen Freiheitsgrade verändert und danach die rotatorischen. Die Intervallgrenzen der Parametervariation werden durch die Art der Featurepaarung definiert. Bei einer Abstell-/Aufstellflächenbeziehung wird die Ausdehnung der Aufstellfläche als Grenze definiert, innerhalb derer sich die Abstellfläche bewegen darf. Der rotatorische Anteil ist in diesem Fall unlimitiert.

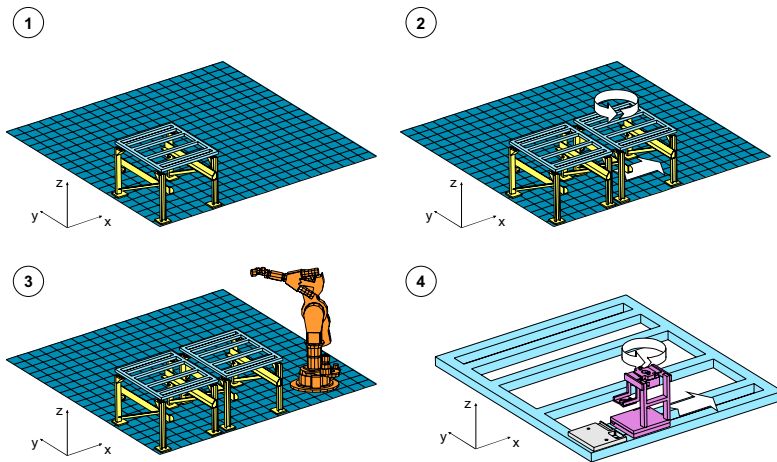


Bild 4-9: Schrittweise automatische Erzeugung der räumlichen Anordnung

Schritt (3) zeigt die Anordnung des Roboters auf dem Boden. Genau wie der zweite Montagetisch wurde auch der Roboter durch Variation der ungebundenen Freiheitsgrade in eine kollisionsfreie Anordnung gebracht. Schritt (4) schließlich zeigt die Anordnung innerhalb der nächsten Hierarchiestufe der Layoutstruktur. Dort erfolgt im Beispiel die automatische Platzierung von Montagemodulen auf dem Tischrahmen.

4.4.5 Interaktive Modifikation der Anordnung

Das Ergebnis der automatischen Generierung der Anordnung kann wie im oben dargestellten Beispiel ein Layout sein, in dem Roboter oder Mitarbeiter nicht alle Positionen erreichen können, die sie während der Durchführung der Montage erreichen müssen. Eine automatische Veränderung des Layouts dergestalt, dass alle Arbeitspositionen erreichbar sind, ist erst nach Abschluss der Prozessmodellierung möglich. Die Lösung dieses Problems erfolgt daher im dritten Schritt der Layout- und Prozessmodellierung, der Optimierungsphase (siehe Kapitel 6).

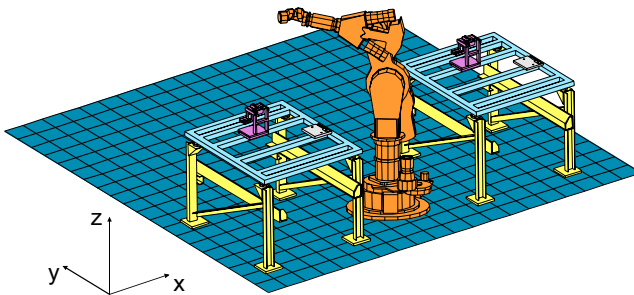


Bild 4-10: Interaktive Anordnung zur Überprüfung des Roboterarbeitsraumes

Um bereits in dieser Planungsphase Aussagen über die Eignung bestimmter Betriebsmittel treffen zu können, wird eine interaktive Veränderung der Anordnung unterstützt. Zur Vereinfachung der Bedienung und Vermeidung von Fehlplatzierungen können dabei lediglich die ungebundenen Freiheitsgrade verändert werden. Darüber hinaus werden, wie bei der automatischen Platzierung, die Intervallgrenzen der jeweiligen Featurepaarung berücksichtigt und auf Kollisionsfreiheit geprüft. Die Aufgabe ist in diesem Fall ausreichend mit herkömmlichen Interaktionsmedien lösbar, da in der Regel nicht mehr als drei Freiheitsgrade gleichzeitig variiert werden können.

4.4.6 Systemtechnische Umsetzung der räumlichen Layouterstellung

Die Umsetzung der räumlichen Anordnungsplanung erfolgt im System AnySIM. Zum Zugriff auf die durch das Strukturplanungssystem verwalteten CAD-Modelle ist eine Anbindung an das System CosMonAut realisiert. Die CAD-Modelle enthalten neben der Gestaltinformation die anordnungsbestimmenden Features, welche im CAD-System definiert werden können. Unterstützte Featurepaarungen sind:

- Feste Verbindungen
- Aufstell- und Abstellflächen
- Symmetrieachsen

Für jede dieser Featurepaarungen existiert eine Anordnungsstrategie die eine automatische Generierung des Layouts der Montagestation ermöglicht. Die folgenden generierten und ermittelten Zusatzinformationen werden an das Strukturplanungssystem zurück übergeben:

- Ungebundene Freiheitsgrade
- Relativanordnung der Komponenten

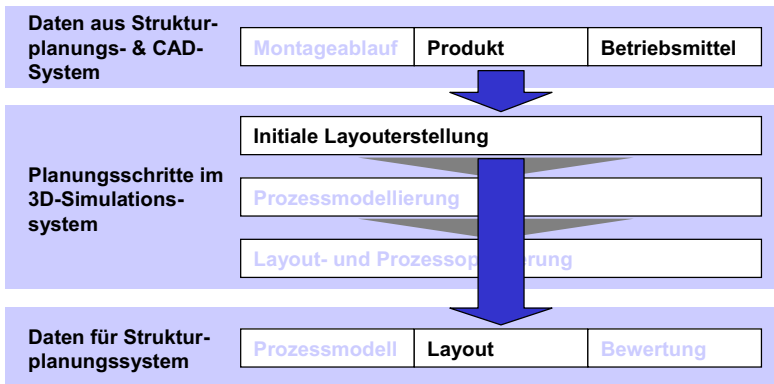


Bild 4-11: Ein- und Ausgangsdaten der Layoutanordnung

4.5 Ergebnis des Planungsschritts „Layouterstellung“

Ergebnis des Planungsschrittes „Layouterstellung“ ist ein erstes dreidimensionales Modell der Montagestation. Neben der reinen Anordnung der einzelnen Komponenten enthält dieses Modell Angaben über die Struktur der Station und die veränderlichen Freiheitsgrade innerhalb der Station.

Anhand dieses einfachen statischen Simulationsmodells können bereits erste Aussagen über die Eignung bestimmter Betriebsmittel für den Montageprozess gemacht werden. Wesentliches Hilfsmittel dafür ist die graphischen Darstellung von Roboterarbeitsräumen oder optimaler Greifräume des Menschen (Bild 4-12).

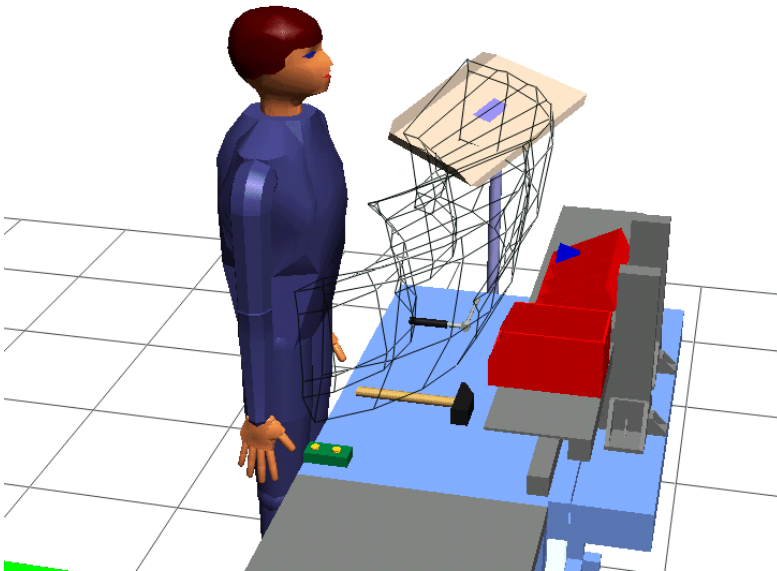


Bild 4-12: Graphische Darstellung von Greifbereichen des Menschen

Mit Hilfe der Roboterarbeitsräume ist es möglich, erste Aussagen hinsichtlich der potentiellen Erreichbarkeit von späteren Arbeitspunkten machen zu können. Anhand dessen kann schon in diesem Stadium eine

Vorauswahl in Frage kommender Handhabungsgeräte getroffen werden. Vergleicht man diese Arbeitsräume mit der Arbeitsumgebung, kann man sehr leicht feststellen, wie hoch die Raumabdeckung durch das Handhabungsgerät ist.

Die Darstellung optimaler Greifbereiche des Menschen ermöglicht es, eine erste ergonomische Anordnung von Komponenten, zu ermitteln. Alleine durch automatisches oder interaktives Plazieren der Komponenten in diesen Greifbereich kann überprüft werden, ob alle verwendeten Betriebsmittel ergonomisch optimal erreichbar sind oder nicht.

5 Prozessmodellierung hybrider Montageanlagen

5.1 Übersicht

Im vorliegenden Kapitel wird der neue Ansatz zur Modellierung von Bewegungsabläufen in Montageanlagen dargestellt. Das Ergebnis der Modellierung wird im folgenden als Prozessmodell bezeichnet. Zunächst wird die Bedeutung des Prozessmodells für das Gesamtsimulationsmodell erläutert. Im weiteren werden die im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelten Mechanismen zur automatisierten und interaktiven Generierung des Prozessmodells dargelegt.

Bedingt durch die spezifischen Eigenschaften von automatisierten und manuellen Montagestationen erfolgt anschließend eine getrennte Betrachtung der Erstellung des jeweiligen Prozessmodells.

Die Erstellung von Roboterprogrammen lässt sich durch Einsatz entsprechender Algorithmen weitgehend automatisieren. Unter Anwendung impliziter Offline-Programmierung können unter Vorgabe des strukturellen Montageprozesses die Ausführungsprogramme für Roboter generiert werden. Das System schließt dazu die Lücke zwischen dem Vorhandensein einzelner Algorithmen zur Programmerstellung einzelner Prozess-Schritte auf der einen Seite und dem Bedarf nach der Abbildung eines kompletten Montageprozesses auf der anderen Seite.

Demgegenüber muss aufgrund der hohen Bewegungsflexibilität des Menschen die Erstellung manueller Bewegungsabläufe überwiegend durch Eingaben seitens des Planers erfolgen. Um diesen Prozess zu erleichtern, werden erstmals die entsprechenden Entwicklungen aus dem VR-Bereich direkt in dem zugrundeliegenden 3D-Simulationssystem umgesetzt.

Anhand der Einordnung des Bausteines „Prozessmodellierung“ in das Gesamtlayoutplanungssystem soll verdeutlicht werden, in welcher Beziehung das Prozessmodell zu den anderen Bausteinen steht.

5.2 Bedeutung der Prozessmodellierung

Nach der im ersten Schritt durchgeführten Layouterstellung, ist es nun Aufgabe des vorliegenden Schrittes der Prozessmodellierung festzustellen

len, ob sich die vorgegebene Montageaufgabe unter Verwendung der ausgewählten Betriebsmittel durchführen lässt. Der Planer muss dabei folgende Teilaufgaben lösen:

- Umsetzen des Montageablaufplanes in räumliche Bewegungsabläufe
- Sicherstellung eines kollisionsfreien Bewegungsverlaufes
- Sicherstellung möglichst kurzer Prozesszeiten
- Beachtung der ergonomischen Situation für manuelle Tätigkeiten

Für die Erfüllung dieser Aufgaben bedient sich der Planer folgender Eingangsgrößen:

- Montageablaufplan in Strukturdarstellung (vgl. Bild 5-1)
- Ausgewählte Betriebsmittel (vgl. Bild 5-1)
- Erste Layoutanordnung (vgl. Kapitel 4)

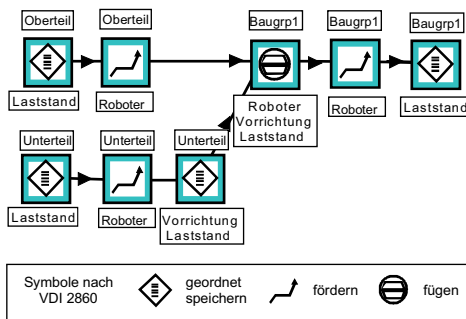


Bild 5-1: Strukturinformationen als Eingangsgrößen für die Modellierung der räumlichen Bewegungsabläufe

Anhand der Simulation von Bewegungsabläufen in einem 3D-Simulationssystem können detaillierte Aussagen über Machbarkeit und Dauer der Montageprozesse getroffen werden. Die Genauigkeit einer Bewegungssimulation liegt im Falle der Zeitermittlung für automatisierte Montageprozesse mit heutigen 3D-Simulationssystemen bei etwa 95%. Durch die Bewegungssimulation können folgende Aussagen getroffen werden (LINNERS & WUNSCH 1998):

- Ermittlung der Prozesszeiten
- Erkennung von Kollisionen
- Ermittlung der Arbeitsplatzergonomie für manuelle Montagestationen

5.3 Modellierung automatisierter Prozesse

5.3.1 Grundsätzliches Vorgehen

Zur automatisierten Generierung der Programme für Handhabungsgeräte wird die Methode der impliziten Offline-Programmierung verwendet. Darunter ist zu verstehen, dass aus einer aufgabenorientierten Beschreibung der Handhabungsaufgabe heraus die gewünschten Steuerungssätze für die Geräte erzeugt werden (ROBGODERER & KUGELMANN 1995). Die Generierung der Steuerungssätze ist dabei unabhängig vom verwendeten Roboter. Das Simulationsmodell des Roboters muss lediglich die Rücktransformation und Befehle zum Erzeugen von Bewegungssätzen zur Verfügung stellen. Die Beschreibung der Aufgabe orientiert sich dabei an den im Montageplanungssystem CosMonAut definierten Montageelementarprozessen (CUIPER 2000, S. 86) die sich wiederum an der VDI-RICHTLINIE 2860 (1990) orientieren.

Die Aufgabe des Planungssystems ist es, basierend auf der strukturellen Ablaufbeschreibung und der Geometrien der eingesetzten Betriebsmittel und Produktteile, detaillierte Ablaufbeschreibungen für automatisierte Handhabungsgeräte in Form von Steuerungsanweisungen zu erzeugen (vgl. Bild 5-2). Dabei kann für einige Elemente des Prozesses (z.B. „Greifen“, „Transfer“) auf in der Literatur beschriebene Verfahren zurückgegriffen werden. Für diese Algorithmen ist eine Anpassung an das zu implementierende System notwendig. Dies bedeutet, dass die Ein- und Ausgangsdaten der Algorithmen aus den integrierten Systemen (Strukturplanung, CAD-System, 3D-Simulationssystem) zur Verfügung gestellt bzw. an diese übermittelt werden. Für andere Prozessbestandteile (z.B. „Magazinieren“) ist die Entwicklung von neuen Mechanismen notwendig die ebenso integriert werden müssen.

Durch schrittweises Übersetzen der Montageelementarprozesse mittels existierender und neuer Algorithmen können damit die kompletten

Steuerungsanweisen für alle in der Station eingesetzten Handhabungsgeräte erzeugt werden.

Montageablaufplan



CAD-Modelle + Funktions- elemente:

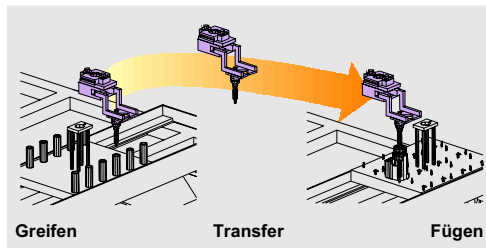
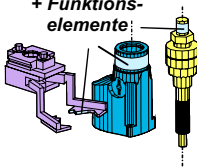


Bild 5-2: Implizite Offline-Programmierung (REINHART & ROßGODERER 1998)

5.3.2 Umsetzung der Elementarprozesse in Bewegungsabläufe

Für jeden der zu unterstützenden Elementarprozesse ist die Implementierung eines Übersetzers notwendig, der aus der abstrakten Aufgabenbeschreibung die Steueranweisungen für die Durchführung des dreidimensionalen Bewegungsablaufes erzeugt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden folgende Elementarprozesse unterstützt, welche einen Grossteil der Montageprozesse darstellen (vgl. HÖRMANN & HÖRMANN 1990):

- Greifen (auch Spannen)
- Transportieren
- Ablegen (enthält Fügen & Magazinieren)

Darüber hinaus wurde die für manche Vorgänge notwendige Synchronisation von mehreren Betriebsmitteln berücksichtigt. Dies ist z.B. notwendig, um Bewegungen für das Greifen oder Ablegen zu

erzeugen. Hierbei wird zum einen der ausführende Roboter an die Greifposition bewegt. Zum anderen muss jedoch zeitlich abgestimmt der Greifer geöffnet und geschlossen werden was an der realen Robotersteuerung durch setzen von Ausgangssignalen erfolgt.

Greifen

Für die Umsetzung des Greifvorgangs werden zunächst die notwendigen Parameter aus der Strukturinformation extrahiert. Der verwendete Algorithmus (KUGELMANN 1999) benötigt als Eingangsgrößen die folgende Information:

- ausführender Greifer
- zu greifendes Objekt

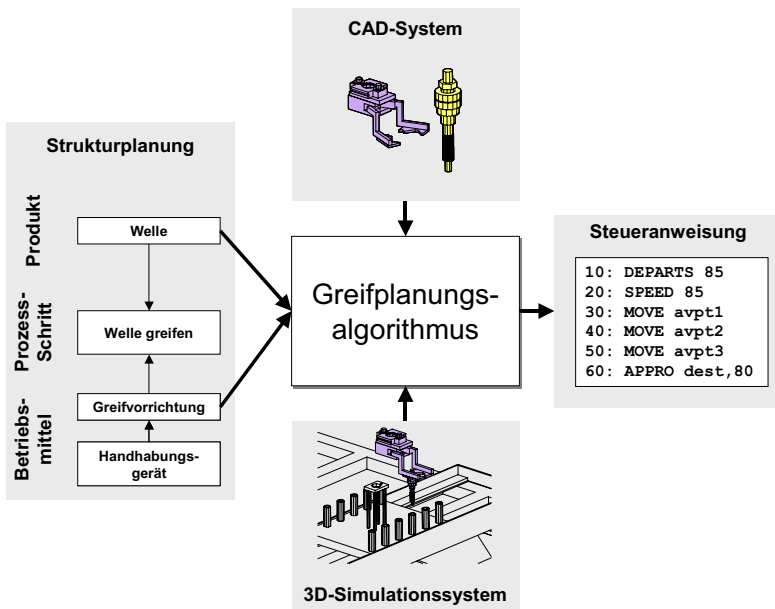


Bild 5-3: Integration des Greifplanungsalgorithmus in das entwickelte Planungssystem

Da der Planer im Rahmen der Strukturplanung (vgl. Kapitel 4.3) die notwendigen Betriebsmittel dem Prozess-Schritt „Greifen“ zugeordnet hat, stehen diese Informationen in der Datenbank des Strukturplanungssystems zur Verfügung. Die Daten werden mittels einer entsprechenden Interprozesskommunikation aus der Datenbank gelesen und dem Algorithmus zur Verfügung gestellt (vgl. Bild 5-3). Die notwendigen CAD-Modelle der betroffenen Betriebsmittel und Produkte werden aus dem CAD-System eingelesen. Die Layoutsituation ist im Planungssystem durch die in Kapitel 4 beschriebene „Layoutanordnung“ vorhanden. Damit ist alle Information vorhanden, damit der Greifplanungsalgorithmus wie im folgenden beschrieben die Steueranweisungen für das Handhabungsgerät erzeugen kann.

In der Greifplanung wird zunächst der Typ des ausgewählten Greifers untersucht (vgl. Bild 5-4). Je nach Typ (z.B. Parallelgreifer, 2- oder 3-Fingergreifer) kommen dann verschiedene Strategien zum Einsatz, um den Greifer relativ zum greifenden Objekt zu positionieren. Verfügt der Planer über eine Bibliothek von Greifern, kann auch basierend auf den Greifobjektmerkmalen (wie z.B. Durchmesser) ein optimaler Typ aus der Bibliothek ausgesucht werden. Sollte sich dieser Typ von dem durch die Strukturplanung vorgegebenen unterscheiden, wird diese Information an das Strukturplanungssystem zurückübermittelt.

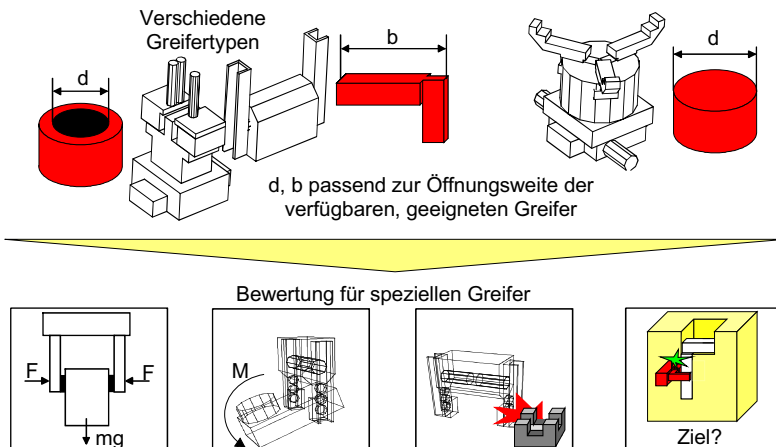


Bild 5-4: Greifplanung nach KUGELMANN (1999)

Basierend auf den Greifobjektmerkmalen werden verschiedene Griffpositionen berechnet. Für jede einzelne Griffposition wird überprüft, ob die Greifkraft für das Gewicht des Objekts ausreicht, wie hoch die auftretenden Abkippmomente sind und ob es sich um eine kollisionsfreie Position handelt. Optional kann auch überprüft werden, ob die Greifkonfiguration am Ziel der Handhabungsbewegung zu einer Kollision führen würde. Dazu muss jedoch die Zielposition bereits bekannt sein.

Wurde eine gültige Greifkonfiguration gefunden, werden die entsprechenden Positionierungsbefehle für den Roboter zurückgeliefert. Diese enthalten auch die für das Greifen erforderlichen Anfahrspositionen. Die Positionen werden dabei mit Bezug auf das zu greifende Objekt abgelegt, sind also unabhängig von der aktuellen Roboterposition. Dies ist insbesondere für die in Kapitel 6 betrachtete Anordnungsoptimierung von Bedeutung.

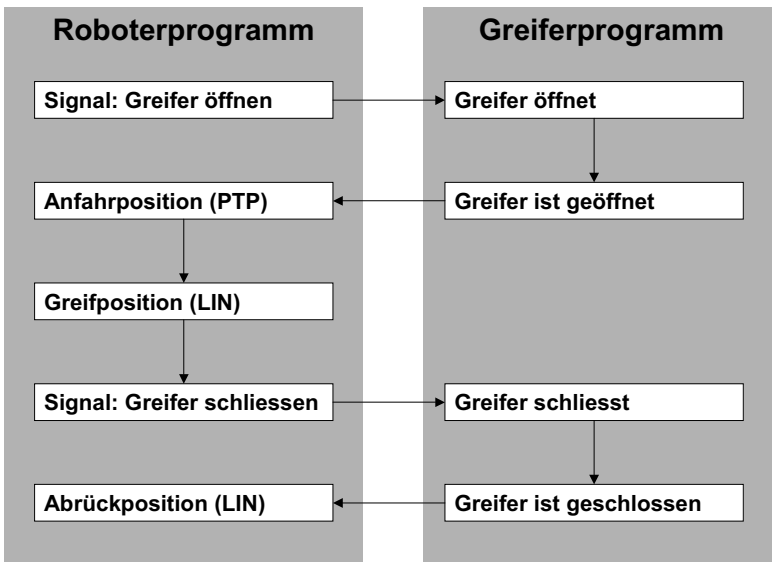


Bild 5-5: Von der Greifplanung erzeugte Steueranweisungen

Ergebnis der Umsetzung eines Greifelementarprozesses sind die in Bild 5-5 dargestellten Steueranweisungen für Roboter und Greifer. Zunächst wird vom Roboter ein Signal gesetzt, um den Greifer zu öffnen. In der

realen Umgebung öffnet sich dadurch der Greifer selbsttätig. In der virtuellen Umgebung muss jedoch explizit der Greifer bewegt werden. Sobald der Greifer vollständig geöffnet ist, bewegt sich der Roboter in die Anfahrposition im schnellen aber ungenauen Punkt-Zu-Punkt Bewegungsmodus. Die eigentliche Greifposition wird daraufhin mit einer im kartesischen Koordinatensystem linearen Bewegung eingenommen. Die Bewegung ist damit vorhersagbar und sicher. Ist die Greifposition eingenommen, wird das Signal gesetzt um den Greifer zu schließen. Nachdem der Greifer geschlossen ist, wird das zu greifende Objekt mit dem Greifer verbunden und der Roboter bewegt sich mit Greifer und gegriffenen Objekt in die Abrückposition.

Transportieren

Für das Übersetzen des Montageelementarprozesses „Transport“ muss Start- und Zielposition der Transportbewegung bekannt sein. Zudem muss die Kinematik ermittelt werden, welche die Transportbewegung ausführt.

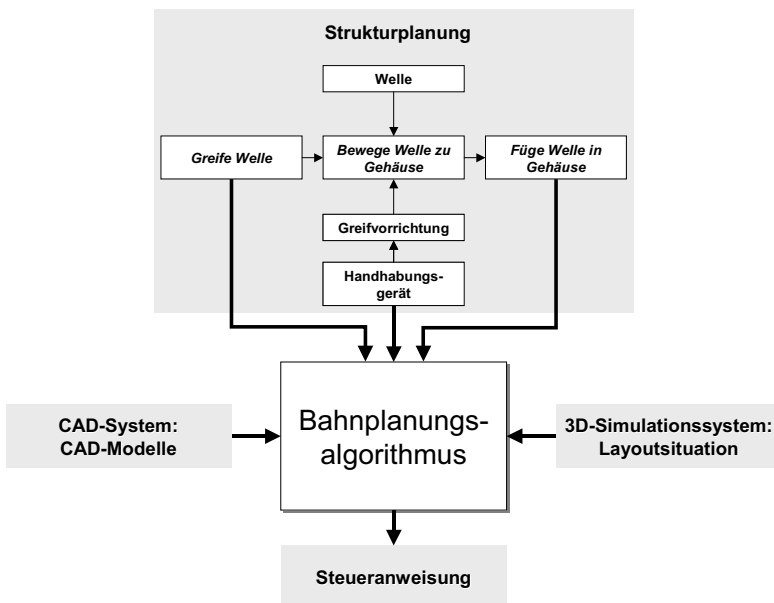


Bild 5-6: Integration eines Bahnplanungsalgorithmus in das Planungssystem

Die Kinematik ist aus der Betriebsmittelzuordnung zum Prozess-Schritt in der Strukturplanungsdatenbank bekannt (vgl. Bild 5-6). Die Startposition wird aus der Position des zu transportierenden Teiles am Ende des vorangegangenen Prozess-Schrittes ermittelt (z.B. Position der Welle nach Abschluss von „Greife Welle“). Die Zielposition entspricht der Position des zu transportierenden Teiles zu Beginn des nachfolgenden Prozess-Schrittes (z.B. Position der Welle vor Beginn des Schrittes „Füge Welle“). Dementsprechend müssen Vorgänger- und Nachfolgeoperation vor der Transportoperation geplant worden sein. CAD-Modelle und 3D-Layoutsituation werden analog wie im Greifplanungsschritt ermittelt.

Unter der Annahme, dass es sich um einen 6-Achs-Knickarm-Roboter handelt, kann das Verfahren nach STETTER (1993) zum Einsatz kommen. Dieses Verfahren basiert auf dem Ansatz von GLAVINA (1991) wurde jedoch dahingehend erweitert, dass Anweisungen in der spezifischen Roboterprogrammiersprache erzeugt werden.

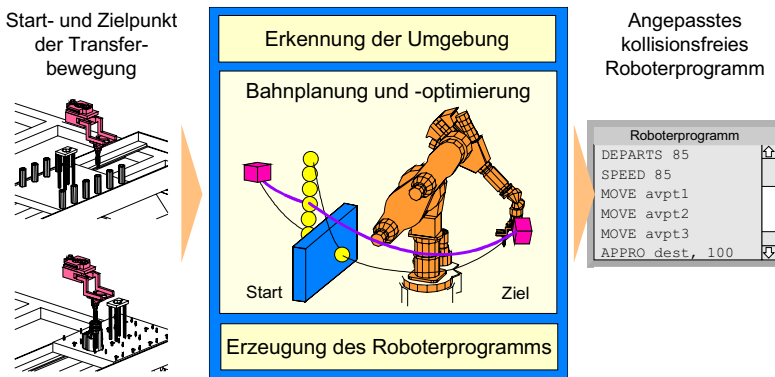


Bild 5-7: Umsetzung eines Transferelementarprozesses nach STETTER (1993)

Als Startposition der Bahnplanung wird die Endposition des vorangegangenen Montageelementarprozesses übernommen (z.B. Abrückposition eines Greifprozesses). Die Zielposition entspricht der Startposition des nachfolgenden Montageelementarprozesses (z.B. Anfahrposition für das Ablegen). Der Roboter, welcher die Aktion durchführt, wird aus dem Montageablaufplan übernommen werden.

Der eingesetzte Bahnplanungsalgorithmus erzeugt zunächst zufällig Zwischenziele im Arbeitsraum des Roboters (vgl. Bild 5-7). Die einzelnen Zwischenziele werden mittels Teilbahnstücken verbunden, bis sich eine durchgehende Verbindung vom Start zum Ziel ergibt. Bei der Verbindung der Zwischenziele wird zunächst die Bahn hinsichtlich Kollision überprüft, die in dem von den einzelnen Achsen des Roboters aufgespannten Raum einer Geraden entspricht. Ist diese, im sog. Gelenkwinkelraum geradlinige Verbindung kollisionsbehaftet, so wird mit einem lokalen Verfahren, dem sog. Gleiten nach einer kollisionsfreien Verbindung gesucht.

Wurde auf diese Art und Weise eine kollisionsfreie Bahn ermittelt, werden entsprechende Steueranweisungen für den Roboter erzeugt, um die Zwischenziele anzufahren. Die Positionen werden dabei auf das Roboterkoordinatensystem bezogen, d.h. sind unabhängig von Start- und Zielposition. Ändern sich Start- und/oder Zielposition muss eine erneute Bahnplanung durchgeführt werden. Diesem Umstand wird während der Anordnungsoptimierung Rechnung getragen werden (s. Kapitel 6.3.4 – Prozessanpassung).

Ablegen (Fügen/Magazinieren)

Um Steueranweisungen für den Elementarprozess „Ablegen“ erzeugen zu können, werden zwei Eingangsgrößen benötigt. Zum einen das Objekt, welches abgelegt, bzw. gefügt oder magaziniert, werden soll. Zum anderen das Zielobjekt, auf welches das abzulegende Objekt gelegt werden soll, bzw. in das es gefügt oder magaziniert werden soll. Beide Informationen können wieder aus dem Montageablaufplan extrahiert werden, da sie auf Strukturebene bereits definiert worden ist (vgl. Bild 5-8).

Um die Steueranweisungen für das ausführende Handhabungsgerät zu generieren, werden ähnlich wie im Schritt „Layouterstellung“ die anordnungsbestimmenden Features verwendet, welche am CAD-Modell definiert sein müssen. In Bild 5-9 ist dies anhand eines Fügevorgangs verdeutlicht. Der Zusammenbau von Welle und Bohrmaschinengehäuse wurde dabei durch die zwei Symmetrieachsen und die Einbaulage definiert.

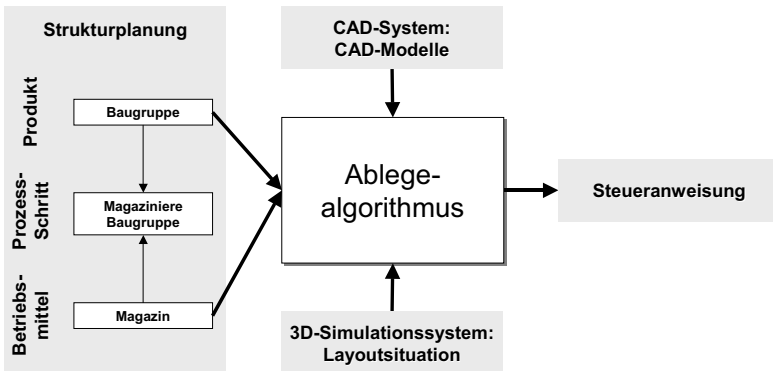


Bild 5-8: Integration des Algorithmus zur Bestimmung des Ablege-Bewegungsablaufes

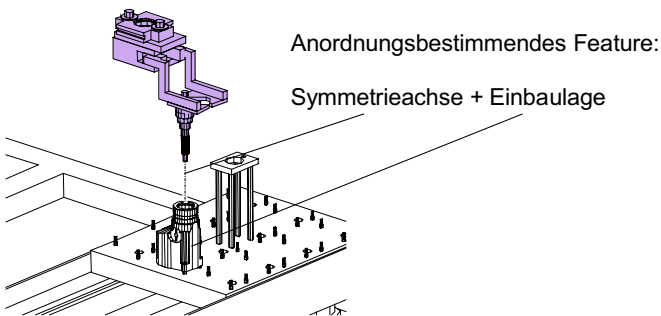


Bild 5-9: Bestimmung einer Ablageposition mittels Anordnungsbestimmender Features

Die Anfahrposition kann danach wie folgt berechnet werden:

- zur Deckung bringen der Symmetrieachsen
- Verschieben des zu fügenden Objektes entgegen der Fügerichtung entlang der Symmetrieachse bis sich die Bounding-Boxen der beiden Objekte nicht mehr überlappen + einem Sicherheitsabstand

Die eigentliche Fügeposition berechnet sich folgendermaßen:

- zur Deckung bringen der Symmetrieachsen

- Verschieben des zu fügenden Objektes entlang der Symmetrieachse bis die Einbaulage erreicht ist

Im Anschluss wird analog zum Greifen eines Objektes noch der Greifer geöffnet und das zu fügende Objekt mit dem Zielobjekt verbunden.

Genau wie die Greifposition werden auch Anfahr- und Fügepositionen nicht mit Bezug zum Roboterkoordinatensystem gespeichert. Die Positionen werden im Koordinatensystem des Zielobjektes abgelegt. Somit passen sich die Positionen automatisch an, wenn sich durch Anordnungsänderung eine andere Lage des Zielobjektes ergeben sollte.

5.3.3 Verknüpfung der Bewegungsabläufe mit dem Montagevorgangsplan

Nachdem die Bewegungsabläufe auf die geschilderte Art und Weise Schritt für Schritt für den kompletten Montageablaufplan erzeugt wurden, können die Ergebnisse an das Strukturplanungssystem zurückübergeben werden (vgl. Bild 5-10). Dies erfolgt dergestalt, dass jedem Elementarprozess im Ablaufplan die korrespondierenden generierten Steueranweisungen zugewiesen werden. Darüber hinaus können auch die Ergebnisse der Simulation, insbesondere die Prozesszeit, mit den Elementarprozessen verknüpft werden.

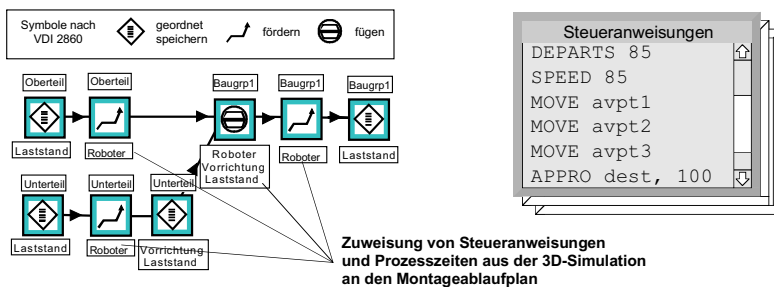


Bild 5-10: Verknüpfung von Informationen aus dem 3D-Simulationssystem mit den Strukturplanungsdaten

Zwei wesentliche Vorteile werden durch diese granulare Zuordnung erzielt: zum einen können die Steueranweisungen wiederverwendet, falls sich Strukturänderungen im Montageablauf ergeben. Zum anderen

ermöglicht die detaillierte Zeitanalyse die Möglichkeit festzustellen, welcher Pfad im Montageablauf der kritische ist (CUIPER & ROBGODERER 1997).

5.4 Modellierung manueller Bewegungsabläufe

Idealerweise sollten sich die im vorigen Kapitel 5.3 entwickelten Algorithmen ebenso auf die Erstellung manueller Bewegungsabläufe anwenden lassen. Dem steht jedoch die wesentlich höhere Komplexität menschlicher Bewegungen entgegen.

Um dem entgegenzuwirken wurden in das Layoutplanungssystem Hilfsmittel der virtuellen Realität integriert. Folgende Geräte zur Ein- und Ausgabe wurden dabei eingesetzt:

- Holobench zur adaptierten plastischen Visualisierung der virtuellen Montageanlage
- Tracking zur Messung von Kopf- und Handbewegungen
- Datenhandschuh zur Messung der Fingerbewegungen

Architektur, Funktionalität und Anwendung des realisierten VR-Systems werden im folgenden näher betrachtet.

5.4.1 Anforderungen an das zu realisierende VR-System

Da im VR-Bereich eine Vielzahl von alternativ einzusetzenden Gerätschaften und Software-Lösungen existieren (siehe Kapitel 2 – Stand der Technik), ist es notwendig, zunächst die Anforderungen zu skizzieren, welche eine Anwendung zur Planung manueller Montagestationen mit sich bringt. Neben den allgemeinen Forderungen nach einer maximalen Darstellungsgeschwindigkeit und –qualität stehen dabei die in Tabelle 5-1 aufgelisteten spezifischen Anforderungen im Vordergrund. Die Anforderungen wurden gemäß den notwendigen Teilaufgaben Datenaufbereitung, Modellierung, Bewertung und Datennachbereitung unterteilt. Die Schritte Modellierung und Bewertung erfolgen im Wechselspiel bis ein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt wurde.

Die Anforderungen haben sowohl Einfluss auf die Auswahl der Hardware als auch der Software des VR-Systems. Diesem Umstand soll bei der folgenden Erläuterung des Aufbaus des implementierten VR-Systems Rechnung getragen werden.

Daten- aufbe- reitung	<ul style="list-style-type: none"> • Keine zusätzlichen Aufwände zur Datenaufbereitung
Modellierung	<ul style="list-style-type: none"> • 1:1 Darstellung eines typischen Montagearbeitsplatzes • Einfache Einstellung der Körperhaltung • Einfache Einstellung der Fingergelenkwinkel jeder Hand • Bedienbarkeit von aktiven Elementen des Arbeitsplatzes (z.B. Handlingsgerät)
Bewertung	<ul style="list-style-type: none"> • 1:1 Darstellung eines typischen Montagearbeitsplatzes • Kooperative Beurteilung • Verwendung der existierenden üblichen Analysemethoden (MTM, OWAS) für manuelle Montageprozesse • Simulation von manuellen und automatisierten Montageprozessen
Daten- nachbe- reitung	<ul style="list-style-type: none"> • Keine zusätzlichen Aufwände zur Datennachbereitung
Allge- mein	<ul style="list-style-type: none"> • Kurze Rüstzeit des VR-Systems • Eignung für längeres Arbeiten (z.B. 1 Stunde)

Tabelle 5-1: Anforderungen an das zu realisierende VR-System

5.4.2 Hardware-Aufbau des realisierten VR-Systems

Die oben genannte Forderung nach einer 1:1 Darstellung des Montagearbeitsplatzes lässt die Verwendung eines einfachen Monitors zur Visualisierung nicht zu. Die Forderung nach Eignung für längeres Arbeiten lässt Datenhelm-basierte Lösungen ausscheiden, da diese wie in Kapitel 2 erläutert dafür nicht geeignet sind. Es bleiben die Grossprojektionssysteme Workbench oder CAVE. Diese unterstützen gleichzeitig das kooperative Arbeiten sehr gut, da mehrere Personen

zugleich die virtuelle Szene betrachten können. Die Auswahl von Größe und Anzahl der Projektionsflächen erfolgt entsprechend den Anforderungen des Planungsobjektes „Montagestation“.

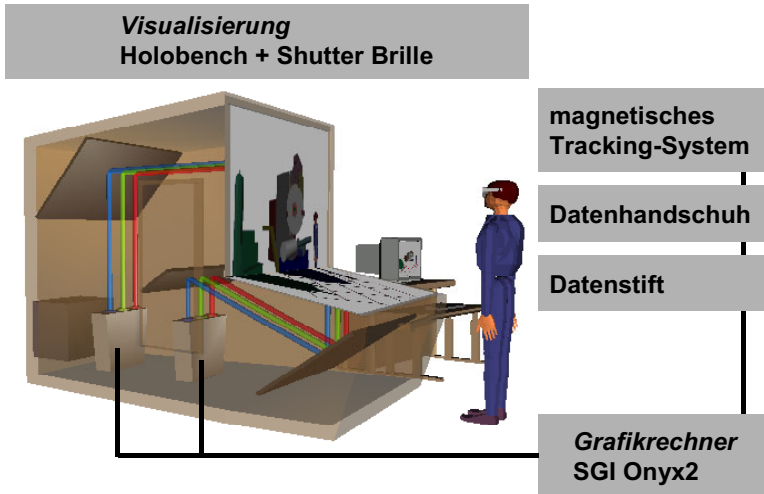


Bild 5-11: Hardware-Komponenten des realisierten VR-Systems (PATRON & ROßGODERER 1999)

Als Visualisierungskomponente wurde deswegen eine sogenannte „Holobench“ in das VR-System integriert. Die Holobench besteht, wie in Bild 5-11 dargestellt, aus zwei Projektionsflächen, die in Form eines L's angeordnet sind. Die Anordnung wurde so gewählt, dass der größte Teil des Gesichtsfeldes abgedeckt ist, wenn man direkt vor dem Visualisierungssystem steht. Durch die Verwendung zweier Projektionsflächen lässt sich ein typischer Montagearbeitsplatz in hoher Qualität 1:1 darstellen. Üblicherweise befinden sich nämlich an einem Montagearbeitsplatz Gegenstände, die einsehbar und erreichbar sein müssen, entweder direkt vor dem Bearbeiter oder im vorderen Bereich auf halber Körperhöhe.

Zur Erfassung der Position von Kopf und Händen des Bedieners wurde ein magnetisches Trackingsystem verwendet. Die Vor- und Nachteile des magnetischen Prinzips wurden bereits in Kapitel 2 dargestellt. Für den Einsatz des Trackingsystems im Rahmen des hier implementierten VR-

Systems sprach im wesentlichen, dass es sich um ein schon länger am Markt eingeführtes System handelt und damit entsprechender Support und Robustheit gewährleistet ist.

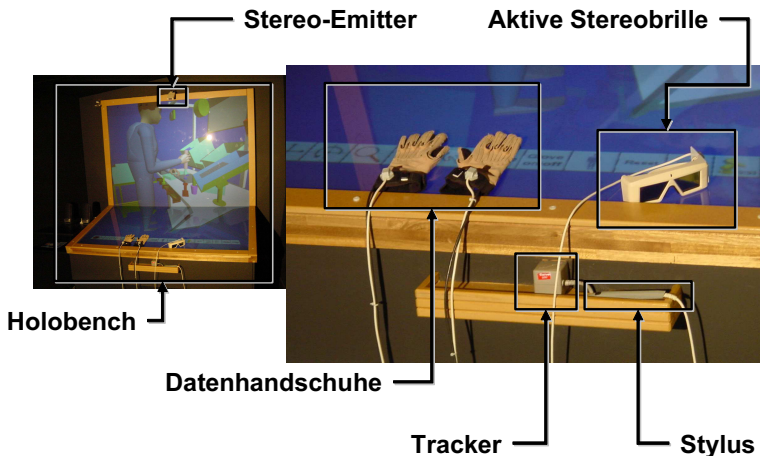


Bild 5-12: Verwendete Ein- und Ausgabegeräte für das realisierte VR-System

Zur Erfassung der Fingergelenkwinkel wurden Datenhandschuhe mit 18 Sensoren verwendet. Eine geringere Anzahl an Sensoren kam nicht in Frage, da ansonsten das Handmodell des verwendeten virtuellen Menschmodells nicht genügend Übereinstimmung aufweisen würde.

Als zusätzliche Interaktionsmöglichkeit wird ein „Stylus“ genannter Datenstift unterstützt. Der Stylus hat eine kugelschreiberähnliche Form und unterstützt einen Druckknopf zum Auslösen von Systemspezifischen Aktionen. Position und Orientierung des Stylus im Raum werden mittels des magnetischen Trackingsystems ermittelt.

5.4.3 Software-Aufbau des realisierten VR-Systems

Die Forderung, dass zum Einsatz des VR-Systems keine zusätzliche Datenauf- oder -nachbereitung notwendig sein soll schließt die Verwendung externer VR-Komplettsysteme aus. Keines der VR-

Komplettsysteme ist nämlich in der Lage, die komplette Layout-, Prozess- und Strukturinformation die bislang erstellt wurde, zu übernehmen. Entsprechende Schnittstellen müssten erst noch geschaffen werden. Neben den Schnittstellen zum reinen Datentransfer müssten auch Schnittstellen geschaffen werden, um bereits modellierte Prozesse (automatisiert oder manuell) im VR-System simulieren zu können. Ebenso müssten die Bewertungsmethoden (z.B. Ergonomieanalyse) mit dem VR-System kommunizieren können.

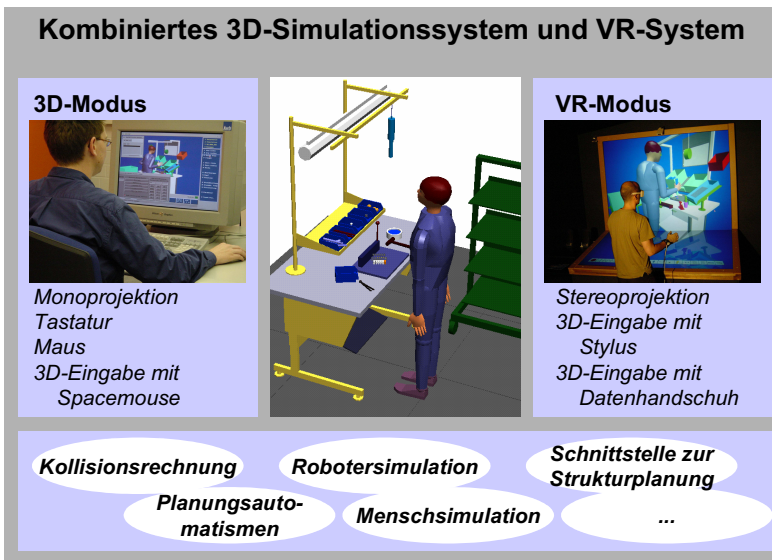


Bild 5-13: Software-Aufbau des realisierten VR-Systems

Mit Blick auf den Implementierungsaufwand erscheint es effektiver, die entsprechende VR-Gerätschaft direkt aus dem verwendeten Basissystem heraus zu unterstützen. Für den Anwender hat dies den positiven Nebeneffekt, dass er mühelos zwischen Tätigkeiten wechseln kann die entweder im herkömmlichen 3D-Modus sind oder im VR-Modus effizienter durchzuführen sind. Da in beiden Fällen dieselbe Datenbasis verwendet wird und lediglich die Mensch-Maschine-Schnittstelle umkonfiguriert wird, gehen dabei keine Daten verloren und es ist keine Datenkonvertierung erforderlich.

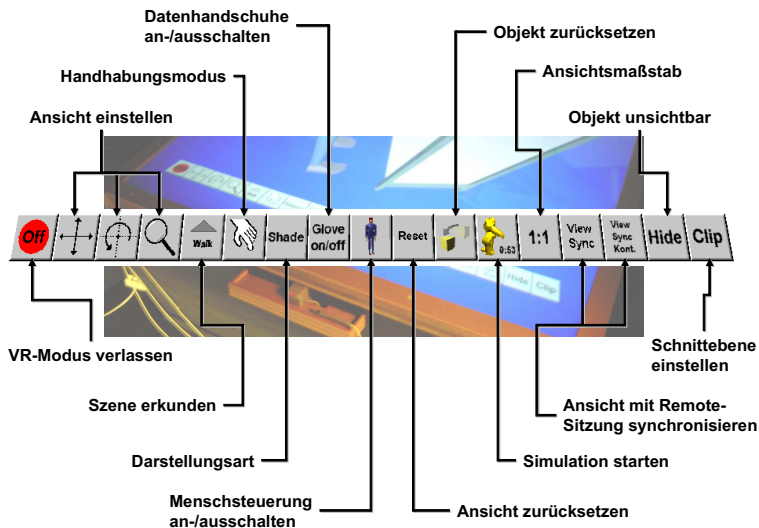


Bild 5-14: Steuermenü im VR-Modus

Durch diesen Ansatz können wie in Bild 5-13 dargestellt auch im VR-Modus die bereits implementierten zahlreichen Funktionen des zugrundeliegenden 3D-Simulationssystems genutzt werden. Diese Funktionen können über die in Bild 5-14 dargestellten Bedienelemente erreicht werden. Neben verschiedenen Funktionen zum Einstellen der Ansicht und Darstellungsart von Objekten kann das anzusteuernde Menschmodell angewählt werden, eine existierende Simulation gestartet und die Ansicht mit einer Remote-Sitzung synchronisiert werden (REINHART U.A. 1999A). Die einzelnen Bedienelemente können mittels des Stylus-Gerätes aktiviert werden. Im „Handhabungsmodus“ kann nicht nur die Position von Objekten verändert werden. Greift der Benutzer ein Element einer Kinematik, kann er die entsprechende kinematische Achse entweder einzeln bewegen oder z.B. die Spitze eines Roboters entlang des kartesischen Koordinatensystems bewegen. Dazu bedient sich das VR-System der Basisfunktionalität „Inverse Kinematik“, welche im 3D-Simulationssystem bereits verfügbar ist. In beiden Fällen, beim Bewegen eines Objektes oder einer Kinematik, erfolgt eine kontinuierliche Kollisionskontrolle.

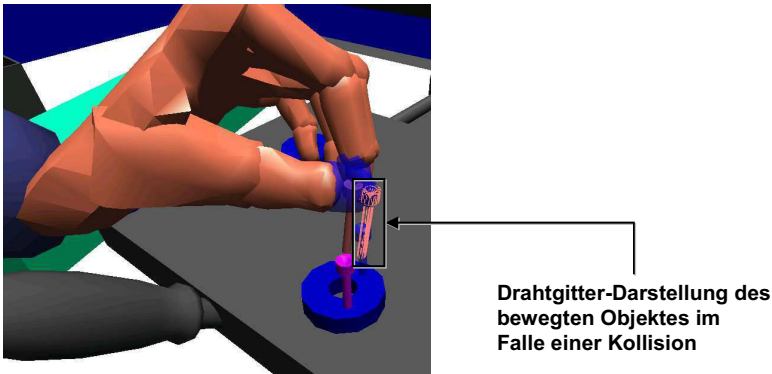


Bild 5-15: Visuelle Rückkopplung einer Kollisionserkennung

Durchdringen sich zwei Komponenten in der virtuellen Szene, erfolgt eine visuelle Rückmeldung in Gestalt einer Einfärbung der betroffenen Komponenten. Das bewegte Objekt wird im Falle einer Kollision zweimal gezeichnet: einmal feststehend an der letzten kollisionsfreien Position und ein zweites Mal weiterhin beweglich in Form einer Drahtgitterdarstellung (vgl. Bild 5-15). Durch diese doppelte Darstellung ist der Benutzer in der Lage, das Objekt wieder selbst in die kollisionsfreie Position zu bewegen. In gewisser Weise ist diese Funktionalität ein primitiver Ersatz für die fehlende Krafterückkopplung, welche im realen Fall das Durchdringen verhindern würde.

Interaktionsmodul	Anwendung
Objekt bewegen	<ul style="list-style-type: none"> • Interaktive Veränderung des Layoutaufbaus
Kinematik bewegen	<ul style="list-style-type: none"> • Erreichbarkeitstests • Erzeugen von kinematischen Abläufen („Teachen“)
Virtuelles Menschmodell bewegen	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellen von manuellen Bewegungsabläufen • Ergonomiestudien • Arbeitsunterweisung

Tabelle 5-2: Übersicht über die Anwendungsmöglichkeiten der realisierten VR-Umgebung

In Tabelle 5-2 ist ein Übersicht über die möglichen Anwendungsfelder der realisierten VR-Umgebung dargestellt.

5.4.4 Anwendung zur Modellierung manueller Montageprozesse

Nach dieser allgemeinen Darstellung über die Implementierungsprinzipien des VR-Systems soll im weiteren gezeigt werden, wie mittels VR-Technologie manuelle Montageprozesse modelliert werden können.

In der virtuellen Umgebung können prinzipiell beliebig viele Menschmodelle angesteuert werden. Da mit der zur Verfügung stehenden Hardware jedoch lediglich ein Paar von Handschuhen unterstützt wird, muss sich der Anwender bei Aktivierung der Steuerung für ein bestimmtes Menschmodell entscheiden. Während der Planung kann jedoch zu jeder Zeit ein anderes Menschmodell aktiviert werden.

Nach der Aktivierung eines Menschmodells werden ständig folgende Daten erfasst und verarbeitet:

- Position der Hände des Benutzers
- Gelenkwinkel der Finger des Benutzers

Diese Daten reichen aus, um das virtuelle Menschmodell, den eM-Human, in eine dem Benutzer möglichst ähnliche Haltung zu bringen.

5.4.4.1 Einstellung der Körperhaltung

Zur Einstellung der Körperhaltung wird die Funktionalität des eM-Human benutzt, welche es ermöglicht, basierend auf der Position der beiden Handgelenkswurzeln die komplette Körperhaltung zu berechnen. Da die Anzahl von gemessenen Parametern niedriger ist als die der zu berechnenden, kann das Ergebnis eine Körperstellung sein, die der Haltung des realen Benutzers nicht entspricht. Um diesen Effekt zu verringern können bestimmte Parameter für die Berechnung der Körperhaltung gesetzt werden (siehe Bild 5-16).

Dargestellt ist, wie ein und dieselbe Handwurzelposition zur Berechnung einer anderen Körperhaltung führt. Für den Fall, dass die Gelenkwinkel der Beine als fest angenommen wurden, wird der Oberkörper entsprechend gebeugt, um die Position erreichen zu können. Wird statt der Beine der Oberkörper fixiert, geht das virtuelle Menschmodell entsprechend in die Knie.

Beim Betrieb an der Holobench hat sich in den meisten Fällen die Fixierung der Beine als sinnvoll erwiesen, da dies der realen Haltung des Benutzers am besten entspricht. Weitere Einflussgrößen, die eine genaue Übereinstimmung von virtuellem Menschmodell und realer Körperhaltung erschweren sind die Tatsache, dass die Position und Körpergröße des Benutzers selbst nicht gemessen werden. Die fehlende Positionsinformation wird dahingehend kompensiert, dass der Benutzer an einem definierten Ort bzgl. der Holobench stehen muss. Besser wäre hier eine Positionsbestimmung mittels geeigneter Tracker. Die Körpergröße lässt sich unter Verwendung einer der sechs vorkonfigurierten virtuellen Menschmodellgrößen einigermaßen anpassen. Besser wäre hier die Verwendung eines parametrisierten Menschmodells, dass eine genaue Anpassung der Kinematik ermöglicht. Ein entsprechender Ansatz auf Basis von eM-Human wird in GEYER (1997), S. 62ff beschrieben.

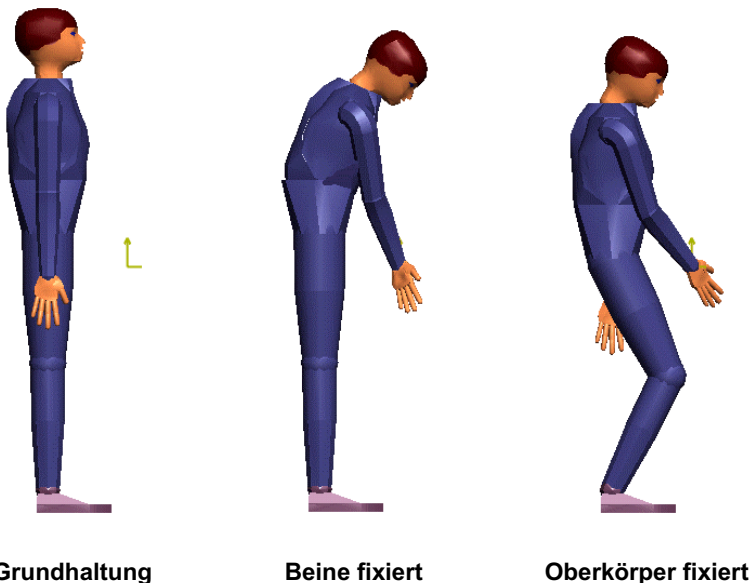


Bild 5-16: Einnehmen einer Position mit unterschiedlichen Körperhaltungsparametern

Die eingenommene Körperhaltung mitsamt der verwendeten Berechnungsparameter kann dann in die Steueranweisung für das virtuelle Menschmodell übernommen werden.

5.4.4.2 Greifen und Loslassen von Objekten

Neben der Körperhaltung können durch Verwendung der Datenhandschuhe die Fingergelenkwinkel der beiden Hände gemessen und auf das virtuelle Menschmodell übertragen werden. Da hier die Anzahl der Sensoren der Anzahl der virtuellen Gelenkwinkel entspricht, erfolgt eine eindeutige Abbildung.

Von wesentlicher Bedeutung ist der Einsatz der gemessenen Fingergelenkwinkel zum Nachbilden von Greifen und Loslassen. Um festzustellen, ob ein Objekt gegriffen wurde und wann es wieder losgelassen wird, wurde der in Bild 5-17 dargestellte Mechanismus implementiert. Solange keine Kollision zwischen der virtuellen Hand und einem anderen Objekt der virtuellen Umgebung auftritt, ist kein Objekt gegriffen (Bild 5-17A). Sobald sowohl Daumen als auch die Fingerkuppe des Zeigefingers mit demselben Objekt oder der selben statisch verbundenen Objektgruppe kollidieren, wird der Status des Objektes als gegriffen betrachtet (Bild 5-17B). Damit das Objekt den Bewegungen der Hand folgt, wird es mit der Bewegung des Daumens verbunden. Ein Loslassen des Objektes ist dann dadurch möglich, dass der Daumen so bewegt wird, dass die Kollision mit der Zeigefingerkuppe verschwindet (Bild 5-17C). Sobald dieser Fall eintritt, wird das Objekt als losgelassen betrachtet und es folgt nicht mehr der Bewegung des Daumens.



Bild 5-17: Greifen eines Objektes mittels des Datenhandschuhs

Ebenso wie die Körperhaltung können die Fingergelenkwinkel bzw. das Greifen und Loslassen von Objekten als Steueranweisungen für das virtuelle Menschmodell abgespeichert werden.

5.4.4.3 Analyse der Bewegungen

Die so modellierten Bewegungen lassen sich auf zweierlei Art analysieren. Analysen wie die OWAS-Ergonomieanalyse, welche nur die aktuellen Gelenkwinkel des virtuellen Menschmodells benötigen, können schon während der Modellierung in Echtzeit durchgeführt werden. So ist eine direkte und schnelle Rückkopplung möglich, und der Benutzer kann ergonomiekritische Haltungen sofort korrigieren und wird so diese nicht in Steueranweisungen umsetzen.

Die zweite Art der Analysen setzt manuelle Nacharbeit im normalen 3D-Modus des Simulationssystems voraus. Um z.B. die erzeugten Steueranweisungen mit Informationen zu ergänzen, die für eine Zeitanalyse gemäß MTM notwendig sind, müssen bestimmte nicht-berechenbare Parameter per Hand hinzugefügt werden (siehe Kapitel 6.3.2.2 – Zielfunktionen für manuelle Tätigkeiten).

5.5 Systemtechnische Umsetzung

Die Umsetzung der Methoden zur Modellierung von automatisierten und manuellen Prozessen erfolgte auf Basis des 3D-Simulationssystems USIS/AnySIM. Für die Implementierung der impliziten Offline-Programmierung wurden vorhandene Verfahren zur Greif- und Bahnplanung integriert und mit im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahren der anordnungsbestimmenden Features integriert. Zur Modellierung manueller Montageprozesse wurde das zugrundeliegende 3D-Simulationssystem um die Möglichkeit der 3D-Visualisierung und 3D-Interaktion wie beschrieben erweitert.

Die notwendigen Eingangsinformationen (Montageablaufplan, anordnungsbestimmende Features) werden direkt aus den entsprechenden Systemen übernommen. Nach Abschluss der Modellierung werden die erzeugten Informationen (Steueranweisungen für Elementarprozesse und Analyseergebnisse) an das Strukturplanungssystem zurückgegeben und stehen dort zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung (siehe Bild 5-18).

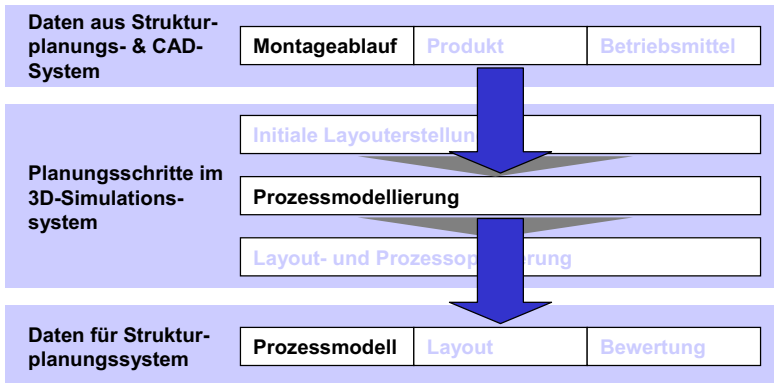


Bild 5-18: Ein- und Ausgabedaten der Prozessmodellierung

5.6 Ergebnis des Planungsschrittes Prozessmodellierung

Resultat der Prozessmodellierung sind die räumlichen Bewegungsabläufe für automatisierte und manuelle Teilprozessschritte. Die Abläufe wurden auf Basis des Montagablaufplanes Schritt für Schritt erstellt. Für automatisierte Prozessschritte kann dabei auf Methoden der impliziten Offline-Programmierung zurückgegriffen werden. Manuelle Prozessschritte werden mittels VR-Eingabegeräten generiert.

Zwei wesentliche Merkmale des Systems tragen damit zum Ziel „Beschleunigung der Simulationsmodellerstellung“ bei. Zum einen der an die Planungsaufgabe angepasste Mitteleinsatz. Während die Offline-Programmierung das adäquate Mittel für automatisierte Vorgänge ist, hat sich für die Prozessabbildung manueller Bewegungen die VR-Technik bewährt. Beides steht nun integriert in einem System zur Verfügung, zusätzlich angebunden an Strukturplanungs- und CAD-System, so dass eine maximale Datenwiederverwendung gewährleistet ist.

Zusammen mit der in Kapitel 4 generierten Layoutanordnung dient das hier erzeugte Prozessmodell als Grundlage für die im folgenden Kapitel beschriebene Anordnungsoptimierung.

6 Anordnungsoptimierung

6.1 Übersicht

Die letzte Stufe des erarbeiteten Konzeptes zur effizienten Anlagenplanung stellt die Optimierung der bislang geplanten Anlagenanordnung dar. Während in den beiden vorangegangenen Schritten die grundsätzliche Modellierung von Layout und Prozess das Ziel war, soll nun das Layout unter Berücksichtigung des Montageprozesses so verändert werden, dass bestimmte Zielkriterien und damit auch das Gesamtplanungsergebnis optimiert werden.

Um den Schwierigkeitsgrad dieser Aufgabe zu verdeutlichen, wird zunächst die genaue Problemstellung der Anordnungsoptimierung dargestellt. Anhand dieser Darstellung wird die Notwendigkeit der Rechnerunterstützung dieses Planungsschrittes begründet.

Die Verbesserung einer Anordnung durch Zuhilfenahme von Optimierungsverfahren bedingt die Formulierung des Planungsproblems in Form der Standardterminologie derartiger Verfahren. Dazu zählt die Definition der Optimierungskriterien, das Ermitteln von Randbedingungen und die Auswahl der Variablen. Diese Formulierung der Problemstellung wird am Beispiel von automatisierten und manuellen Montagearbeitsplätzen durchgeführt. Durch die Verwendung bereits vorhandener Daten aus den Schritten „Layouterstellung“ und „Prozessmodellierung“ kann die Problemformulierung weitestgehend automatisiert und damit beschleunigt werden.

Da die Anordnungsoptimierung einer Montageanlage auch für moderne Optimierungsalgorithmen eine komplexe Problematik darstellt, wird die Komplexität durch Verwendung mehrerer Stufen des Optimierungslaufes reduziert. Erst dadurch ergeben sich Laufzeiten des Systems, wie sie für eine planungsbegleitende Anwendung notwendig sind.

Anhand der systemtechnischen Umsetzung wird dargestellt, wie die verschiedenen benötigten Eingangsdaten aus den vorangegangenen Planungsstufen übernommen werden können. Zum anderen erfolgt nach diesem Schritt auch die Weitergabe der Ergebnisse an das übergelagerte Planungssystem. Die Daten bestehen dabei aus den in den vorangegangenen Schritten erzeugten Layout- und Prozessmodellen, den daran

durchgeführten Optimierungen und der Bewertung gemäß der Planungsziele.

6.2 Grundlagen der Anordnungsoptimierung

Aufgabe des Anlagenplaners ist es, ein Anlagenlayout zu erstellen, das hinsichtlich der Kriterien Zeit, Kosten und Qualität optimiert ist. Dabei sollen die in der Anlage durchgeführten Montageprozesse Berücksichtigung finden. Dem Fokus der vorliegenden Arbeit entsprechend schließt dies sowohl automatisierte als auch manuelle Tätigkeiten ein.

Die Komplexität dieser Aufgabe besteht darin, die veränderbaren Parameter einer Anlagenanordnung so zu modifizieren, dass sich eine bessere Zielerfüllung der einzelnen Kriterien ergibt (z.B. Reduzierung der Taktzeit). Verdeutlicht wird dies anhand der einfachen Montagestation, die in Bild 6-1 dargestellt ist. Der Planer sieht sich mit folgenden Problemstellungen konfrontiert, wenn er die Anordnung optimieren will:

- Welche Hilfsmittel können zur Ermittlung der Zielerfüllung herangezogen werden?
- Wie sollen die verschiedenen Einzelkriterien gegeneinander gewichtet werden?
- Welche Randbedingungen gilt es einzuhalten?
- Welche Komponenten dürfen in ihrer Anordnung verändert werden?
- Wie wirkt sich die Anordnungsänderung auf die Zielerfüllung aus?

Während die meisten Einzelfragestellungen relativ einfach zu beantworten sein sollten, steckt die eigentliche Schwierigkeit in der letzten Fragestellung. Dahinter verbirgt sich die komplexe Abhängigkeit der Zielerfüllung von den dreidimensionalen Anordnungsparametern.

Als Beispiel soll die Zeit, die der Roboter zur Ausführung seiner Tätigkeit benötigt, als Teilbestandteil der Zielerfüllung betrachtet werden. Es gilt zu betrachten, welchen Einfluss die Orte der einzelnen Komponenten der Montagestation auf die resultierende Taktzeit haben. Die Bewegungszeit des Roboters hängt von der Entfernung der anzufahrenden Arbeitspunkte ab. Diese Arbeitspunkte sind relativ zu den Komponenten definiert. Verändert sich die Lage einer Komponente, verändert sich demnach auch

die Lage des Arbeitspunktes. Die Veränderung des Arbeitspunktes kann nun mehrere Folgen haben:

- Die Taktzeit wird kleiner
- Die Taktzeit wird größer
- Es tritt eine Kollision auf
- Der Arbeitspunkt ist nicht erreichbar

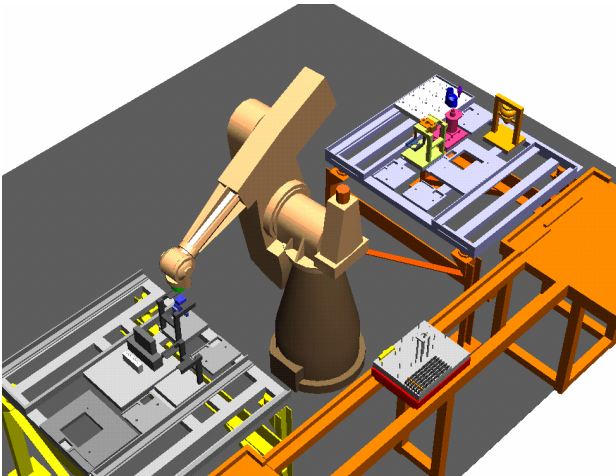


Bild 6-1: Abhängigkeit von Anordnung und Prozess

Diese Folgen einer Layoutveränderung muss der Planer entweder abschätzen können oder aber durch Durchführung einer Bewegungssimulation verifizieren. Die Abschätzung der Folgen ist gerade im dreidimensionalen Raum sehr komplex und erfordert viel Erfahrung und ausgeprägtes räumliches Denken. Die wiederholte Durchführung einer Bewegungssimulation hingegen kostet Zeit, die durch den Simulationslauf an sich und die Analyse der Simulation entsteht. Außerdem werden vermutlich viele Simulationsläufe eine Verschlechterung der Zielerfüllung belegen. Die Arbeit von WOENCKHAUS (1994) (siehe Bild 6-2) begegnet diesem Problem durch die Integration eines 3D-Simulationssystems mit geeigneten Optimierungsalgorithmen. Dadurch wird erreicht, dass die zielgerichtete Veränderung einer Layoutanordnung

inklusive der notwendigen Bewertung der Zielerfüllung für bestimmte Problemstellungen komplett automatisiert ablaufen kann.

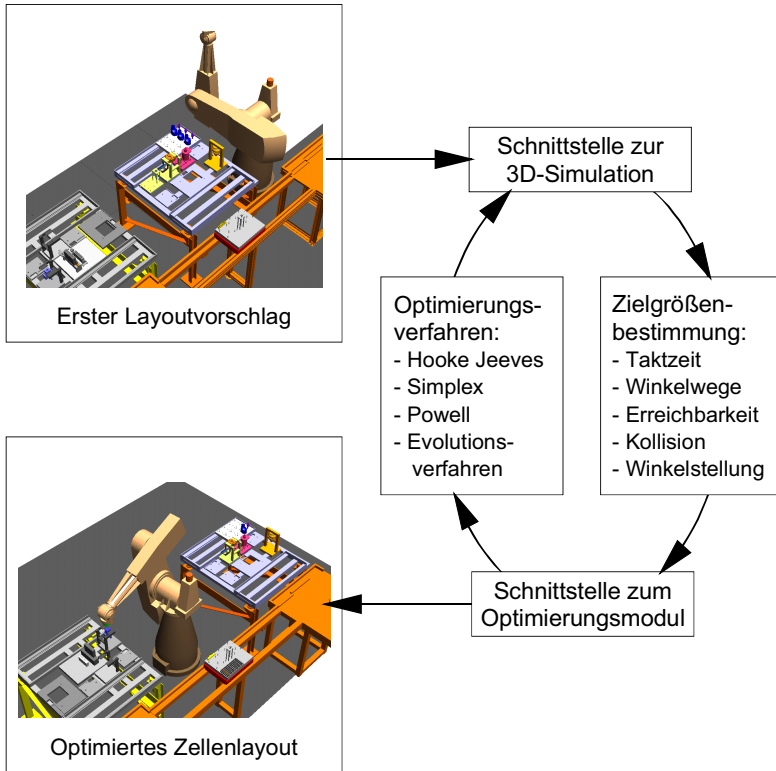


Bild 6-2: Prinzip des Optimierungsmoduls nach WOENCKHAUS (1994)

Um diese Optimierungsmodul in das hier entwickelte System zur effizienten Layout- und Prozessmodellierung von hybriden Montagestationen verwenden zu können, müssen verschiedene neue Aspekte betrachtet werden (vgl. Bild 6-3). Zum einen lassen die in den vorangegangenen Planungsstufen „Layouterstellung“ und „Prozessmodellierung“ gewonnenen Planungsergebnisse (z.B. Freiheitsgrade in der Layoutstruktur) eine automatisierte Festlegung von Randbedingungen,

Optimierungsvariablen und –kriterien zu. Während das Optimierungsmodul bislang auf die Anordnungsverbesserung nur weniger Objekte gleichzeitig ausgelegt war, soll in der hier vorliegenden Fragestellung eine ganze Montagestation mit allen darin befindlichen Komponenten berücksichtigt werden. Um diese komplexe Fragestellung zu lösen, ist ein neues Konzept zur Vereinfachung der Gesamt-optimierungsaufgabe erforderlich. Da es sich bei dem betrachteten Planungsobjekt um eine hybride Montagestation handelt, müssen zusätzlich manuelle Bewegungsabläufe berücksichtigt werden. Die mit VR-Hilfsmitteln erzeugten Abläufe sind hierbei Grundlage zur Bewertung nach ergonomischen und zeitlichen Aspekten.

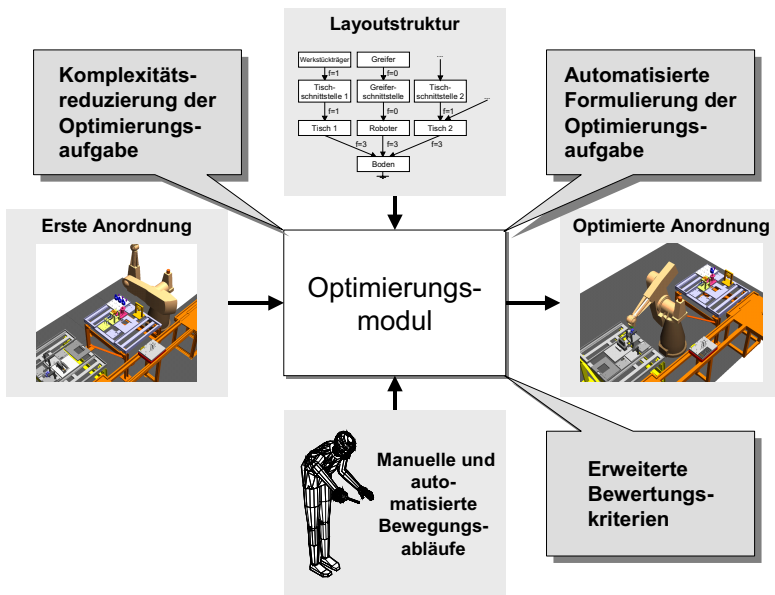


Bild 6-3: Integration und Erweiterung des Optimierungsmoduls

Die Lösungskonzepte für diese erweiterten Aspekte werden im folgenden detailliert dargestellt. Zunächst wird die Definition der Optimierungsaufgabe betrachtet. Danach wird die Durchführung des Optimierungslaufes erläutert.

6.3 Definition der Optimierungsaufgabe

Wie bereits in Kapitel 3 erläutert, lässt sich ein Optimierungsproblem allgemein wie folgt formulieren:

„Minimiere den Wert einer **Zielfunktion** indem bestimmte **Optimierungsvariablen** variiert werden und bestimmte **Randbedingungen** eingehalten werden.“

Um einen Optimierungsalgorithmus anwenden zu können, müssen also die Optimierungsvariablen, die Zielfunktion und die Randbedingungen festgelegt werden. Wie dies im Rahmen des hier vorgestellten Systems zur effizienten Anlagenplanung umgesetzt wird, soll im folgenden betrachtet werden.

6.3.1 Automatisierte Festlegung der Optimierungsvariablen

Zur automatisierten Festlegung der Optimierungsvariablen werden die im Schritt „Layouterstellung“ (siehe Kapitel 4) gewonnenen Informationen über die Struktur des Layouts genutzt. Da die Anordnung der Montagestation optimiert werden soll, können die dort ermittelten ungebundenen Freiheitsgrade direkt als die zulässigen Variablen für die Anordnungsoptimierung verwendet werden. Das Beispiel in Bild 6-4 soll dies verdeutlichen.

Verschiedene anordnungsbestimmende Features führen zu einer unterschiedlichen Anzahl von verbleibenden Freiheitsgraden. So ergibt die Verwendung von Ablageflächen zur Anordnungsdefinition drei variable Freiheitsgrade: Verschiebung in einer Ebene und Rotation um die Ebenennormale. Deshalb existieren zwischen Tisch und Boden bzw. Sockel und Boden jeweils drei ungebundene Freiheitsgrade. Da auch die Relativanordnung von Roboter und Sockel über Ablageflächen definiert ist, sind auch hier grundsätzlich drei Freiheitsgrade variabel. Vergleicht man jedoch die Größe der Ablageflächen, wird deutlich, dass eine Verschiebung in der Ablageflächenebene nicht möglich ist. Deswegen erfolgt eine Reduktion der variablen Freiheitsgrade auf die verbleibende Möglichkeit der Rotation um die Hochachse. Ähnliches gilt für die Möglichkeit, die Tischschnittstelle auf dem Tisch anzuordnen. Zwischen Roboter und Greifer existiert keine Möglichkeit der Anordnungsoptimierung, da beide über eine feste Anordnungsrelation miteinander verbunden sind, die nicht verändert werden darf.

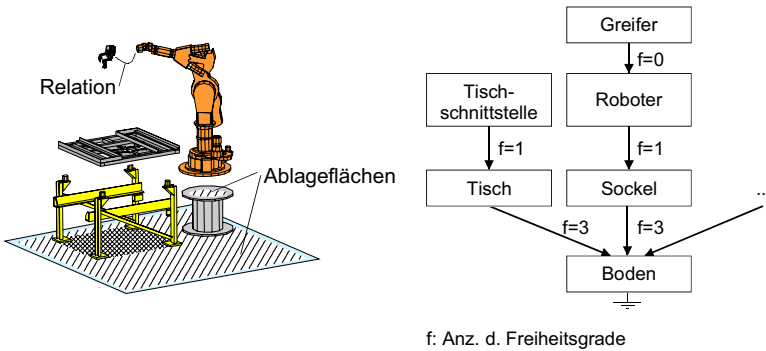


Bild 6-4: Ermittlung von Art und Anzahl der Optimierungsvariablen mittels der Layoutstruktur

Nachdem nun die Anzahl und Art der Optimierungsvariablen bekannt ist (im Beispiel: 8 Variablen), erfolgt im nächsten Schritt die Bestimmung des zulässigen Wertebereichs der einzelnen Variablen.

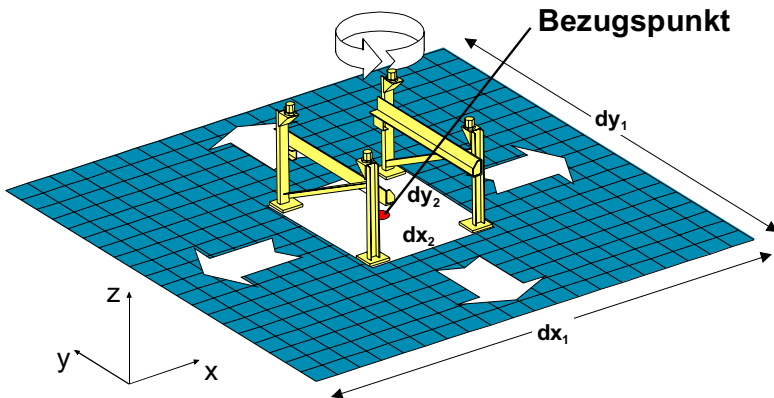


Bild 6-5: Bestimmung des Wertebereichs von Optimierungsvariablen für Ablageflächen

Wie dies im Falle der Verwendung von Ablageflächen funktioniert ist in Bild 6-5 dargestellt. Es muss dafür Sorge getragen werden, dass während des eigentlichen Optimierungslaufes der Tisch stets auf der Bodenfläche

bleibt. Bewerkstelligt wird dies durch die Ermittlung eines sogenannten Bezugspunktes am Objekt, auf den sich die betrachteten Optimierungsvariablen beziehen. Im Bild ist der Bezugspunkt des Tisches abgebildet, der im konkreten Fall der Mittelpunkt der Ablagefläche des Tisches ist. Dieser Bezugspunkt ist nun die Referenz zur Ermittlung des Wertebereichs der Optimierungsvariablen. Für das konkrete Beispiel ergeben sich folgende Intervalle für die drei Freiheitsgrade:

$$x = [dx_2/2; dx_1 - dx_2/2] \quad 6.1$$

$$y = [dy_2/2; dy_1 - dy_2/2] \quad 6.2$$

$$\text{rot}(z) = [-180; 180] \quad 6.3$$

Im dargestellten Beispiel ist die Rotation uneingeschränkt um die Z-Achse möglich. Im Falle der Anordnung der Tischnschnittstelle auf dem Tisch ist dies jedoch nicht möglich.

Die Rotation um die Hochachse ist hier nicht beliebig möglich. Bedingt durch die Geometrie sind nur zwei Lagen zulässig. Im konkreten Fall darf eine Rotation um die Hochachse nur in 180 Grad-Schritten erfolgen (vgl. Bild 6-6).

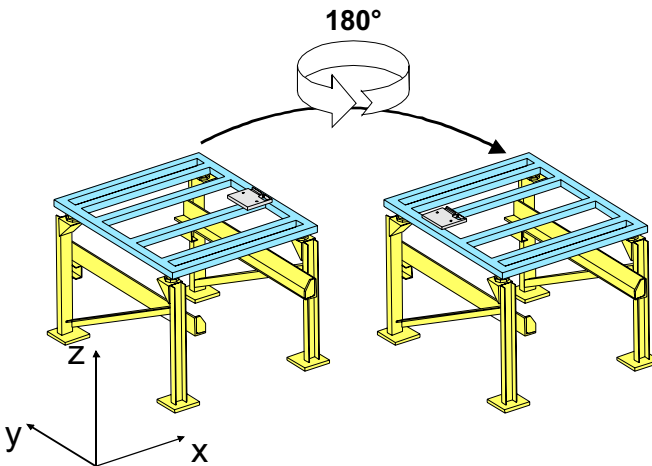


Bild 6-6: Geometriebedingte Einschränkung der rotatorischen Freiheitsgrade

Für die hier, in der Praxis am häufigsten vorkommenden, dargestellten Fälle erfolgt eine automatisierte Ermittlung der Optimierungsvariablen. Dies beinhaltet auch die Ermittlung des zulässigen Wertebereichs der Variablen. Für andere Fälle von anordnungsbestimmenden Features kann eine Implementierung nach dem gleichen Muster erfolgen.

6.3.2 Festlegung der Zielfunktion

6.3.2.1 Zielfunktion für allgemeine kinematische Bewegungen

In dem eingesetzten Optimierungsmodul stehen folgende Zielfunktionen zur Bewertung der Anordnung grundsätzlich zur Verfügung:

- Taktzeit
- Fahrwege
- Wiederhol- und Bahnengenauigkeit
- Belastung der Gelenke

Die Taktzeit beschreibt dabei die Zeit, die zur Durchführung des zu der Montagestation gehörenden Montageprozesses benötigt wird. Die Fahrwege beinhalten analog die insgesamt zurückgelegten Wege aller kinematischen Achsen in der Montagestation. Durch die Bewertung bestimmter Achsstellungen wird erreicht, dass bestimmte Kombinationen von Achswerten vermieden werden. Dies dient dazu, um z.B. bei Robotern singuläre Achsstellungen zu vermeiden und damit die Wiederhol- und Bahnengenauigkeit zu verbessern. Die Berücksichtigung von Momentenverläufen ermöglicht die Beurteilung der Belastung der Gelenke. Zur Festlegung der Zielfunktionen muss dabei der Anwender interaktiv die zu betrachtenden aktiven Ressourcen der Montagestation und die gewünschte Bewertungsmethode für die einzelnen Ressourcen auswählen (z.B. Fahrweg für einen Roboter und Belastung der Gelenke für einen zweiten Roboter in der Station).

Durch die in der Planungsstufe „Prozessmodellierung“ gewonnenen Informationen über die Montageprozesse ist bekannt, welche Ressourcen Montageaufgaben durchführen. Deswegen kann in dem hier vorgestellten System eine halbautomatische Definition der Zielfunktion erfolgen. Die aktiven Ressourcen werden vom System ausgewählt und als Voreinstellung die Taktzeit als Zielfunktion definiert. Die so erzeugte

Definition kann vom Benutzer noch gemäß spezifischen Vorstellungen modifiziert werden.

6.3.2.2 Zielfunktionen für manuelle Tätigkeiten

Zur Bewertung von manuell durchgeführten Montageprozessen werden standardisierte Ergonomie- und Zeitanalysen verwendet. Zu diesem Zweck erfolgte eine Anbindung an das in GEYER (1997) vorgestellte System zur ergonomischen Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung (vgl. Bild 6-7).

Beispielhaft erfolgte eine Anbindung an die dort vorgestellte OWAS-Körperhaltungsanalyse (GEYER 1997, S. 111ff, s.a. Kapitel 3.4.1). Analog können weitere standardisierte Verfahren wie z.B. Burandt-Schultetus (SCHULTETUS 1980) oder NIOSH (WATERS U.A. 1994) eingebunden werden.

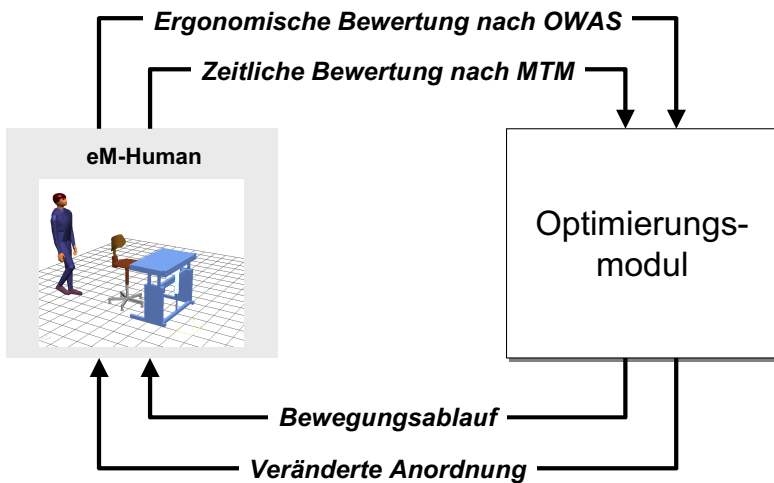


Bild 6-7: Anbindung des Menschmodells eM-Human an das Optimierungsmodul

Durch die Verwendung des Menschmodells der Firma Tecnomatix ergab sich zusätzlich die Möglichkeit, eine Bewertung der manuellen Montagezeit hinsichtlich des standardisierten MTM-1 Verfahrens (MTM

E.V. 1990) durchzuführen und diese Bewertung in der Layoutoptimierung zu berücksichtigen. Die Abkürzung MTM steht für Methods-Time-Measurement. Die Ermittlung der nach MTM-1 definierten Montagezeit wird dabei vom Simulationsmodul des Menschmodells übernommen. Die Zeitermittlung nach MTM-1 ist abhängig von der Art der einzelnen Montageelementarprozesse und von den Entfernungen, die in den jeweiligen Prozessschritten zurückzulegen sind. Während die Art der Montageelementarprozesse in der Phase der Prozessmodellierung festgelegt werden muss, werden die zurückgelegten Entfernungen bei jedem Simulationslauf neu berechnet. Dadurch kann dieses Verfahren als Zielfunktion in die rechnergestützte Layoutoptimierung integriert werden.

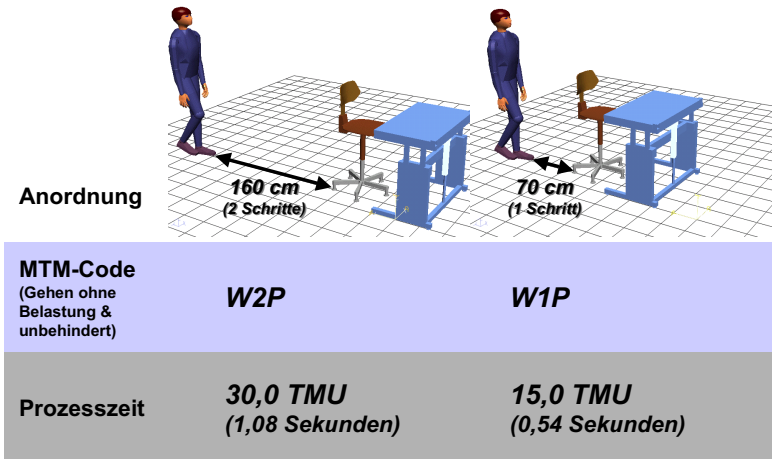


Bild 6-8: Auswirkung einer Anordnungsänderung auf den MTM-Code und dadurch auf die Prozesszeit

Bild 6-8 illustriert dieses Vorgehen anhand eines einfachen Gehvorgangs. Im linken Teil des Bildes beträgt die Entfernung von der Startposition zum Stuhl etwa 160 cm. Dies entspricht gemäß MTM-Methodik durchschnittlich zwei Schritten. Für jeden Schritt werden für ein unbehindertes Gehen ohne Belastung 30 TMU veranschlagt (1 TMU entspricht 0,036 Sekunden). Im rechten Teil des Bildes wurde die Position des Arbeitsplatzes verändert. Das Simulationssystem ist auf Basis der Kenntnis von Start- und Zielposition in der Lage, die neue Weglänge und

damit den neuen MTM-Code zu berechnen. Als Resultat ergibt sich eine verringerte Prozesszeit von 15 TMU.

Äquivalente Abstandsmessungen können im Simulationssystem für folgende Grundbewegungen des MTM-Systems erfolgen:

- Hinlangen (Reach)
- Bringen (Move)
- Drehen (Turn)
- Blickverschieben (Eye Travel)
- Beinbewegung (Leg Motion)
- Seitenschritt (Side Step)
- Gehen (Walk)

Die MTM-Codes enthalten neben diesen numerischen Parametern noch weitere Einflussgrößen. Diese beschreiben Eigenschaften der Bewegung, die sich nicht numerisch ausdrücken lassen. Ein Beispiel dafür ist der Code für „Gehen behindert“, der dann zum Tragen kommt, wenn im Laufe der Gehbewegung ein Hindernis den Weg kreuzen könnte. Dies können statische oder dynamische Hindernisse sein. Diese nicht-numerischen Parameter, die im Rahmen der Prozessmodellierung (siehe Kapitel 5) festgelegt werden, müssen per Hand angepasst werden, falls eine Anordnungsänderung Einfluss auf den jeweiligen Parameter hat.

6.3.3 Festlegung der Randbedingungen

Im verwendeten Basissystem von WOENCKHAUS (1994) ist die Überprüfung der folgenden Randbedingungen möglich: Einhaltung der Erreichbarkeit von Arbeitspunkten, Einhaltung der Gelenkgrenzen von Kinematiken und Überprüfung auf kollisionsfreie Anordnung. Die Überprüfung der ersten beiden Randbedingungen wurde unverändert in das System zur effizienten Layout- und Prozessmodellierung übernommen.

Weiterentwickelt wurde das Verfahren, um Kollisionen zu bewerten. Bislang erfolgte lediglich die Überprüfung einer statischen Layoutanordnung ohne Berücksichtigung des Ablaufes. In Folge bedeutet dies, dass Kollisionen die während des Montageprozesses auftraten, nicht bewertet wurden. Diese Einschränkung wurde angesichts der damals verfügbaren Rechenleistung billigend in Kauf genommen.

Aufgrund gesteigerter Leistung der Hardware ist es nun jedoch möglich, die Kollisionsrechnung auch während der Bewertung (= Simulation) des Montageprozesses durchzuführen. Neben der einfachen Aktivierung der Kollisionsrechnung während der Bewertung musste hier dem Umstand Rechnung getragen werden, dass der Aufbau der Kollisionsgruppen sich während des Prozessablaufs verändert. Das bedeutet z.B. dass Objekte, die von einem Roboter gegriffen werden, nicht auf Kollision gegen den Roboter getestet werden müssen. Erst wenn das Objekt wieder losgelassen wird, muss es wieder einer anderen Kollisionsgruppe als der des Roboters zugewiesen werden.

Dadurch wird nun das Ergebnis der Layoutoptimierung dahingehend verbessert, dass nur noch Anordnungen als gültige Lösungen gefunden werden, deren Bewegungsabläufe nicht kollisionsbehaftet sind.

6.3.4 Prozessanpassung

Während des Optimierungslaufes werden zahlreiche Anordnungsalternativen erzeugt. Die bereits modellierten Bewegungsabläufe müssen an jede dieser Anordnungen angepasst werden, bevor eine Bewertung hinsichtlich Zielerfüllung und Einhaltung von Randbedingungen erfolgen kann. Für die Arbeitspositionen von Robotern erfolgt dies automatisch unter der Annahme, dass die Positionen relativ zu Bezugsobjekten definiert wurden (z.B. relativ zum greifenden Objekt). Verändert das Bezugsobjekt seine Lage im Raum, verfährt der Roboter automatisch zu dieser neuen Lage.

Der Bewegungsablauf zwischen zwei Arbeitspositionen bleibt jedoch davon unberührt. Um Kollisionen während der Bewertung eines Bewegungsablaufes berücksichtigen zu können ist die Überprüfung des Ablaufs und ggf. dessen Umplanung notwendig. Dazu wurde die Bahnplanung (STETTER 1993, s.a. Kapitel 5.3.2) für 6-achsige Roboter in die Prozessanpassung integriert. Wird im Rahmen der Bewertung festgestellt, dass der Weg zwischen zwei Arbeitspositionen kollisionsbehaftet ist, erfolgt ein Aufruf der Bahnplanung, um die Kollision zu vermeiden. Ist das Verfahren in der Lage, einen kollisionsfreien Bewegungsablauf zu finden, wird das Roboterprogramm entsprechend angepasst und der veränderte Ablauf geht in die Bewertung der Layoutanordnung ein. Wird keine kollisionsfreie Lösung gefunden, wird diese Layoutanordnung verworfen.

Analog zu den automatisierten Vorgängen müssen auch manuelle Bewegungen an eine neu gewählte Anordnung angepasst werden (vgl. Bild 6-9). Hierzu erfolgte eine Integration der in GEYER (1997) S. 66ff beschriebenen Methoden zur Berechnung von Körperhaltung und Bewegungsablauf in Abhängigkeit von der Umgebungssituation.

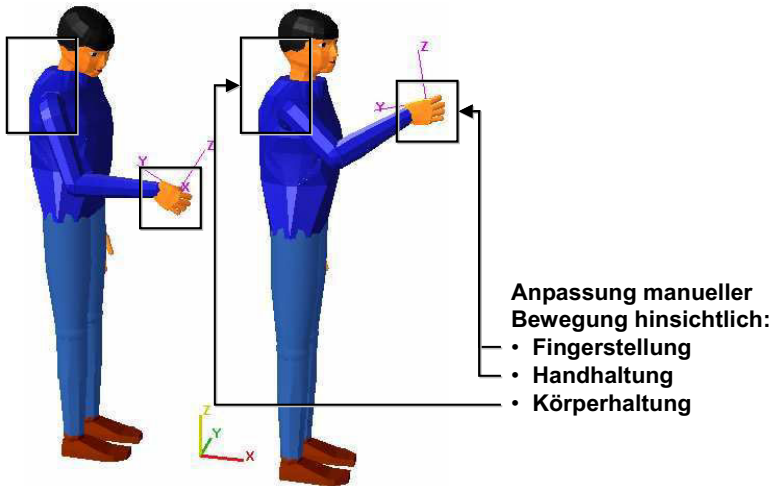


Bild 6-9: Anpassung der Körperhaltung an eine neue Anordnung

In Bild 6-9 ist dargestellt, wie sich die Anordnungsänderung eines zu greifenden Gegenstandes auf die Körperhaltung der ausführenden Person auswirkt. Die veränderte Körperhaltung hat Auswirkungen auf die Bewertung der manuellen Tätigkeit. Zum einen kann sich eine Änderung der ergonomischen Situation ergeben. Zum anderen verändert sich ggf. das Zeitverhalten des Bewegungsablaufs (siehe auch Abschnitt 6.3.2.2).

6.4 Durchführung der Optimierung

Die eigentliche Durchführung der Anordnungsoptimierung unterteilt sich in mehrere Schritte. Diese Unterteilung dient dazu, das Gesamtproblem der Anordnungsoptimierung des kompletten Montagesystems in kleinere Teilprobleme zu zerlegen. Da der Optimierungsraum der Teilprobleme deutlich kleiner ist als der des Gesamtproblems, verbessert dies das

Konvergenzverhalten der Optimierungsalgorithmen. Dieser grundsätzliche Ansatz der Einschränkung des Optimierungsraums hat sich in anderen Arbeiten bereits bewährt (z.B. FARRITOR U.A. 1996) und soll hier auf die Layoutoptimierung angewandt werden.

6.4.1 Hierarchische Optimierung

Der erste Schritt zur Zerlegung des Gesamtproblems liegt in der Ausnutzung der Layoutstrukturinformation wie sie aus Kapitel 4 bekannt ist.

Anstatt alle Optimierungsvariablen des Montagesystems (siehe 6.3.1) als Eingangsgrößen für den Optimierungslauf zu verwenden, werden schrittweise Teilstrukturen der Gesamtlayoutstruktur optimiert. Ziel dieser Hierarchisierung ist die Reduzierung der benötigten Rechenzeit. Anschaulich wird das durch die Darstellung in Bild 6-10. In diesem Montagesystem besitzen die Elemente „Tisch 1“, „Roboter“, „Tischschnittstelle 1“ und „Tischschnittstelle 2“ ungebundene Freiheitsgrade, die als Optimierungsvariablen genutzt werden können. Die Methode der hierarchischen Optimierung besteht nun darin, ausgehend von der Wurzel der Layoutstruktur, die Layoutstruktur zu traversieren und jeweils die ungebundenen Freiheitsgrade nur der direkten Nachfolgeelemente als Optimierungsvariable zu verwenden. Im Beispiel bedeutet dies, dass im ersten Schritt die Nachfolgeelemente des Elements „Boden“ berücksichtigt werden, also die Komponenten „Tisch 1“ und „Roboter“. In einem nachfolgenden zweiten Optimierungslauf werden dann lediglich die Nachfolgeelemente der Komponente „Tisch 1“ berücksichtigt, also die beiden Tischschnittstellen.

Die Komplexität der Optimierungsaufgabe reduziert sich damit wie folgt. Es wird angenommen, dass pro Optimierungsvariable im Schnitt n Bewertungen durchzuführen sind. Im Falle der Komplettoptimierung im resultiert dies in

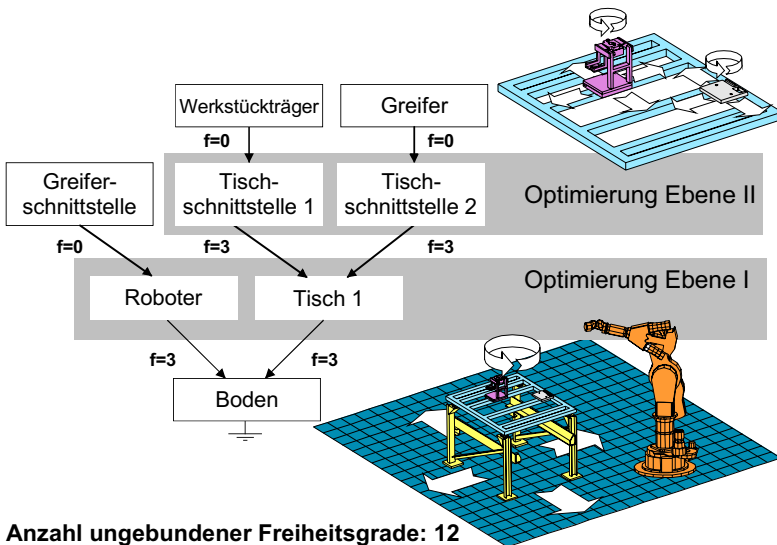
$$n_{\text{gesamt}} = n^{\text{Gesamtanzahl der ungebundenen Freiheitsgrade}} \quad 6.4$$

durchzuführenden Bewertungen. Im Beispiel wären dies n^{12} Bewertungen was mit $n = 256$ ungefähr $7,9 \cdot 10^{28}$ Bewertungen entspricht. Im Falle der hierarchischen Optimierung auf zwei Ebenen ist die Anzahl wie folgt definiert:

$$n_{\text{gesamt}} = 2 * n^{\text{Gesamtanzahl der ungebundenen Freiheitsgrade}/2} \quad 6.5$$

Daraus ergeben sich im Beispiel $5,6 \cdot 10^{14}$ Bewertungen was in einer wesentlich kürzeren Berechnungszeit resultiert und somit für den Einsatz der hierarchischen Optimierung spricht.

Es liegt dabei die Annahme zugrunde, dass der Einfluss ungebundener Freiheitsgrade verschiedener Ebenen untereinander gering ist. D.h. eine gleichzeitige Betrachtung von Optimierungsvariablen des Roboters und der Tischschnittstellen würde das Ergebnis nicht wesentlich beeinflussen.



Anzahl ungebundener Freiheitsgrade: 12

Bild 6-10: Prinzip der hierarchischen Optimierung

6.4.2 Grob- und Feinoptimierung

Die Optimierung eines Knotens bzw. dessen Nachfolgeelemente im Layoutstrukturbaum wurde weiteraufgeteilt in eine Phase der Groboptimierung und eine Phase der Feinoptimierung.

Auch dies erfolgt wieder unter dem Gesichtspunkt der Reduzierung des Optimierungsraumes bzw. der Verbesserung der Rechenzeit. Für das vorliegende Problem der räumlichen Anordnungsoptimierung haben sich prinzipiell die Gattung der Genetischen Algorithmen als geeignet

erwiesen (siehe Kapitel 2), da diese sich robust gegenüber unstetigen Bewertungsverläufen verhalten. Als nachteilig erweist sich die hohe Anzahl von notwendigen Bewertungen. Um GAs trotzdem gewinnbringend einzusetzen, erfolgt zunächst eine Groboptimierung mit vergleichsweise grober Aufteilung des Optimierungsraumes. Im Anschluss daran kann mittels eines direkten Suchverfahrens oder eines Gradientenverfahrens das Ergebnis verfeinert werden.

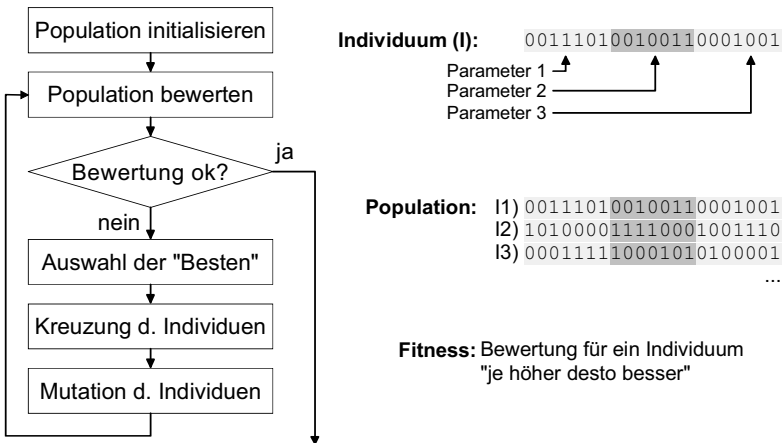


Bild 6-11: Prinzip der verwendeten genetischen Algorithmen

Dieses Prinzip wird dann verständlich, wenn man sich die Funktionsweise genetischer Algorithmen näher betrachtet (vgl. Bild 6-11). In Anlehnung an die biologische Evolutionstheorie werden sog. **Populationen** erzeugt. Jede Population besteht aus mehreren **Individuen**. Jedes Individuum besteht aus sog. **Chromosomen**. Diese Chromosomen entsprechen den Optimierungsvariablen in binärcodierter Form. Daraus ist zu erkennen, dass zur Verwendung eines GA zunächst eine geeignete Codierung der Optimierungsvariablen stattfinden muss, d.h. die Umwandlung des Optimierungsraumes in ein Individuum. Im Falle der Anordnungsoptimierung erweist sich der in Bild 6-12 gewählte Ansatz als sinnvoll. Die Optimierungsvariablen werden mit einer Auflösung von n in Binärcodes umgewandelt. Wählt man eine Auflösung von $n=8$ und ist $dx_1=4000\text{mm}$, ergibt sich eine Diskretisierung von $dx_1/2^n=15,625\text{mm}$ der translatorischen Freiheitsgrade. Analog ergibt sich für die rotatorischen

Freiheitsgrade ein Diskretisierungsabstand von $360^\circ/2^n=1,40625^\circ$. D.h. zwei Anordnungsalternativen unterscheiden sich entlang der translatorischen Freiheitsgrade um maximal 15,623 Millimeter bzgl. einer Dimension und um $1,40625^\circ$ in den rotatorischen Freiheitsgraden.

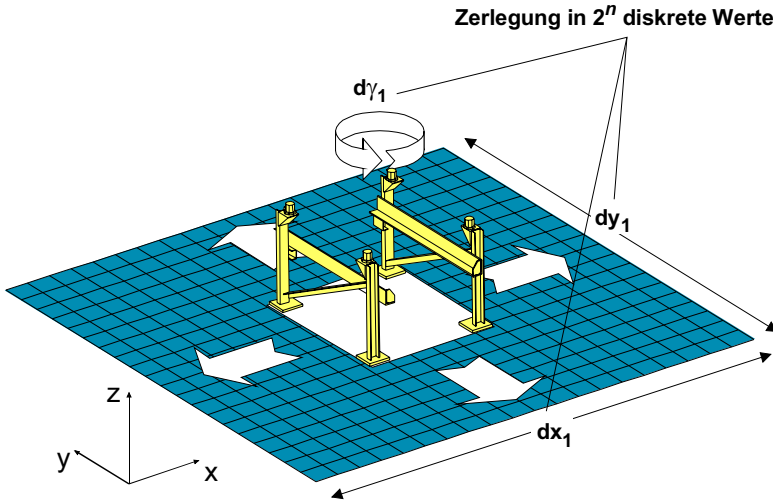


Bild 6-12: Bedeutung eines Individuums einer Population für die Layoutanordnung

Jedes dieser Individuen wird nun mittels der bereits erläuterten Bewertungsmethoden des Simulationssystems bewertet. Diese Bewertung wird auch als **Fitness** bezeichnet. Aus der Einzelbewertung der Individuen ergibt sich die Bewertung der Population. Erfüllt die Bewertung dieser Population bestimmte Kriterien oder ist die Veränderung zu den letzten Populationsbewertungen gering, bricht das Verfahren ab. Ist dies nicht der Fall, wird eine neue Population generiert. Dazu werden analog zur Biologie die besten Individuen aus der Population ausgewählt und miteinander kombiniert. Ebenfalls analog zur Biologie erfolgt eine Mutation von Chromosomen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit. All dies gewährleistet, dass einerseits Individuen mit guter Bewertung weiter existieren, jedoch andererseits durch Kombination und Mutation Zufallselemente einfließen, welche völlig neue Kombinationen und damit in anderen Bereichen des

Optimierungsraumes liegen können. Dies macht die Robustheit des Verfahrens aus.

Um das restliche Potential an Optimierungsmöglichkeit auszuschöpfen, welches durch die Diskretisierung des Optimierungsraumes entsteht, können, wie bereits erwähnt, kontinuierlich arbeitende Verfahren (z.B. Hooke-Jeeves) im Anschluss ergänzend eingesetzt werden.

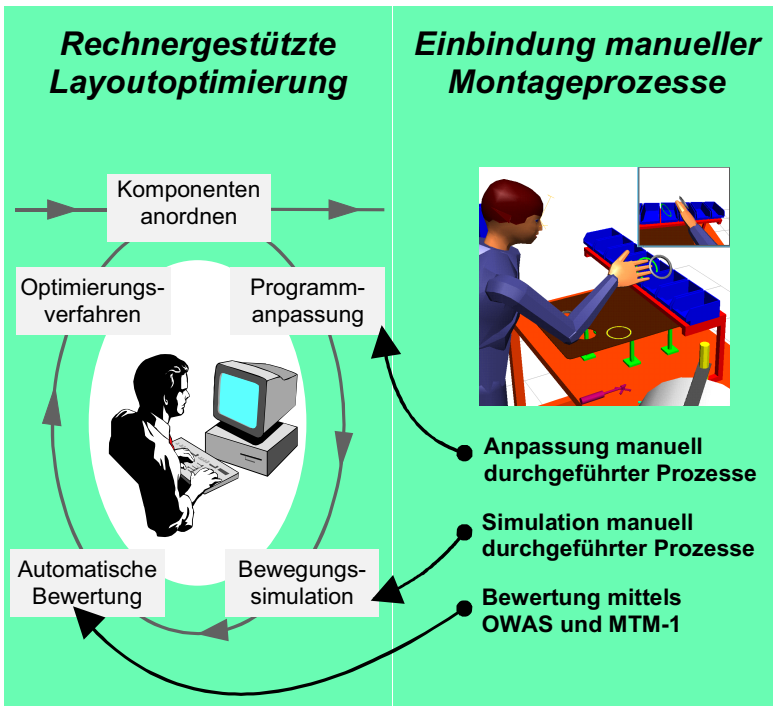


Bild 6-13: Integration manueller Montageprozesse in die rechnergestützte Layoutoptimierung

6.5 Systemtechnische Umsetzung

Die Umsetzung erfolgte auf der bereits erläuterten Systembasis. Zur Definition der Optimierungsaufgabe wurde die Struktur der Layoutanlage weiterverwendet. Diese Layoutstruktur kann wie in Kapitel 4 erläutert aus einem Strukturplanungssystem übernommen werden. Es wurde ein Optimierungsmodul und ein virtuelles Menschmodell in das System zur effizienten Layout- und Prozessmodellierung integriert.

Das Optimierungsmodul wurde dabei um folgende funktionalitäts-erweiternde und komplexitätsreduzierende Eigenschaften ergänzt:

- Berücksichtigung manueller Montageprozesse (vgl. Bild 6-13)
- Berücksichtigung von Kollisionen, die während einer Bewegung auftreten können
- Unterstützung der hierarchischen Optimierung
- Implementierung von GAs zur kombinierten Grob- und Feinoptimierung

Damit steht ein umfassendes Werkzeug zur schnellen, planungs-
begleitenden Anordnungsoptimierung unter Berücksichtigung automatisierter und manueller Bewegungsabläufe zur Verfügung.

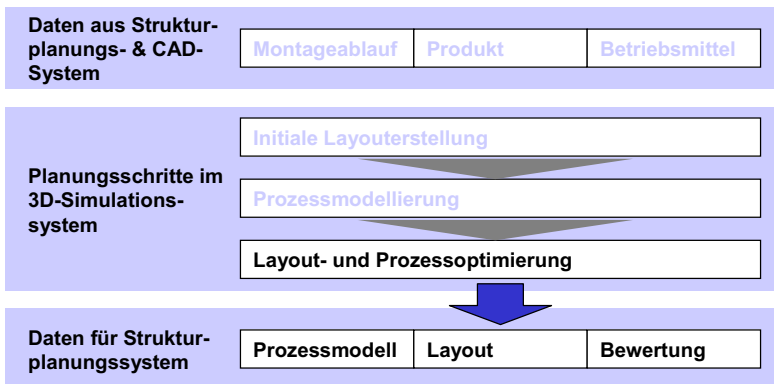


Bild 6-14: Ergebnis der Layout- und Prozessoptimierung

6.6 Ergebnis der Anordnungsoptimierung

Ergebnis dieses letzten Schrittes der Anordnungsoptimierung sind zum einen eine optimierte Layoutanordnung und zum anderen die Bewegungsabläufe für die im Layout befindlichen aktiven Kinematiken. Dies umfasst sowohl automatisierte Handhabungsgeräte als auch Tätigkeiten von Personen.

Die Bewegungsabläufe für Roboter liegen in Form der Ausführungsprogramme vor. Dadurch können sie für die Inbetriebnahmephase weiterverwendet werden.

Analog können mit den im verwendeten Basissystem zur Verfügung stehenden Mitteln, wie Filmerzeugung oder VRML-Export, Arbeitsanweisungen für das Montagepersonal erzeugt werden. Diese Daten können sowohl zur Schulung als auch zur Vor-Ort-Information weiterverwendet werden.

Die erzielte Layout- und Prozessinformation kann zusammen mit den Analyseergebnissen des Optimierungsschrittes an das Strukturplanungssystem zurückübergeben werden. Dadurch ist dort eine weitere Verarbeitung z.B. zur Kostenanalyse möglich. Basierend auf diesen Analysen ist dann entweder das Ziel der räumlichen Montagesystemplanung erreicht oder es erfolgt ein neuer Iterationsschritt mit geänderten Eingangsgrößen (z.B. andere Betriebsmittel, veränderte Prozessstruktur).

Im folgenden Kapitel wird die Anwendung des, in den vorangegangenen Kapitel entwickelten, Systems zur effizienten Layout- und Prozessmodellierung für hybride Montageanlagen beschrieben.

7 Anwendungsbeispiele

7.1 Übersicht

Das vorliegende Kapitel soll anhand ausgewählter Szenarien aus der Montageplanung zeigen, wie sich das System zur effizienten Layout- und Prozessplanung in der praktischen Anwendung darstellt.

Am Beispiel einer automatisierten Montagestation wird dabei zunächst gezeigt, wie mittels der in den Realisierungskapiteln beschriebenen Algorithmen und Methoden eine Montagestation Schritt für Schritt automatisiert aufgebaut werden kann. Die einzelnen Schritte entsprechen dabei den drei Schritten des beschriebenen Systems zur effizienten Layout- und Prozessplanung von Montageanlagen.

Die Optimierungsalgorithmen, welche sowohl zur Verbesserung von automatisierten als auch manuellen Montagestationen eingesetzt werden, sind Gegenstand der im weiteren beschriebenen Beispiele. Anhand verschiedener Anwendungen aus der Produktionsplanung wird zunächst die Eignung genetischer Algorithmen für verschiedene Fragestellungen beschrieben. Ergänzend wird die automatisierte Layoutoptimierung eines Arbeitsplatzes zur manuellen Montage beleuchtet.

Die im Rahmen dieser Arbeit entstandene VR-Umgebung zur effizienten interaktiven Anlagenplanung ist Gegenstand des abschließenden Anwendungsbeispiels. Am Beispiel eines manuellen Montagearbeitsplatzes wird gezeigt, wie VR-Hilfsmittel effizient in der Planung eingesetzt werden können. Ebenso wird gezeigt, dass das Bewegen beliebiger Kinematiken möglich ist und somit die Unterstützung hybrider Montagesysteme gewährleistet ist.

Den Abschluss des Kapitels bildet die Bewertung des Systems zur effizienten Layout- und Prozessplanung für hybride Montageanlagen. Es werden Aufwand und Nutzen des Systems gegenübergestellt und ein Fazit zur wirtschaftlichen Bewertung gezogen.

7.2 Automatisierte Layout- und Prozessplanung

Die automatisierte Layout- und Prozessplanung soll am Anwendungsfall einer automatisierten Montagestation demonstriert werden. Folgende Eingangsgrößen der Planung sind bekannt:

- Produkt: Bohrmaschine
- Betriebsmittel: Roboter, Laststände, Montagemodule
- Montageablauf: Einpressen der Antriebswelle in das Bohrmaschinengehäuse

Mittels der Layout- und Prozessplanung sollen nun folgende Planungsaufgaben erledigt werden:

- Ermitteln der optimalen Layoutanordnung der Betriebsmittel
- Generierung des Bewegungsablaufes für den Roboter und andere aktive Betriebsmittel
- Ermittlung der Kenngrößen der Montagestation (Taktzeit, Kollisionsbewertung, ...)

7.2.1 Layouterstellung

Entsprechend dem vorgestellten dreistufigen Vorgehens, erfolgt im System zur effizienten Layout- und Prozessmodellierung zunächst die Bestimmung der Relativanordnungen der verwendeten Betriebsmittel und Produktteile (siehe Kapitel 4).

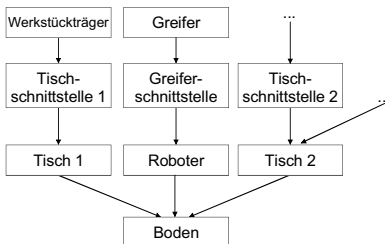


Bild 7-1: Layoutstruktur der Montagestation

Im Montageplanungssystem wurden dazu die zu verwendenden Betriebsmittel ausgewählt. Darüber hinaus wurde die Layoutstruktur definiert (Bild 7-1). Im CAD-System wurden die anordnungsbestimmenden Features definiert, welche die automatisierte Ermittlung der Relativanordnung ermöglichen.

Nach Anwendung der in Kapitel 4 vorgestellten Methoden erhält man als Ergebnis ein erstes Layout der Montagestation (Bild 7-2). Die implementierten Methoden gewährleisten, dass nach Möglichkeit alle Betriebsmittel und Produkte, die in der Montagestation existieren, kollisionsfrei angeordnet werden. Unter bestimmten Umständen ist dies jedoch nicht möglich. In diesem Fall muss der Planer die Layoutstruktur verändern (z.B. ein Montagemodul von einem Laststand auf den anderen verlagern), oder Betriebsmittelgeometrien verändern (z.B. Aufstellflächen vergrößern).

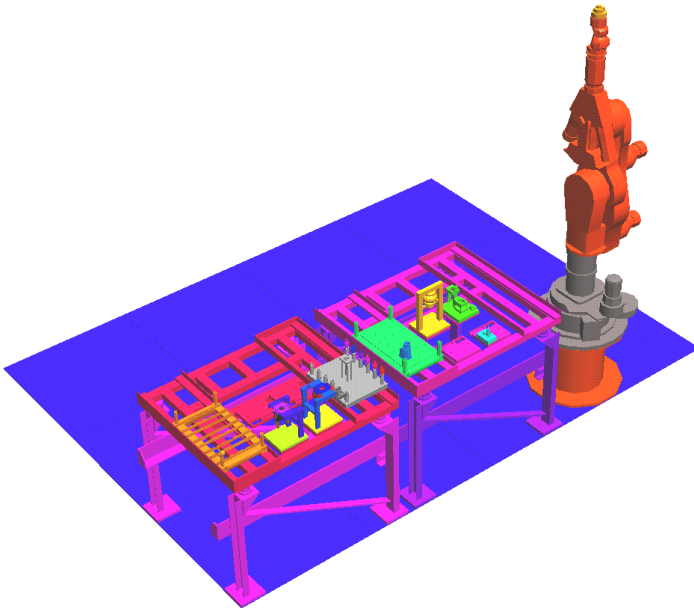


Bild 7-2: Ergebnis der Layouterstellung

Wie man in der Abbildung erkennen kann, wird noch nicht berücksichtigt, ob der Montageprozess mit dieser Anordnung durchführbar ist. Dies ist in dieser ersten Anordnung des betrachteten Beispiels noch nicht möglich, da der Arbeitsraum des Roboters den vorderen Laststand nicht abdeckt. Um die Durchführbarkeit der Montageaufgabe sicherzustellen, muss daher im zweiten Schritt das Modell des räumlichen Bewegungsablaufes generiert werden.

7.2.2 Prozessmodellierung

Neben der im ersten Schritt erzeugten Anordnung der Montagestation wird für die Prozessmodellierung der Montageablauf benötigt. Dieser wurde, genau wie die Layoutstruktur, im Montageplanungssystem erstellt (Bild 7-3).

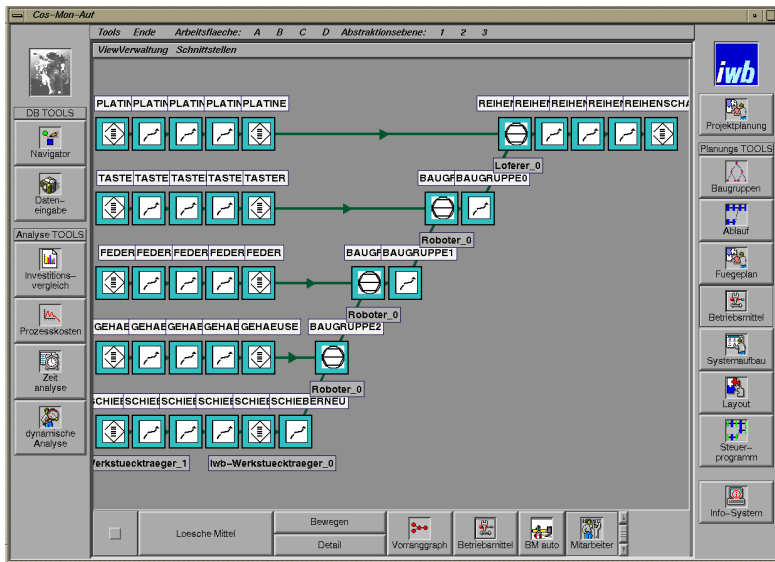


Bild 7-3: Montageablaufplan in CosMonAut

Dieser abstrakte Montageablaufplan wird mittels der, in Kapitel 5 beschriebenen Methoden, in Programme für die aktiven Kinematiken

umgewandelt. Diese Programme stellen gleichzeitig das Prozessmodell der Montageanlage dar. Sie können zeitlich logisch entsprechend dem Montageablaufplan ausgeführt werden. D.h. die einzelnen Kinematiken können synchronisiert simuliert werden. So werden für den in Bild 7-4 dargestellten Montageschritt sowohl die Bewegungsbefehle für den Roboter generiert, als auch die Programmbefehle zum Öffnen und Schließen des aktiven Greifers. Die Anfahrpositionen der Handhabungsgeräte sind als Funktionen der Layoutpositionen der anzufahrenden Gegenstände (z.B. des Bohrmaschinengehäuses) definiert. Dadurch können im weiteren Verlauf die Positionen der Gegenstände verändert werden, ohne dass eine Neuerstellung des Prozessmodells erfolgen muss. Die Position der Gegenstände muss z.B. verändert werden, um zum einen ausführbare Prozesse zu erzeugen und zum anderen diese hinsichtlich der vorgegebenen Zielgrößen, etwa der Taktzeit, zu optimieren.

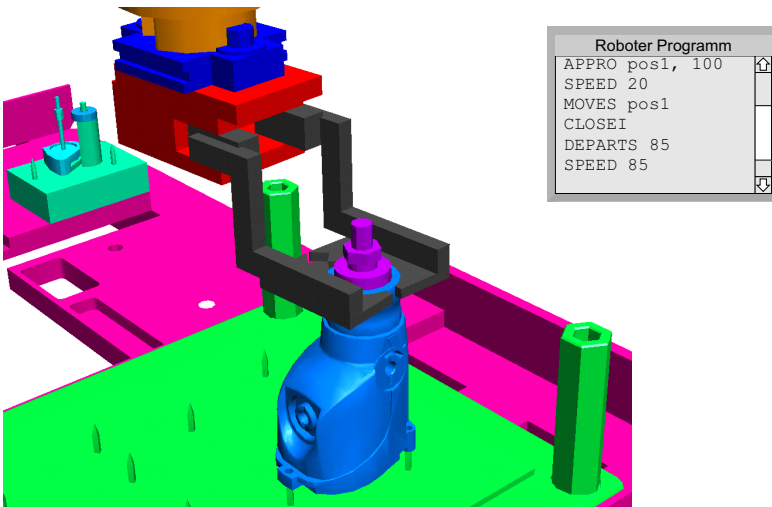


Bild 7-4: Automatisierter Greifvorgang als Teilergebnis der räumlichen Prozessmodellierung

Die erzeugten Programme können zum einen zur Bewertung der Montageanlage verwendet werden. Zum anderen können sie als erste Version der Produktionsprogramme genutzt werden.

7.2.3 Layoutoptimierung

Der letzte Schritt der Layoutoptimierung soll nun gewährleisten, dass der Montageprozess durchführbar und optimiert ist. Dazu werden gemäß Kapitel 6 die Parameter der Optimierungsaufgabe berechnet. Mittels der ebenso dort vorgestellten hierarchischen Layoutoptimierung wird eine optimierte Layoutanordnung erzeugt. In Bild 7-5 ist ein Zwischenschritt dieser Layoutoptimierung zu sehen.

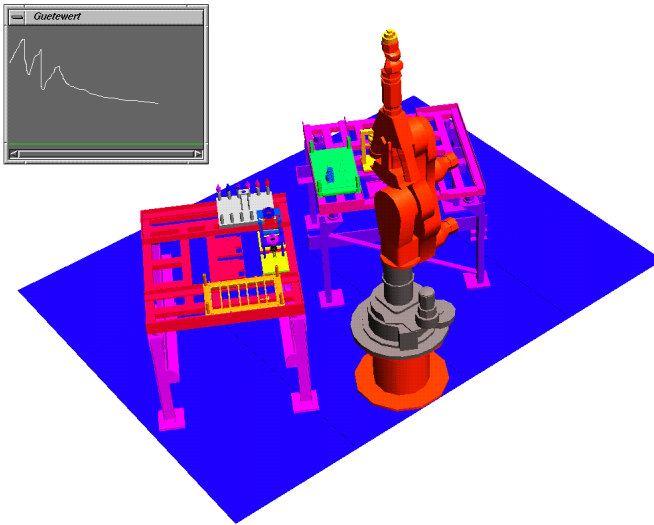


Bild 7-5: Zwischenschritt der hierarchischen Layoutoptimierung

Die implementierte Layoutoptimierung ermöglicht es, eine hohe Anzahl von Layoutkonfigurationen in kürzester Zeit automatisiert generieren zu lassen. Jede dieser Konfigurationen wird hinsichtlich der Einhaltung von Randbedingungen (z.B. Erreichbarkeit) und der Erfüllung von Zielfunktionen (z.B. Minimierung der Taktzeit) bewertet. In Bild 7-6 ist dargestellt, wie während der Layoutoptimierung eine Neuplanung der Roboterbewegungsbahn erfolgt, um Kollisionen mit anderen Betriebsmitteln oder Produktteilen zu vermeiden.

Die eingesetzten Optimierungsverfahren gewährleisten, dass ein Gesamt-optimum erreicht wird, d.h. Randbedingungen eingehalten werden und

die Taktzeit minimiert wird. Eine detailliertere Betrachtung der eingesetzten Verfahren erfolgt in Kapitel 7.3.

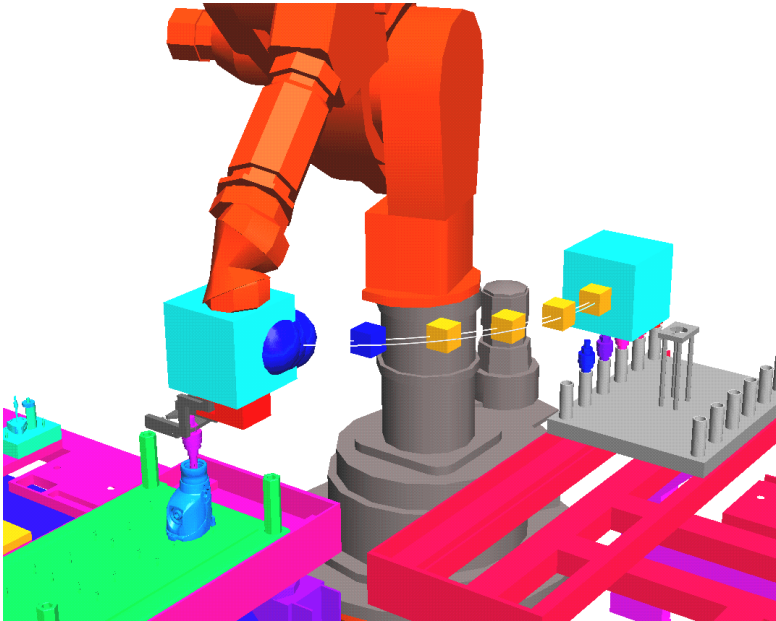


Bild 7-6: Einsatz der Bahnplanung zur Generierung kollisionsfreier Montageprozesse

7.2.4 Ergebnis der automatisierten Layout- und Prozessplanung

Das Ergebnis der drei Planungsschritte ist in Bild 7-7 zu sehen. Ausgehend von Strukturdaten von Layout und Montageprozess wurde unter Verwendung anordnungsbestimmender Features der CAD-Modelle ein Layout- und Prozessmodell erzeugt.

Das Simulationsmodell konnte weitgehend ohne Interaktion des Benutzers generiert werden. Lediglich die Strukturinformationen müssen erzeugt werden und die Zielfunktion der Layoutoptimierung. Damit wurde die Grundforderung nach einer effizienten Erstellung der

Simulationsmodelle erfüllt. Es ist z.B. sehr einfach möglich, in der Layoutstruktur den Roboter durch eine Alternativkomponente zu ersetzen und den dreistufigen Planungsprozess erneut zu starten. Aufgrund der minimalen Benutzerinteraktion ist eine schnelle Aussage möglich, welcher Roboter für die betrachtete Aufgabe besser bzw. überhaupt geeignet ist.

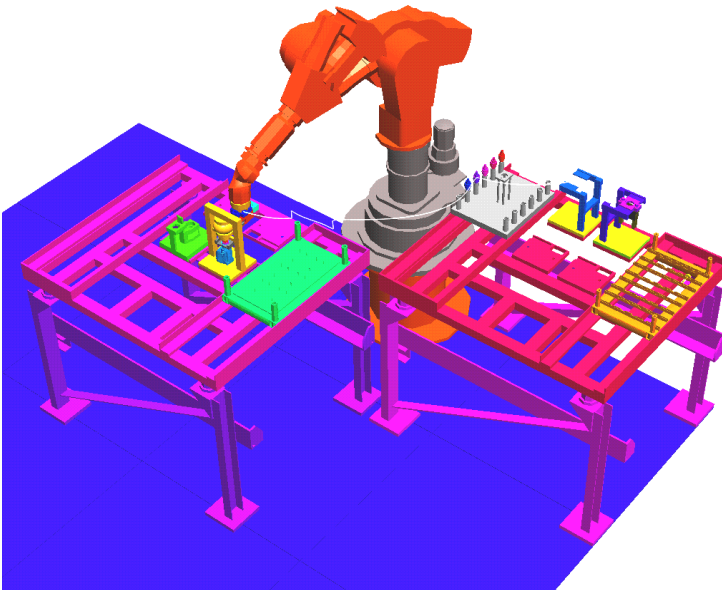


Bild 7-7: Ergebnis der automatisierten Simulationsmodellerstellung

7.3 Einsatz der Optimierungsalgorithmen

Da Optimierungsalgorithmen eine zentrale Rolle bei der effizienten Layout- und Prozessmodellierung einnehmen, erfolgt an dieser Stelle eine Analyse der Verfahren. Außerdem wird gezeigt, dass die Verfahren auch geeignet sind, um manuelle Tätigkeiten zu optimieren.

7.3.1 Anwendung und Bewertung genetischer Algorithmen

Die zum Einsatz kommenden genetischen Algorithmen wurden anhand zweier Beispiele aus der Produktionsplanung untersucht. Ziel der Untersuchung war es, zu zeigen dass GAs lediglich durch Anpassung der Kodierungs-/Dekodierungsstufe (siehe Kapitel 6.4.2) verschiedene Fragestellungen lösen können.

Die erste Fragestellung besteht darin, die Position eines Werkzeugs (Laserschneidkopf) so zu verändern, dass sich ein möglichst kurzer Bearbeitungsprozess mit konstanter Schnittgeschwindigkeit ergibt. Die Position des Werkzeugs lässt sich durch die in Bild 7-8 dargestellte Vorrichtung in bestimmten Grenzen variieren. Eine Änderung der Werkzeugorientierung ist nicht möglich.

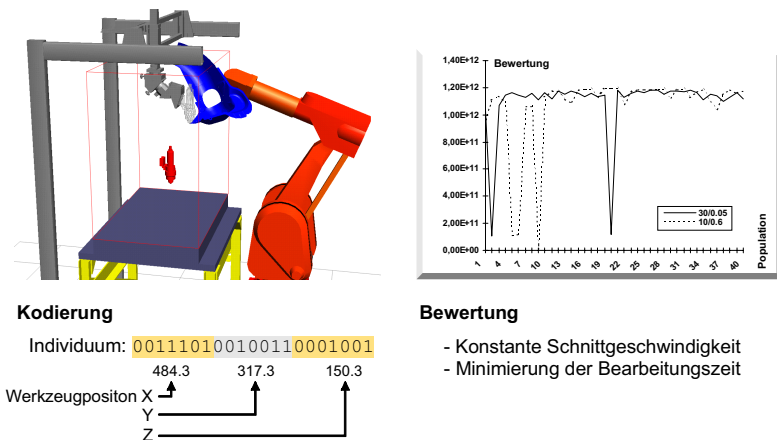
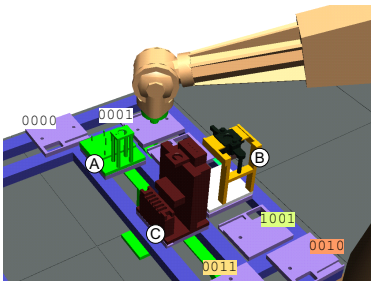


Bild 7-8: Optimierung einer Werkzeugposition in der Laserbearbeitung

Im Bild rechts dargestellt ist die Bewertung von insgesamt 40 Populationen mit zwei unterschiedlichen Parametersätzen. Im einen Fall wurde eine Populationsgröße von 30 Individuen und einer Rekombinationswahrscheinlichkeit von 0.05 gewählt. Im anderen war die Populationsgröße 10 und die Rekombinationswahrscheinlichkeit auf 0.6 eingestellt. Die Abszisse bezeichnet die Populationen. An der Ordinate ist jeweils die durchschnittliche Bewertung einer Population aufgetragen.

Wie zu sehen ist, benötigt die Kultur mit einer geringeren Populationsgröße (gestrichelt dargestellt) etwas länger, um zu konvergieren. Jedoch müssen dafür pro Population lediglich 10 Bewertungen durchgeführt werden im Gegensatz zu 30.

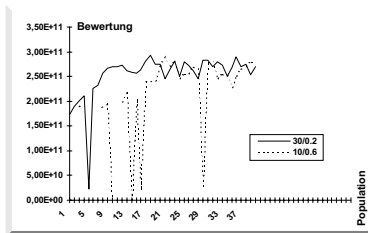
In beiden Fällen wurde jedoch mit insgesamt 400 bzw. 1200 Bewertungen ein Ergebnis erzielt, das lediglich um 3% schlechter ist, als bei Durchführung einer kompletten Enumeration mit über 16 Millionen Bewertungen. In sehr kurzer Zeit (ca. 10 Minuten) konnte damit nahezu das beste Ergebnis erreicht werden, was für den Einsatz der genetischen Algorithmen für diese Fragestellung spricht.



Kodierung

Individuum: 001100101001

Modul A auf Schnittstelle
Modul B auf Schnittstelle
Modul C auf Schnittstelle



Bewertung

- Minimierung der Bearbeitungszeit
- Maximierung der Montagekräfte

Bild 7-9: Anordnungsoptimierung von Montagemodulen

Als zweites Beispiel wurde die Fragestellung untersucht, wie sich Montagemodule auf diskreten Positionen eines Montagetisches möglichst optimal anbringen lassen. Nicht immer kann nämlich ein Montagemodul frei positioniert werden, sondern muss wegen der Verwendung von Strom- und Pressluftschnittstellen an ganz bestimmten Stellen angebracht werden. Vor diesem Hintergrund kann nicht mehr einfach die Position im Raum verändert werden, sondern es erfolgt eine variable Zuordnung eines Montagemoduls auf eine Modulschnittstelle.

Entsprechend wurde die Kodierung für diesen Anwendungsfall gewählt. Ein Gen eines Individuums bezeichnet die binärcodierte Schnittstelle auf die das zugeordnete Modul gesetzt werden soll. Im Beispiel in Bild 7-9

wird somit Modul A auf die Schnittstelle mit der Nummer 3 (0011) gesetzt usw. Das Optimierungsziel ist die Minimierung der Bearbeitungszeit bei gleichzeitiger Maximierung der Montagekräfte durch Verwendung günstiger Gelenkwinkelkonfigurationen (z.B. Kniehebeleffekt).

Auch hier wurden wieder zwei Parametersätze untersucht. Wie man sieht, konvergiert auch hier wieder die Kultur mit der größeren Population schneller. Bereits nach wenigen Populationen stellt sich eine optimierte Layoutkonfiguration ein, die mit anderen Verfahren gar nicht oder nach viel längerer Zeit ermittelt werden kann.

7.3.2 Optimierung manueller Arbeitsplätze

Das vorgestellte System zur effizienten Layout- und Prozessmodellierung lässt sich sowohl für automatisierte als auch manuelle Montagevorgänge und damit für hybride Montagesysteme einsetzen.

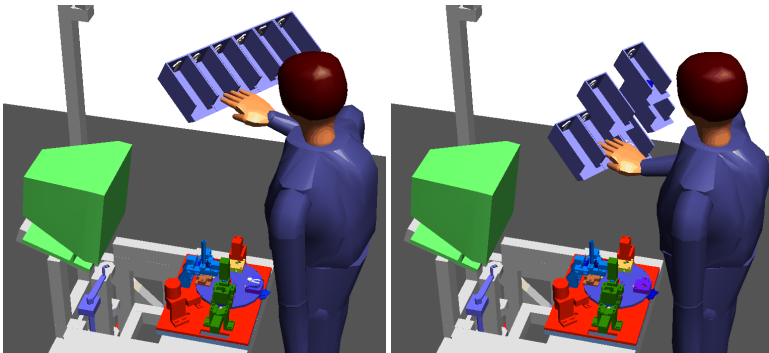


Bild 7-10: Optimierung manueller Arbeitsplätze

In Abschnitt 7.2 wurde bereits die Anwendung des Systems in der automatisierten Montage gezeigt. Manuelle Vorgänge lassen sich prinzipiell äquivalent wie automatisierte Vorgänge behandeln, jedoch werden zur Prozessmodellierung VR-Hilfsmittel verwendet. In Bezug auf die Layoutoptimierung ergeben sich lediglich Unterschiede in der Aufstellung der Zielfunktion. So spielen bei manuellen Tätigkeiten neben der Bearbeitungszeit die Kriterien Ergonomie und Einsehbarkeit eine wesentliche Rolle.

In Bild 7-10 ist eine manuelle Arbeitsstation für die Montage eines elektrischen Dosenöffners dargestellt. Links zu erkennen ist die Ausgangssituation, in der die Behälter für die Produkteinzelteile direkt nebeneinander angeordnet sind. Nach der Definition einer Optimierungsaufgabe in der die Behälter frei verschoben werden können und die Zeit gleichgewichtet zur Ergonomiebewertung in das Optimierungskriterium eingeht, ergibt sich die rechts dargestellte Anordnung. Das Resultat ist eine 20% Verbesserung des gemischten Kriteriums aus MTM- und OWAS-Bewertung.

Trotz dieser schnellen Verbesserung stellt sich bei der Optimierung manueller Montagevorgänge heraus, dass die menschliche Flexibilität mittels derzeitiger menschlicher Simulationsmodelle nur ungenügend abgebildet werden kann. So ist es mit der derzeitigen Implementierung nicht möglich, den Grifftyp, mit dem das Menschmodell ein Objekt greift, an die Anordnungssituation anzupassen. Erst durch die dynamische Anpassung dieser und anderer menschspezifischer Bewegungsfreiheitsgrade kann das volle Potential der Layoutoptimierung ausgeschöpft werden.

7.4 VR gestützte Interaktion

7.4.1 Erzeugung manueller Montageabläufe

Anhand des letzten Anwendungsbeispiels soll das im Rahmen dieser Arbeit implementierte VR-System diskutiert werden. Gegenstand der Betrachtung ist die manuelle Kleinteilemontage.

An einem Standardarbeitsplatz muss eine Baugruppe für eine Kettensäge montiert werden. In Bild 7-11 bis Bild 7-14 ist dargestellt, wie ein Planer einen Teilprozess mittels des VR-Systems modelliert. Zunächst greift er dazu mittels des Datenhandschuhs aus einem Kleinteilebehälter eine Schraube (Bild 7-11). Diese Schraube wird auf einer Bodengruppe leicht befestigt und muss anschließend mit einem elektrischen Schraubwerkzeug angezogen werden.

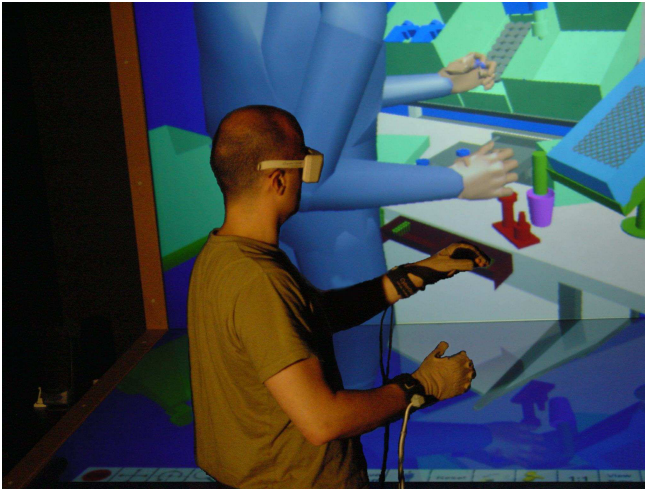


Bild 7-11: Greifen eines Kleinteils in der VR-Umgebung

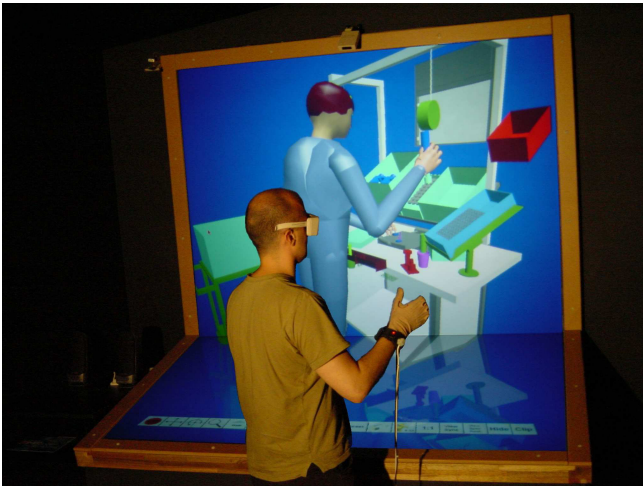


Bild 7-12: Greifen eines elektrischen Schraubwerkzeugs in der VR-Umgebung

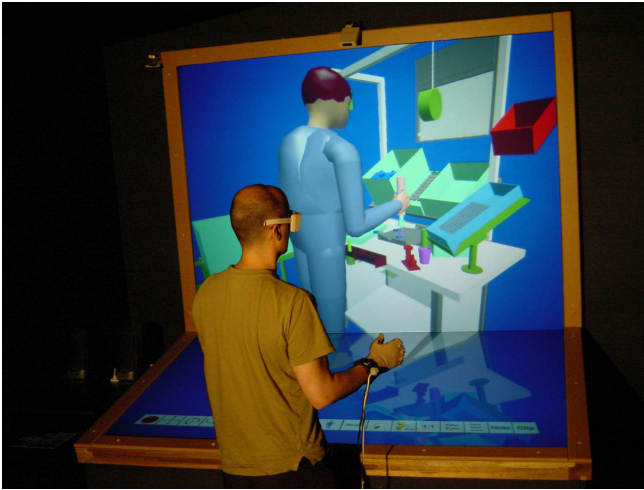


Bild 7-13: Schraubwerkzeug wird in Position zur Montagestelle gebracht

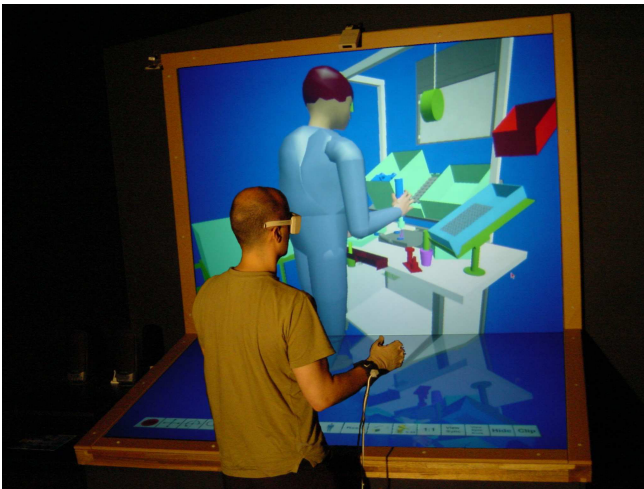


Bild 7-14: Schraubvorgang ist abgeschlossen – Werkzeug wird von Montagestelle entfernt

Dazu greift sich der Planer zunächst das Schraubwerkzeug (Bild 7-12), setzt dieses dann auf der Schraube auf (Bild 7-13), betätigt den Schrauber und entfernt das Werkzeug wieder von der Montageposition (Bild 7-14).

Anhand der Darstellungen wird deutlich, wie der Planer mittels der Datenhandschuhe sowohl Objekte in der VR-Umgebung greifen kann, als auch die Körperhaltung des virtuellen Menschmodells steuert.

Die Erstellung der Bewegungssequenz innerhalb der VR-Umgebung hat ca. 5 Minuten gedauert. Die Generierung des gleichen Ablaufs mit den herkömmlichen Methoden der 3D-Simulation benötigte dagegen 30 Minuten. Dabei ist noch nicht berücksichtigt, dass zur Bedienung des 3D-Simulationssystems Experten-Know-How benötigt wird, wohingegen das Arbeiten in der VR-Umgebung bereits nach einer kurzen Trainingsphase von 30-60 Minuten effizient möglich ist.

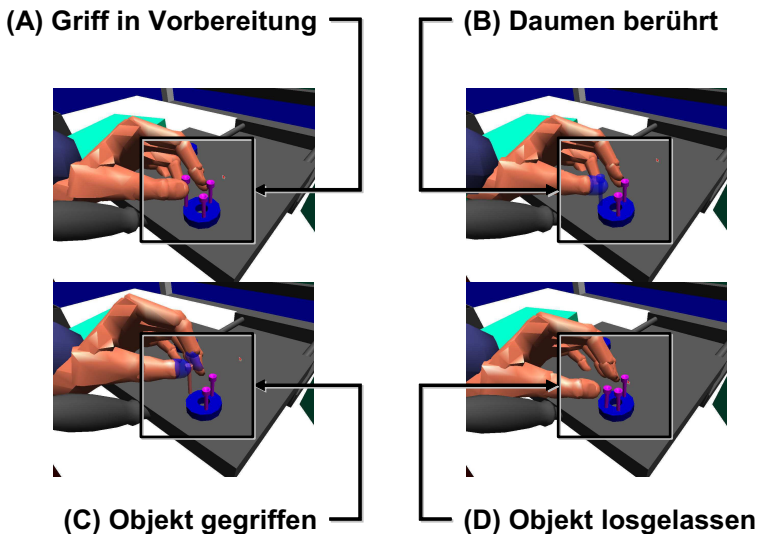


Bild 7-15: Greifen und Loslassen eines Objektes der VR-Umgebung

Einen Hauptteil der Trainingsphase nimmt dabei das Einstudieren von Greifvorgängen ein. Da noch keine Kraftrückkopplung implementiert wurde, ist der Bediener dabei allein auf die visuelle Darstellung angewiesen. Bild 7-15 zeigt, wie die Position einer Schraube auf der

Bodengruppe korrigiert wird. Der Bediener nähert sich dazu der Schraube an (Bild 7-15A). Dann bringt er den Daumen mit der Schraube in Berührung (Bild 7-15B). Die Daumenkuppe wird dazu als Feedback des Kontaktes blau eingefärbt. Sobald nun auch der Zeigefinger Kontakt mit demselben Objekt hat (Bild 7-15C), wird das Objekt als gegriffen angesehen und kann an die neue korrigierte Position bewegt werden. Zum loslassen wird der Zeigefinger vom Objekt entfernt, so dass kein Kontakt mehr besteht (Bild 7-15D). Die Abbildung zeigt, dass durch dieses Vorgehen auch relativ kleine Teile noch in der VR-Umgebung gehandhabt werden können.

7.4.2 Erzeugung automatisierter Bewegungsabläufe

Dass die in hybriden Montagesystemen erforderliche Erzeugung automatisierter Bewegungsabläufe möglich ist, soll am Beispiel des robotergestützten Punktschweißens dargestellt werden (Bild 7-16). Die Aufgabe des Planers besteht darin, den Roboter an vordefinierte Schweisspunkte zu bewegen und dann die Schweisszange optimal in Bezug auf Roboterstellung, Vorgänger- und Nachfolgerpunkte auszurichten. Diese Funktionalität wird auch in 3D-Simulationssystemen angeboten, jedoch ermöglicht die Verwendung der VR-Umgebung das Ausnutzen des Know-Hows von Anlageneinrichtern. Diese wissen in der Regel um die Randbedingungen und haben ein Gefühl dafür entwickelt wie der Roboter richtig stehen muss, um alle Schweisspunkte optimal anfahren zu können.

Im Beispiel kommt zum Bewegen des Roboters der Stylus als Alternative zu den Datenhandschuhen zum Einsatz. Zwar können auch mit den Datenhandschuhen Kinematiken bewegt werden, jedoch hat es sich in der Praxis als einfacher erwiesen, den Stylus zu verwenden, falls es nicht auf die genaue Abbildung der Fingerbewegungen ankommt. Der Roboter kann in den einzelnen kinematischen Achsen bewegt werden. Zusätzlich kann sein Tool-Center-Point (TCP) unter Verwendung der inversen Kinematik entlang eines kartesischen Koordinatensystems bewegt werden.

Durch die großzügige Dimensionierung der Projektionsfläche ist es problemlos möglich, zu zweit an dem virtuellen Modell der Montagestation zu arbeiten (Bild 7-17). Während ein Bediener die Datenhandschuhe zur Interaktion verwendet, kann der zweite einen 3D-Datenstift verwenden. Dies kann in mehreren Situationen hilfreich sein.



Bild 7-16: Erzeugung eines Roboterprogramms zum Punktschweißen in der VR-Umgebung

Ein Szenario ist die Unterstützung der Kooperation von Konstruktion und Montageplanung im Rahmen eines Simultaneous-Engineering-Prozesses. Für den Konstrukteur, der in der Regel nicht mit Simulationssystemen arbeiten muss, ergibt sich durch die Verwendung der VR-Benutzerschnittstelle eine deutliche Vereinfachung in der Interaktion mit dem Simulationsmodell. Auftretende Probleme im Montageprozess können somit schnell und effizient gemeinsam mit dem Montageplaner erkannt und gelöst werden. Ein zweites Szenario besteht in der Zusammenarbeit von Anlagenplaner und –bediener. Während der Planer anhand der virtuellen Anlage die Eigenschaften der Montagestation erklären kann, ist es dem späteren Anlagenbediener möglich, sofort Feedback basierend auf seinem praktischen Erfahrungsschatz zu geben. Damit kann die Phase des späteren Anlagenanlaufs verkürzt werden.



Bild 7-17: Kooperatives Überprüfen einer automatisierten Montagestation

7.5 Bewertung des Systems

Eine streng wirtschaftliche Bewertung des Systems nach objektiven Gesichtspunkten wie Zeit, Kosten und Qualität ist nur möglich, wenn ein- und dieselbe Planungsaufgabe mit und ohne Einsatz des hier vorgestellten Systems und des damit verbundenen Vorgehens erfolgt wäre. Die hierfür geeignete Planungsaufgabe und ein zugehöriges traditionell arbeitendes Planungsteam standen jedoch nicht zur Verfügung. Eine absolute Bewertung ist ebenso nicht möglich, da sich einerseits die Kosten für Systemeinführung oder -betrieb mangels kommerzieller Verfügbarkeit nicht abschätzen lassen. Andererseits lassen sich Nutzenpotentiale wie „Frühzeitige Absicherung der Montierbarkeit eines Produktes“ quantitativ nicht erfassen. Die Bewertung des Systems soll daher anhand eines qualitativen Aufwands-Nutzen-Vergleiches durchgeführt werden (vgl. Tabelle 2-1).

Aufwand	Nutzen
<ul style="list-style-type: none"> • Investition in Rechnersysteme und VR-Hardware • Investition in Software • Wartung von Hardware und Software • Schulungsaufwand für Anwender des Systems • Ggf. Aufwand für 3D-Datenmodellierung, falls dies noch nicht Standard im Unternehmen ist 	<ul style="list-style-type: none"> • Frühzeitige Absicherung der Montierbarkeit eines Produktes • Absicherung der Eignung von Betriebsmitteln (z.B. hinsichtlich Arbeitsraum) • Präzise Aussagen über Montagezeiten durch Simulation von manuellen und automatisierten Tätigkeiten • Reduzierte Planungskomplexität durch Trennung von Struktur- und 3D-Planung • Geringerer Aufwand zur Datenbereitstellung durch Systemintegration zu Strukturplanung und CAD • Reduzierung von Mehrfachdateneingabe durch konsequente Datenwiederverwendung in allen drei Schritten der räumlichen Planung • Beschleunigung der Planung durch Einsatz von Optimierungsalgorithmen und Featuretechnologie • Beschleunigung der Planung durch natürliche VR-gestützte Eingabemedien für manuelle Montagetätigkeiten • Wiederverwendung der Planungsdaten für Inbetriebnahme (Roboterprogramme) und Mitarbeiterschulung (Filme, 3D-Daten der manuellen Bewegungsabläufe) • Rechnergestützte Bewertung manueller Abläufe gemäß internationaler Standards

Tabelle 7-1: Aufwands-Nutzen-Gegenüberstellung für das System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen

Die Gegenüberstellung zeigt, dass auf der Aufwandsseite größtenteils einmaliger Aufwand anfällt. Auf der Nutzenseite befinden sich jedoch ausschließlich nachhaltig wirkende Vorteile, d.h. nach einmaligem Mitteleinsatz können die Vorzüge des Systems in mehreren Planungsprojekten genutzt werden. Dabei ist auch zu bedenken, dass das System durch die Integration mit der Strukturplanungsdatenbank Zugriff auf Planungsergebnisse von Vorgängerprojekten erlaubt, und somit mit jedem weiteren Projekt die Effektivität des Mitteleinsatzes steigt.

Neben den genannten Nutzeneffekten werden weitere nicht-quantifizierbare Effekte erzielt. So erlaubt der Einsatz der VR-Hilfsmittel und die damit verbundene, vereinfachte Interaktion mit dem 3D-Simulationsmodell, die Beteiligung des Produktionspersonals an der Planung des jeweiligen Arbeitsplatzes. Dies führt zum einen zu einer erhöhten Akzeptanz des Planungsergebnisses bei den betroffenen Mitarbeitern und ermöglicht auf der anderen Seite die Nutzung ihrer Erfahrung über die reale Produktion. Rechnerunterstützte Bewertung und Modellierung auf der anderen Seite ermöglichen die objektive Analyse eines Planungsergebnisses, was ebenso zu einer erhöhten Akzeptanz des Ergebnisses führt.

Den einmalig eingesetzten Aufwänden zur Systemimplementierung stehen damit zahlreiche nachhaltige Nutzeneffekte entgegen. Zusammenfassend lässt sich das Nutzen-Aufwand-Verhältnis und damit die Wirtschaftlichkeit des Systems als positiv bewerten.

8 Zusammenfassung

Die wirtschaftliche Durchführung industrieller Montageprozesse wird nicht allein durch den Einsatz von rationellen Produktionsmethoden wie Automatisierungstechnik, Hybridisierung oder Modularisierung erreicht. Vielmehr sind leistungsfähige Planungshilfsmittel eine notwendige Voraussetzung für einen effizienten Einsatz derartiger Systeme. In den Vordergrund rücken heute dabei nicht nur leistungsstarke Einzelfunktionen, sondern integrierte Planungspakete. Diese Planungspakete müssen sich in Simultaneous Engineering Prozesse einpassen und zur Senkung der Planungszeit bei gleichzeitiger Steigerung der Planungsqualität beitragen. Dementsprechend war es Zielsetzung der vorliegenden Arbeit, ein integriertes System zu entwickeln, das die Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen effizient unterstützt.

In einer Situationsanalyse, die sich auf aktuelle Methoden und Werkzeuge zur Montagesystemplanung bezieht, wurde zunächst die Bedeutung von Simultaneous Engineering als effizienzsteigernde Methode im Zusammenwirken von Konstruktion und Montageplanung geklärt. Bei der Analyse verfügbarer Werkzeuge wurde der Schwerpunkt auf 3D-Simulationssysteme und VR-Systeme gelegt. Es wurde festgestellt, dass keines der Systeme folgende aus der Situationsanalyse abgeleiteten Forderungen gleichermaßen unterstützt:

- Unterstützung von automatisierten und manuellen Tätigkeiten
- Unterstützung des Simultaneous Engineering Ansatzes durch Integration zu Strukturplanungssystemen
- Kontinuierliche Weiterverwendung von Planungsergebnissen während aller Planungsschritte und auch zur Inbetriebnahme
- Reduzierung der Interaktionskomplexität mit dreidimensionalen Simulationsmodellen unter Berücksichtigung geometrischer Randbedingungen
- Unterstützung von Layout- und Prozessplanung gleichermaßen
- Unterstützung von Planungsautomatismen

Darauf basierend wurde ein System konzipiert, das diese Forderungen in gleicher Weise erfüllen soll. Als Basissystem wurde ein 3D-Simulationssystem verwendet, welches die Simulation automatisierter

und manueller Montageprozesse unterstützt. Die Integration in den Simultaneous Engineering Prozess ist durch direkte Verwendung von Daten aus einem Strukturplanungssystem und CAD-System gegeben. Die im System erzeugten Informationen werden ebenfalls im Strukturplanungssystem zur weiteren Verwendung abgelegt. Die Ein- und Ausgabeinformationen, welche in einzelnen Teilschritten während des Arbeitens mit dem System benötigt, bzw. erzeugt werden, wurden klar definiert und tragen somit zur Konfigurierbarkeit des Gesamtprozesses bei. Die drei Teilschritte „Layoutanordnung“, „Prozessmodellierung“ und „Anordnungsoptimierung“ unterstützen die Planung automatisierter und manueller Tätigkeiten jeweils in spezifischer Weise. So werden nach Möglichkeit Planungsautomatismen eingesetzt, um die Eingriffe seitens des Planers auf ein Minimum zu reduzieren (z.B. implizite Offline-Programmierung, Anordnungsoptimierung). Tätigkeiten, die Interaktionen notwendig machen, werden durch den Einsatz von VR-Techniken und durch Verwendung anordnungsbestimmender Features deutlich vereinfacht. Gleichzeitig kann durch die vereinfachte Benutzerschnittstelle das Erfahrungswissen von Planer und Anlagenbediener auf direktem Weg in die Planung einfließen. Durch eine nahtlose Integration der VR-Bedienelemente ist ein problemloser Wechsel zwischen VR-gestützten Aktionen und dem Einsatz von Planungsautomatismen möglich (z.B. Modellierung manueller Prozesse im Wechsel mit der Anordnungsoptimierung). In der Anordnungsoptimierung schließlich werden Layout und Prozess als Einheit betrachtet und optimal aufeinander abgestimmt. Somit sind alle oben genannten Forderungen gleichermaßen erfüllt.

Die Verbesserung des Planungsprozesses ist dabei auf den integrativen Charakter des entwickelten Systems zurückzuführen. Musste bislang zwischen Systemen zur Offline-Programmierung und zur Menschensimulation gewechselt werden, oder für den Einsatz der VR-Technologie zunächst aufwendige Datenaufbereitung betrieben werden oder mangels integrierter Planungsautomatismen zeitaufwendige iterative Untersuchungen manuell durchgeführt werden, kann dies nun in einem System erfolgen. Die durch Systemwechsel verursachten Aufwände und Fehler entfallen. Dadurch kann die Planungszeit gesenkt und die Planungsqualität verbessert.

Ansätze für weitere Effizienzsteigerungen bieten nunmehr die eingesetzten Einzeltechnologien. So ist zu erwarten, dass in Zukunft die Methoden der impliziten Offline-Programmierung auch für die Modellierung manueller Tätigkeiten eingesetzt werden können. Parallel

dazu werden sich die VR-Technologien weiterentwickeln, die durch verbesserte Projektionen Überdeckungsprobleme umgehen und durch Kraftrückkopplungen realistisches Feedback geben können.

9 Literaturverzeichnis

AMBROSY U.A. 1995

Ambrosy, S.; Bindbeutel, K.; Conrat, J.-I.; Feldmann, C.; Glander, M.; Schmalzl, B.: Integrierte Vorgehensweise. In: Bender, H.; Ehrlenspiel, K.; Heinzl, J.; Milberg, J.; Pfeiffer, F.; Reichwald, R.; Reinhart, G. (Hrsg.): Montageautomatisierung durch Integration von Konstruktion und Planung. SFB336-Kolloquium, München 1995.

AMMER 1982

Ammer, D.: Rechnerunterstützte Vorranggraphenerstellung – ein Schritt zur rationellen Montageplanung. Industrie Anzeiger 104 (1982) 14, S. 27-28.

ANGERBAUER U.A. 1996

Angerbauer, R.; Gronbach, H.; Hohenadel, J.: Schneller zur betriebsbereiten Maschine – Maschinen- und Steuerungssysteme effizient entwickeln und simulieren. wt-Produktion und Management 86 (1996), S. 32-36.

BÄCK & SCHWEFEL 1993

Bäck, T.; Schwefel, H.-P.: An Overview of Evolutionary Algorithms for Parameter Optimization. Evolutionary Computation 1 (1) 1993, S. 1-23.

BADLER U.A. 1993

Badler, N.; Phillips, C.; Webber, B.: Simulating Humans: Computer Graphics Animation and Control. Oxford University Press, New York, NY, 1993.

BADLER 1997

Badler, N.: Real-time virtual humans. Pacific Graphics 1997.

BARRAL U.A. 1999

Barral, D.; Perrin, J.-P.; Dombre, E.; Liegeois, A.: Development of Optimisation Tools in the Context of an Industrial Robotic CAD Software Product. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (1999) 18, S. 822-831.

BAUER 1997

Bauer, W.H.: Entwicklung eines Systems zur virtuellen ergonomischen Arbeitsgestaltung. Berlin: Springer 1997. (IPA-IAO Forschung und Praxis 257).

BAUER 1998

Bauer, L.: Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen. Dissertation TU München 1998.

BAYAZIT U.A. 1999

Bayazit, O.B.; Song, G.; Amato, N.M.: Providing Haptic 'Hints' to Automatic Motion Planners. Phantom Users Group Workshop (PUG99), October 1999.

BESTLE U.A. 1998

Bestle, D.; Meier, H.; Glora, M.; Kreusch, K.: Vorabinbetriebnahme numerischer Steuerungen mit simulierten Werkzeugmaschinen. *Industrie Management* 14 (1998) 5, S. 49-52.

BICKENDORF 1994

Bickendorf, J.: Full-Automatic Off-Line Programming of Complex Cutting Paths. In: *Proceedings of the 25th international Symposium on Industrial Robots*, Hannover (1994), S. 499-506.

BICKENDORF 2000

Bickendorf, J.: Featurebasierte CAD/CAM-Kopplung für das Profilschneiden mit Robotern. *VDI-Z* 142 (2000) Nr. 5, S. 51-53.

BILLINGHURST & SAVAGE-CARMONA 1996

Billinghurst, M.; Savage-Carmona, J.: Adding Intelligence to the Interface. In Bryson, S. (Ed.) Proceedings of Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS '96), S. 168-176.

BLACH U.A. 1998

Blach, R.; Landauer, J.; Rösch, A.; Simon, A.: A flexible Prototyping Tool for 3D Realtime User-Interaction. In: Virtual Environments: Conference and 4th Eurographics workshop / IEEE YUFORIC Germany '98; June 16-18, 1998, S. 195-203.

BLEY & FRANKE 2001

Bley, H.; Franke, C.: Integration von Produkt- und Produktionsmodell mit Hilfe der Digitalen Fabrik. wt Werkstattstechnik 91 (2001) H. 4, S. 214-220.

BLEY U.A. 2001

Bley, H.; Bernardi, M.; Franke, C.; Seel, U.: Process-based assembly planning using a simulation system with cell calibration. In: Proceedings of the 32nd ISR (International Symposium on Robotics), Seoul, Korea, 2001, S. 838-843.

BLOOMER 1992

Bloomer, J.: Power Programming with RPC. Sebastopol: O'Reilly & Associates Inc., 1992.

BOOTHROYD & DEWHURST 1989

Boothroyd, G.; Dewhurst, P.: Product Design for Assembly Handbook. Boothroyd and Dewhurst, Inc., 1998.

BUCK 1996

Buck, M.; Grebner, K.; Katterfeldt, H.: Modeling and Interaction Tools for Virtual Environment. In: Proceedings Virtual Reality World '96. Stuttgart, Februar 1996.

BULLINGER 1986

Bullinger, H.J. (Hrsg.); Ammer, D.; u.a.: Systematische Montageplanung. München: Carl Hanser 1986.

CHEDMAIL & RAMSTEIN 1996

Chedmail, P.; Ramstein, E.: Robot synthesis using genetic algorithms: analysis and evaluations. In: Proceedings of CESA '96 IEEE Systems, Man and Cybernetics, Ecole Centrale Lille, July 1996.

CRUZ-NEIRA U.A. 1993

Cruz-Neira, C.; Sandin, T.A.; De Fanti R.V.: Surround Screen projection based virtual reality: the design and implementation of the CAVE. Proceedings of SIGGRAPH 1993, S. 135-142.

CUIPER 2000

Cuiper, R.: Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen. München: Herbert Utz Verlag 2000. (iwb-Forschungsberichte 143).

CUIPER U.A. 1996

Cuiper, R.; Feldmann, Ch.; Roßgoderer, U.: Rechnerunterstützte Parallelisierung von Konstruktion und Montageplanung. ZWF 91 (1996) 7-8, S. 338-341.

CUIPER & ROßGODERER 1997

Cuiper, R.; Roßgoderer, U.: Montageanlagen planen und steuern. In: Die neue Fabrik – Modellfabrik als Denkmodell. Landsberg/Lech: mi-Verlag 1997, S. 58-60.

DANI & GADH 1997

Dani, T.H.; Gadh, R.: Creation of concept shape designs via a virtual reality interface. In: Computer-Aided Design, Vol. 29, No. 8, 1997, S. 555-563.

DEISINGER U.A. 2000A

Deisinger, J.; Blach, R.; Wesche, G.; Breining, R.; Simon, A.: Towards Immersive Modeling – Challenges and Recommendations: A Workshop Analyzing the Needs of Designers. In: Mulder, J.D.; van Liere, R. (Hrsg.): Virtual Environments 2000, Proceedings of the 6th Eurographics Workshop on Virtual Environments June 1 – June 2, 2000, Amsterdam, The Netherlands. New York: Springer 2000.

DEISINGER U.A. 2000B

Deisinger, J.; Breining, R.; Rößler, A.; Höfle, J.; Rückert, D.: Immersive Ergonomic Analyses of Console Elements in a Tractor Cabin. In: 4th Immersive Projection Technologies Workshop, June 19th-20th, Ames, Iowa 2000.

DEITZ 1995

Deitz, D.: Human-integrated design. In: Mechanical Engineering 117 (1995) 8, S. 92-96.

DIESS 1988

Diess, H.: Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse. Berlin: 1988 (iwb-Forschungsberichte 11).

DILLMANN U.A. 1999

Dillmann, R.; Rogalla, O.; Ehrenmann, M.; Zöllner, R.; Bordegoni, M.: Learning Robot Behaviour and Skills based on human demonstration and advice: the machine learning paradigm. In: 9th International Symposium of Robotics Research (ISRR), October 9-12 1999, Snowbird, USA, pp. 229-238.

DINI 1993

Dini, G.: A Module for the Automated Planning of Grasps in Robotized Assembly Operations, CIRP Annals (1993), Vol. 42/1, S. 1-4.

DREWS & WEYRICH 1997

Draws, P.; Weyrich, M.: A System for Digital Mock-up's and Virtual Prototype Design in Industry: 'The Virtual Workbench'. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, July 7-11, Guimaraes Portugal 1997, S. 1292-1296.

DÜRRSCHMIDT 1999

Dürschmidt, S.: Stückzahlflexibles Montagesystem für Schnappschalter. Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.): Stückzahlflexible Montagesysteme – Lösungen für eine bedarfsgerechte Montage. München: Herbert Utz Wissenschaft 1999, S1-23. (iwb-Seminarberichte 42)

EBBESMEYER U.A. 1995

Ebbesmeyer, P.; Grafe, M.; Utermöhle, M.: Déjà vu – Entwicklung eines virtuellen Industrieunternehmens. In: iX 8/1995, S. 94-105.

EBBESMEYER U.A. 1999

Ebbesmeyer, P.; Grafe, M.; Krumm, H.; Gehrman, P.: Einsatz von Virtual Reality – In der Planung und Projektierung komplexer Anlagen. ZWF Jahrg. 94 (1999) 9, S. 561-565.

EBLENKAMP 1996

Eblenkamp, M.: Planung von Produktionssystemen mit Evolutionsverfahren. Diss. Univ. Hannover. Fortschr.-Ber. VDI, R. 2, Nr. 396, Düsseldorf: VDI 1996.

ELMARAGHY & LAPERRIÈRE 1992

Elmaraghy, H.A.; Laperrière, L.: Modeling and Sequence Generation for Robotized Mechanical Assembly. In: Robotics and Autonomous Systems. North-Holland: Elsevier Science Publishers, 1992, S. 137-147.

ERICSSON U.A. 1994

Ericsson, A. u.a.: An Application with the MARK III Assembly System. In: IPA (Hrsg.): 25th International Symposium on Industrial Robots. MEP, 1994.

EVERSHEIM U.A. 1999

Eversheim, W.; Schulten, I.; Weber, P.; Sauer, O.: Effiziente Produktentwicklung durch Einsatz digitaler Prototypen. VDI-Z Special C-Techniken Oktober '99, S. 30-32.

FALTER 1993

Falter, H.: Zur Problematik der Verwendung von Displays zur dreidimensionalen Wahrnehmung. Z. f. Arbeitswiss. 47 (1993) 4.

FARRITOR U.A. 1996

Farritor, S.; Dubowsky, S.; Rutmann, N.; Cole, J.: A Systems-Level Modular Design Approach to Field Robotics. In: Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota, April 1996, S. 2890-2895.

FELDMANN 1997

Feldmann, C.: Eine Methode für die integrierte rechnerunterstützte Montageplanung. Berlin: 1997 (iwb-Forschungsberichte 104).

FELDMANN & COLOMBO 1999

Feldmann, K.; Colombo, A.: Simulationsbasierte Entwicklung und Implementierung von Steuerungssoftware für flexible Produktionssysteme. In: Feldmann, K.; Reinhart, G. (Hrsg.): Simulationsbasierte Planungssysteme für Organisation und Produktion – Modellaufbau, Simulationsexperimente, Einsatzbeispiele. Berlin: Springer, 1999, S. 161-194.

FENTON U.A. 1992

Fenton, R.G.; Poon, D.; Davies, S.P.: Robotic Workcell Cycle Time Optimization Using Computer Graphics. In: Annals of the CIRP Vol. 41/1/1992, S. 509-512.

FERNANDO U.A. 1994

Fernando, T.; Fa, M.; Dew, P.; Munlin, M.: Constraint-based 3D Manipulation Techniques Within Virtual Environments, Virtual Reality and Applications. ed. R. Eranshaw et al. Academic Press, London, 1994, S. 71.

FICHTMÜLLER 1996

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

FLAIG & THRAINSSON 1996

Flaig, T.; Thrainsson, M.T.: Virtual Prototyping – Neue Wege in Konzeption, Entwurf und Ausarbeitung. wt-Produktion und Management 86 (1996), S. 189-194.

FREUND U.A. 1998

Freund, E.; Rokossa, D.; Uthoff, J.: Prozessorientierte Roboterprogrammierung auf Knopfdruck. VDI-Z 140 (1998) Nr. 9, S. 62-65.

GAUSEMEIER U.A. 1998

Gausemeier, J.; Lemke, J.; Riepe, B.: Integriertes Prototyping zur durchgängigen Unterstützung der Produktentwicklung. Industrie Management 14 (1998) 5, S. 13-19.

GEYER 1997

Geyer, M.: Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung. Berlin: Springer 1997. (iwb-Forschungsberichte 112).

GLAVINA 1991

Glavina, B.: Planung kollisionsfreier Bewegungen für Manipulatoren durch Kombination von zielgerichteter Suche und zufallsgesteuerter Zwischenzielerzeugung. Dissertation TU München. Institut für Informatik 1991.

GOLDBERG 1989

Goldberg, D.: Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley, Reading, MA 1989.

GRABOWSKI U.A. 1997

Grabowski, H.; Rude, S.; Liu, C.; Hain, K.: Supporting the Search for Design Solutions Based on Information Recognition and Automated Classification. In: Report on the 2nd Workshop on Produkt Knowledge Sharing and Integration (ProKSI-97), April 17/18 1997, Sophia Antipolis, France.

GREGORY U.A. 1999

Gregory, A.; Lin, M.C.; Gottschalk, S.; Taylor, R.: A framework for fast and accurate collision detection for haptic interaction. In: IEEE Virtual Reality Conference, 1999, S. 38-45.

GROB & HAFFNER 1982

Grob, R.; Haffner, H.: Planungsleitlinien Arbeitsstrukturierung – Systematik zur Gestaltung von Arbeitssystemen. Berlin; München: Siemens AG 1982.

GROßMANN 1997

Großmann, K.: Virtuelle Realität und Engineering. wt Werkstattstechnik 87 (1997), S. 494.

GRUNDLER 2000

Grundler, E.: Produkt- und nutzungsflexible Montagesysteme. VDI-Z 142 (2000) 7/8, S. 34-35.

GUPTA U.A. 1997

Gupta, R.; Whitney, D.; Zeltzer, D.: Prototyping and Design for Assembly analysis using Multimodal virtual environments. In: Computer-Aided Design, Vol. 29, No. 8, 1997, S. 585-597.

GUPTA U.A. 1998

Gupta, S.; Paredis, C.; Sinha, R.; Wang, C.; Brown, P.: An Intelligent Environment for Simulating Mechanical Assembly Operations. ASME Design for Manufacturing Conference, September, 1998.

HÄFNER U.A. 1999

Häfner, U.; Doulis, M.; Simon, A.: Evaluation of Complex CAD Data in a Virtual Environment. In: 3. International Immersive Projection Technology Workshop, May 10th-11th, 1999 Stuttgart, Berlin: Springer 1999, S. 157-165.

HANK 1991

Hank, F.-S.: Philosophie der Montageautomatisierung. Flexible Automation (1991) 4, S. 26-29.

HEGER 1998

Heger, R.: Entwicklung eines Systems zur interaktiven Gestaltung und Auswertung von manuellen Montagetätigkeiten in der virtuellen Realität. Berlin: Springer 1998. (IPA-IAO Forschung und Praxis 257).

HEIMBERG & FREY 1997

Heimberg, R.; Frey, K.: CAPE – Computer Aided Production Engineering. Engineering Management 1997/98, S. 27-29.

HEIMBERG 2000

Heimberg, R.: E-Manufacturing als Chance für die Fertigung. ZWF Jahrg. 95 (2000) 6, S. 313-315.

HERKOMMER U.A. 1991

Herkommer, T.F.; Roth, J.-M.; Walter, S.E.: Off-line-Programmieren – Geschichte und aktueller Stand. *ZwF* 86 (1991) 8, S. 392-396.

HEß 1994

Heß, P.: Programmierverfahren für Industrieroboter. In: *wt-Produktion und Management* 84 (1994), S. 474-478.

HESSE 1998

Hesse, S.: Industrieroboterpraxis – Automatisierte Handhabung in der Fertigung. Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg 1998.

HESSELBACH & WESTERNHAGEN 1999

Hesselbach, J.; von Westernhagen, K.: Demontagesimulation erleichtert Produktrecycling. *VDI-Z* 11-12 (1999) 9, S. 45-48.

HESELER 1994

Hesseler, M.: Off-line-Programmierung von Industrierobotern. *wt-Produktion und Management* 84 (1994), S. 479-482.

HIDDE & ZÖLLNER 1992

Hidde, A.; Zöllner, B.: Computer-Aided Manual Workstation as an Extension of the Product-Independent Flexible Factory Automation Concept. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (1992) 7, London: Springer 1992, S. 135-143.

HIRZINGER U.A. 1999

Hirzinger, G.; Fischer, M.; Brunner, B.; Koeppe, R.; Otter, M.; Grebenstein, M.; Schaefer, I.: Advances in Robotics: The DLR Experience. In: *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 18, No. 11, November 1999, S. 1064-1087.

HÖRMANN & HÖRMANN 1990

Hörmann, A.; Hörmann, K.: Planung kollisionsfreier Greifoperationen: Analyse der Objektgeometrie. Robotersysteme 6 (1990) 1, S. 39-50.

HUCK 1990

Huck, M.: Produktorientierte Montageablauf- und Layoutplanung für die Roboterontage. Düsseldorf: VDI-Verlag 1990.

JAYARAM U.A. 1997

Jayaram, S.; Connacher, H.I.; Lyons, K.W.: Virtual assembly using virtual reality techniques. Computer-Aided Design, Vol. 29, No. 8, 1997, S. 575-584.

JUNG & WACHSMUTH 1998

Jung, B.; Wachsmuth, I.: Integration of Geometric and Conceptual Reasoning for Interacting with Virtual Environments. In: Proceedings of the AAAI 1998 Spring Symposium on Multimodal Reasoning, Stanford University, California, 1998, S. 22-27.

JUNG U.A. 2000

Jung, B.; Kopp, S.; Latoschik, M.E.; Sowa, T.; Wachsmuth, I.: Virtuelles Konstruieren mit Gestik und Sprache. In: Künstliche Intelligenz 2/2000, S. 5-11.

KAISER 1997

Kaiser, J.: Vernetztes gestalten von Produkt und Produktionsprozess mit Produktmodellen. Berlin: Springer 1997. (iwb-Forschungsberichte 111)

KALAWSKI 1994

Kalawski, R.S.: The science of virtual reality and virtual environments. Workingham (GB): Addison-Wessley 1994.

KETTNER U.A. 1984

Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H.-R.: Leitfaden der systematischen Fabrikplanung. München, Wien: Carl Hanser 1984.

KIJIMA & OJIKI 1997

Kijima, R.; Ojika, T.: Transition Between Virtual Environment and Workstation Environment with Projective Head Mounted Display. In: IEEE 1997 Virtual Reality Annual International Symposium, March 1-5, 1997, Albuquerque, New Mexico, S. 130-137.

KIM U.A. 1996

Kim, G.J.; Lee, S.; Bekey, A.: Interleaving Assembly Planning and Design. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 12 (2), April 1996, S. 246-251.

KIM U.A. 2000

Kim, J.; Kim, K.; Choi, K.; Lee, J.Y.: Solving 3D Geometric Constraints for Assembly Modelling. International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2000) 16, S. 843-849.

KÖGEL 1993

Montagelinie für Hochleistungsschalter. Produktion 33 (1993) 28, S. 7.

KOYTEK 1997

Koytek, T.: Virtuelles Prototyping mit Digital Mockup. Engineering Management 1997/98, S. 23-26.

KREITLER U.A. 1995

Kreitler, M.; Heim, J.; Smith, R.: Virtual Environments for Design and Analysis of Production Facilities. In: IFIP WG 5.7 Working Conference on Managing Concurrent Manufacturing to Improve Industrial Performance. Seattle, Washington, USA, September 11-15, 1995.

KUBA 1997

Kuba, R.: Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion. Berlin: Springer 1997. (iwb-Forschungsberichte 110)

KUGELMANN 1999

Kugelman, D.: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern. München: Herbert Utz Verlag 1999. (iwb-Forschungsberichte 127).

KUHLEN & PAULY 1994

Kuhlen, T.; Pauly, M.: Virtuelle Realität – Anwendungen in der Robotik. Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation, 17 (1) 1994, S. 49-50.

KÜHNLE & GOLLOS 1999

Kühnle, H.; Gollos, M.: Simultane Entwicklung und Optimierung von Produktionssystemen. ZWF Jahrg. 94 (1999) 10, S. 593-596.

KUMMETSTEINER 1994

Kummetsteiner, G.: 3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur Planung manueller Montagesysteme. Berlin: Springer 1994. (iwb Forschungsberichte 66)

LANGE 1991

Lange, W.: Kleine ergonomische Datensammlung. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.). Köln: Verlag TÜV Rheinland 1991.

LAY 1998

Lay, G.: Prozessinnovation als Schlüssel zu innovativen Produkten. Wt Werkstattstechnik 88 (1998) 7/8, S. 313-317.

LEHMANN 1997

Lehmann, H.: Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem. Berlin: Springer 1997. (iwb-Forschungsberichte 105).

LEES & WASHINGTON 1995

Lees, D.S.; Washinton, R.M.: Using Planning Algorithms and Graphical Programming to Facilitate End-User Programming of Service Robots. In: Proceedings IJCAI-95 Workshop on Developing AI Applications for Disabled People, Montréal, Canada, 1995.

LINDEMANN U.A. 1999

Lindemann, U.; Reinhart, G.; Bichlmaier, C.; Grunwald, S.: PMM – Process Module Methodology for Integrated Design and Assembly Planning. In: Proceedings of the 4th Design for Manufacturing Conference, Las Vegas, ASME International, 12.-16. September 1999.

LINDERMAIER 1998

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

LINCKE 1995

Lincke, W.: Simultaneous Engineering – Neue Wege zu überlegenen Produkten. München: Hanser 1995.

LINNER 1997

Linner, S.: Planungstool der Zukunft. In: Die neue Fabrik – Modellfabrik als Denkmodell. Landsberg/Lech: mi-Verlag 1997, S. 34-36.

LINNER & WUNSCH 1998

Linner, S.; Wunsch, A.: Durchgängige Verifikation von Produkt und Produktion mit prozesskettenorientierten Simulationswerkzeugen. In: Prozessketten für die virtuelle Produktentwicklung in verteilter Umgebung. Düsseldorf: VDI-Verlag 1998, S. 395-409. (VDI-Berichte 1435).

LOTTER U.A. 1998

Lotter, B.; Hartel, M.; Menges, R.: Manuelle Montage – wirtschaftlich gestalten. Neuzeitliche Analysen und Planungsmethoden zur Montagerationalisierung. Renningen-Malmsheim: expert verlag GmbH, 1998.

LOZANO-PÉREZ U.A. 1989

Lozano-Pérez, T.; Jones, J.L.; Mazer, E.; O'Donnel, P.A.: Task-Level Planning of Pick-and-Place Robot Motions. Computer 22 (1989) 3, S. 21-29.

LÜTH 1993

Lüth, T.C.: Automatisierte Layoutplanung von Roboter-Fertigungszellen. Dissertation Universität Karlsruhe 1993.

N.N. 1996

N.N.: Pro/ENGINEER Fundamentals Release 17.0. Parametric Technology Corporation, Waltham 1996.

MATTHES U.A. 1997

Matthes, J.; Bullinger, H.-J.; Warschat, J.: Featureorientierte Produktbeschreibung zur konstruktionsbegleitenden Montageplanung. In: Features verbessern die Produktentwicklung – Integration von Prozessketten, Berlin 1997. Düsseldorf: VDI-Verlag 197, S. 135-160. (VDI-Berichte 1322).

METROPOLIS U.A. 1953

Metropolis, N.; Rosenbluth, A.; Rosenbluth, M.; Teller, A.; Teller, E.: Equations of state calculation by fast computing machine. *Journal of Chemical Physics*, 21, 1953, S. 1087-1091.

MIKOSCH 1996

Mikosch, F.: Genaues Fertigen mit offline-programmierten Robotern. *VDI-Z* 138 (1996) 9, S. 46-49.

MILBERG U.A. 1997

Milberg, J.; Reinhart, G.; Cuiper, R.; Feldmann, C.; von Praun, S.: Integrierte Montageplanung im Verbund mit der Konstruktion und als Basis für die Produktion. In: Sonderpublikation: Sonderforschungsbereich 336 – Montageautomatisierung durch Integration von Konstruktion und Montageplanung (Berichtsband 1995 – 1997), München: TU München Eigenverlag 1997, S. 49-78.

MINE 1997

Mine, M.R.: ISAAC – a meta-CAD system for virtual environments. *Computer-Aided Design*, Vol. 29, No. 8, 1997, S. 547-553.

MTM E.V. 1990

Deutsche MTM-Vereinigung e.V. (Hrsg.): *MTM-Handbuch I* (Grundlehrgangsunterlage). 7. Aufl. Hamburg: Deutsche MTM-Vereinigung e.V. 1990.

NEGROPONTE 1970

Negroponte, N.: *The Architecture Machine*. Cambridge: MIT, 1970.

NEUGEBAUER 1992

Neugebauer, J.: Roboter an der Datenhand. *Wt Werkstattstechnik* 82 (1992) 3, S. 44-46.

NEUGEBAUER 2000

Neugebauer, J.: Erfolgreich Automatisieren: Trends und Defizite aus Anwender- und Herstellersicht. *Industrie Management* 16 (2000) 2, S. 9-12.

OWAS 1981

OWAS: OWAS basic course, Schulungsunterlagen. 4/1981.

PATRON & ROßGODERER 1999

Patron, C.; Roßgoderer, U.: Planung hybrider Arbeitsplätze mit virtueller Realität. BAIKA Kooperationsforum "Virtual Reality", München 1999.

RÄSS 1998

Räss, P.: Assembly planning and Virtual Reality (VR). In: *Proceedings of the First International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*. 15-17 April 1998 Lausanne, Switzerland, S. 363-372.

REINHART & FELDMANN 1997

Reinhart, G.; Feldmann, K.: *Simulation – Schlüsseltechnologie der Zukunft? Stand und Perspektiven*. München: Herbert Utz Verlag 1997.

REINHART U.A. 1998

Reinhart, G.; Cuiper, R.; Dürrschmidt, S.; Murr, O.: Kooperative Produkt- und Anlagenentwicklung. *Industrie Management* 14 (1998) 6, S. 57-61.

REINHART U.A. 1999A

Reinhart, G.; Cuiper, R.; Roßgoderer, U.: Concurrent Design of Assembly Systems Within a Shared Virtual Environment. In: Roller (Hrsg.): *Automotive Mechatronics and Design Engineering*. *Proceedings of 32nd ISATA*. June, 14-18, 1999. Wien, Österreich. Croydon: ISATA 1999, S. 173-180.

REINHART U.A. 1999B

Reinhart, G.; Grunwald, S.; Rick, F.: Virtuelle Produktion – Technologie für die Zukunft. VDI-Z Special C-Techniken Oktober '99, S. 26-29.

REINHART U.A. 2000

Reinhart, G.; Glander, M.; Grunwald, S.; Reicheneder, J.; Stetter, R.; Zanner, S.: Flexible Produktentwicklung und Montageplanung mit integrierten Prozessbausteinen. ZWF Jahrg. 95 (2000) 1-2, S. 19-22.

REINHART & GRUNWALD 2000

Einführung wandlungsfähiger Prozesse im Engineering. ZWF Jahrg. 95 (2000) 7-8, S. 351-355.

REINHART & KRESS 2000

Reinhart, G.; Kress, M.: Adaptive Produktmodelle im Erzeugnislebenslauf. ZWF Jahrg. 95 (2000) 9, S. 419-424.

REINHART & LOFERER 1996

Reinhart, G.; Loferer, M.: Zeitoptimierte Planung von Montageanlagen. Maschinenmarkt 102 (1996) 41, S. 48-49.

REINHART & ROßGODERER 1998

Reinhart, G.; Roßgoderer, U.: Spatial Planning of Manual and Automated Work Stations Utilising Mathematic Algorithms and Virtual Reality Devices. In: Kaj Juslin (Hrsg.): Proceedings of the Eurosim '98 Simulation Congress, Helsinki (1998), Vol. 3, S. 499-505.

REINHART & VON PRAUN 1998

Reinhart, G.; von Praun, S.: Digital Mock-Up Process Simulation – Next Generation Product Development. In: Proceedings of the 31st CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, 26.-27. Mai 1998. Berkeley, USA: 1998, S. 271-276.

REINISCH 1992

Reinisch, H.: Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung. Dissertation Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. München: Carl Hanser, 1992. (Fertigungstechnik – Erlangen 31).

RICHTER 1991

Richter, R.: Wissensbasierte CAD-Komponente zum Entwurf montagegerechter Produkte. Berlin u.a.: Springer Verlag. Zugl. Stuttgart, Universität, Diss., 1991.

RIX & SCHROEDER 2000

Rix, J.; Schroeder, K.: Virtual Reality als integraler Bestandteil des Virtual Engineering Konzeptes. Industrie Management 16 (2000) 1, S. 70-75.

ROßGODERER 1998

Roßgoderer, U.: Simultane Gestaltung von Produkten und Produktionsanlagen in Virtual Reality. BAIKA Workshop „Digitale Fahrzeugentwicklung“, München 1998.

ROßGODERER & KUGELMANN 1995

Roßgoderer, U.; Kugelman, D.: Automatical Layout Generation with 3D Simulation. In: Dal Cin, M. u.a. (Hrsg.): 7th European Simulation Symposium ESS '95, Erlangen. Ghent: The Society for Computer Simulation International 1995, S. 647-651.

ROßKOPF 2001

Roßkopf, M.: Turbulente Märkte fordern neue Produktionskonzepte. In: „Roboter in der Montage“ – Kongress auf der 20. Motek vom 25.-27. Sept. 2001.

RÖBLER & LIPPMANN 1997

Rößler, A.; Lippmann, R.: Virtuelle Menschmodelle in der Produktentwicklung. In: Spektrum der Wissenschaft, Ausgabe 9/1997.

SAYEGH 1997

Sayegh, M.: CORBA – Standard, Spezifikationen, Entwicklung. Köln: O'Reilly Verlag, 1997.

SCHÄFER 1992

Schäfer, G.: Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung. München: Carl Hanser 1992.

SCHULTETUS 1980

Schultetus, W.: Montagegestaltung. Köln: TÜV Rheinland 1980.

SEIDL 1994

Seidl, A.: Das Menschmodell RAMSIS. Analyse, Synthese und Simulation dreidimensionaler Körperhaltungen des Menschen. Dissertation TU München 1994.

SELIGER 1992

Seliger, G.: Welche Montagestrukturen bestimmen die Zukunft? In: Lotter, B. (Hrsg.): 10. Deutscher Montagekongress. Landsberg: mi-Verlag, 1992.

SELIGER & BARBEY 1992

Seliger, G.; Barbey, J.: Schrittweise Automatisierung durch hybride Montagesysteme. ZwF 87 (1992) 1, S. 8-12.

SOKIANOS U.A. 1998

Sokianos, N.; Drüke, H.; Seel, C.; Wieneke-Toutaoui, B.: Lexikon Produktionsmanagement. Landsberg/Lech: mi-Verlag 1998.

SPATH & BAUMEISTER 2000

Spath, D.; Baumeister, M.: Hybride Montagesysteme mit absatzsynchroner Materialbereitstellung. Industrie Management 16 (2000) 2, S. 35-38.

SPUR & KRAUSE 1997

Spur, G.; Krause, F.-L.: Das virtuelle Produkt – Management der CAD-Technik. München; Wien: Hanser 1997.

STACHE 1997

Stache, U.: Einsatz von Genetischen Algorithmen in der Produktionsplanung. Industrie Management 13 (1997) 4, S. 38-40.

STETTER 1993

Stetter, R.: Rechnergestützte Werkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrierobotereinsatzes. Dissertation TU München. München: Springer, 1993. (iwb-Forschungsberichte 62).

SUN 1998

Sun, H.: Development of a Robot Assembly Task Planning System. In: Preprints of the 1st IFAC-Workshop on Intelligent Assembly and Disassembly, Bled, Slowenien. International Federation of Automatic Control 1998, S. 31-36. (Vol. 1)

TRIKA U.A. 1997

Trika, S.N.; Banerjee, P.; Kashyap, R.L.: Virtual reality interfaces for feature-based computer-aided design systems. In: Computer-Aided Design, Vol. 29, No. 8, 1997, S. 565-574.

VISSER U.A. 1996

Visser, A.; Sahlberg, J.; Draschba, C.: Optimierung simulierter Produktionsprozesse durch Evolutionsstrategien. ZWF 91 (1996) 10, S. 482-484.

WATERS U.A. 1994

Waters, T.R. u.a.: Applications Manual for the revised NIOSH lifting equation. Cincinnati, OH, USA: CDC 1994 (NIOSH Publication 94-110).

WEEKS 1997

Weeks, J.: Entwicklung eines aufgabenorientierten Greif- und Bahnplanungssystems für die automatisierte Montage mit SCARA-Robotern. Dissertation RWTH-Aachen. Aachen: Shaker, 1997. (wzl / IPT – Berichte aus der Produktionstechnik 1/97).

WEINERT U.A. 1998

Weinert, K.; Albersmann, F.; Damm, P.; Zabel, A.: Virtual Reality in Design und Anwendung. VDI-Z 140 (1998) Nr. 5, S. 48-51.

WESTKÄMPER 2001

Westkämper, E.: Modulare Produkte – Modulare Montage. wt Werkstattstechnik 91 (2001) H. 8, S. 479-482.

WESTKÄMPER U.A. 2001

Westkämper, E.; Bullinger, H.-J.; Horvath, P.; Zahn, E.: Montageplanung – effizient und marktgerecht. Springer-Verlage Heidelberg 2001.

WEULE & SCHMÄLZLE 1999

Weule, H.; Schmälzle, A.: Aufarbeitung in der Montageanlagenindustrie – Erschließung vorhandener Wirtschaftspotentiale. ZWF Jahrg. 94 (1999) 6, S. 357-361.

WILEY & HAHN 1997

Wiley, D.J.; Hahn, J.K.: Interpolation Synthesis for Articulated Figure Motion. In: IEEE 1997 Virtual Reality Annual International Symposium, March 1-5, 1997, Albuquerque, New Mexico, S. 156-160.

WILLNOW U.A. 2000

Willnow, C.; Bernhardt, R.; Schreck, G.: Von Realistischer Roboter Simulation zu Virtuellen Steuerungen. ZWF Jahrg. 95 (2000) 3, S. 94-96.

WOENCKHAUS 1994

Woenckhaus, C.: Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-Layoutoptimierung. Berlin: Springer 1994. (iwb-Forschungsberichte 65).

WOLLSTADT 1999

Wollstadt, H.: Digital Mock-Up – Grundlage für die Produkt- und Prozessentwicklung. VDI-Z Special C-Techniken März '99, S. 50-52.

WÖRN U.A. 1998

Wörn, H.; Wurll, Ch.; Henrich, D.: Automatic off-line programming and motion planning for industrial robots. In: The 29th International Symposium on Robotics (ISR '98), Birmingham, United Kingdom, 27th-30th April 1998.

VDI-RICHTLINIE 2218 1999

VDI 2218 (Entwurf): Feature-Technologie. Düsseldorf: VDI-Verlag 1999.

VDI-RICHTLINIE 2221 1993

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

VDI-RICHTLINIE 2860 1990

VDI 2860: Montage- und Handhabungstechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1990.

VDI-RICHTLINIE 3633 1996

VDI 3633 (Entwurf einer technischen Regel): Simulation von Logistik, Materialfluß- und Produktionssystemen - Begriffsdefinitionen. Berlin: Beuth 1996.

ZHA 1999

Zha, X.F.; Lim, S.Y.E.; Fok, S.C.: Development of Expert System for Concurrent Product Design and Planning for Assembly. International Journal of Advanced Manufacturing Technology (1999) 15, S. 153-162.

ZHAO & MASOOD 1999

Zhao, J.; Masood, S.: An Intelligent Computer-Aided Assembly Process Planning System. International Journal of Advanced Manufacturing Technology (1999) 15, New York: Springer, S. 332-337.

iwb Forschungsberichte Band 1–121

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

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

- 1 *Streifinger, E.*
Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 *Fuchsberger, A.*
Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 *Maier, C.*
Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 *Summer, H.*
Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 *Simon, W.*
Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 *Büchs, S.*
Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, I.*
Schneiderodierte Oberflächen
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 *Pilland, U.*
Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 *Barthelmeß, P.*
Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 *Reithofer, N.*
Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 *Diess, H.*
Rechnerunterstützte Entwicklung flexibler automatisierter Montageprozesse
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 *Reinhart, G.*
Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 *Börstner, H.*
Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 *Groha, A.*
Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 *Riese, K.*
Klipsmontage mit Industrierobotern
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 *Lutz, P.*
Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 *Klippel, C.*
Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 *Rascher, R.*
Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 *Heusler, H.-J.*
Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 *Kirchknopf, P.*
Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 *Sauerer, Ch.*
Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 *Karstedt, K.*
Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 *Peiker, St.*
Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 *Schugmann, R.*
Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 *Wiba, P.*
Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52233-X
- 26 *Eibelshäuser, P.*
Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 *Prasch, J.*
Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

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

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

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

Seminarberichte iw b

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

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

- 1 **Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
- 2 **Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt**
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
- 3 **Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung**
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
- 4 **Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
- 5 **Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
- 6 **Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung**
86 Seiten · ISBN 3-931327-06-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**
80 Seiten · ISBN 3-931327-07-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel**
130 Seiten · ISBN 3-931327-08-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**
120 Seiten · ISBN 3-931327-09-5
- 10 **3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 **Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 **Autonome Produktionssysteme**
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 **Planung von Montageanlagen**
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 14 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 15 **Flexible Fluide Kleb/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung**
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 **Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 **Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 **Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 **Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
- 20 **Dezentrale Steuerung in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
- 21 **Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
- 22 **Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
- 24 **EDM Engineering Data Management**
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 25 **Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 **Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag**
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 **Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 **Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar**
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 30 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 31 **Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends**
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 32 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 33 **3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension**
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 **Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz**
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 **Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben**
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 **Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 **Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 **Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 **Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 **Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen**
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern**
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobauteilen**
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation**
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1
- 47 **Virtuelle Produktion - Prozeß- und Produktsimulation**
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 **Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen**
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8

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

Forschungsberichte iw b

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

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

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

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

- 153 Bernhard Eich
Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung
2001 · 132 Seiten · 48 Abb. · 6 Tabellen · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0028-7
- 154 Wolfgang Rudorfer
Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier
Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe
2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak
Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner
Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz
Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald
Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner
Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller
Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer
Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fährer
Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses
2002 · 176 Seiten · 69 Abb. · 13 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0124-0
- 164 Jürgen Höppner
Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler
2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte
Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik
2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin Weißenberger
Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess
2002 · 210 Seiten · 86 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0138-0
- 167 Dirk Jacob
Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik
2002 · 200 Seiten · 82 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0142-9
- 168 Ulrich Roßgoderer
System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen
2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel
Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen
2002 · 164 Seiten · 89 Abb. · 27 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0174-7

- 170 Paul Jens Peter Ross
Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung
2002 · 144 Seiten · 38 Abb. · 38 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0191-7
- 171 Stefan von Praun
Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess
2002 · 250 Seiten · 62 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0202-6
- 172 Florian von der Hagen
Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen
2002 · 220 Seiten · 104 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0208-5
- 173 Oliver Kramer
Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe
2002 · 212 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0211-5
- 174 Winfried Dohmen
Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme
2002 · 200 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0214-X
- 175 Oliver Anton
Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsender Montagesysteme
2002 · 158 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0215-8
- 176 Welf Broser
Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke
2002 · 224 Seiten · 122 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0217-4
- 177 Frank Breiting
Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen
2003 · 156 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0227-1
- 178 Johann von Pieverling
Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling
2003 · 163 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0230-1
- 179 Thomas Baudisch
Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine
2003 · 190 Seiten · 67 Abb. · 8 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0249-2
- 180 Heinrich Schieferstein
Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems
2003 · 132 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0251-4
- 181 Joachim Berlak
Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen
2003 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0258-1
- 182 Christian Meierlohr
Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung
2003 · 181 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0292-1
- 183 Volker Weber
Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken
2004 · 210 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0330-8
- 184 Thomas Bongardt
Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern
2004 · 170 Seiten · 40 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0332-4
- 185 Tim Angerer
Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten
2004 · 180 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0336-7
- 186 Alexander Krüger
Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme
2004 · 197 Seiten · 83 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0371-5