

Veit Rückel

*Rechnergestützte Ablaufplanung und
Bahngenerierung für kooperierende
Industrieroboter*

Veit Rückel

*Rechnergestützte Ablaufplanung und
Bahngenerierung für kooperierende
Industrieroboter*

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

FAPS



Meisenbach Verlag Bamberg

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

Tag der Einreichung: 28. Juni 2006
Tag der Promotion: 11. Oktober 2006
Dekan: Prof. Dr.-Ing. A. Leipertz
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, TU München

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

ISBN 978-3-87525-250-7
ISBN 3-87525-250-0
ISSN 1431-6226

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

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

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

© Meisenbach Verlag Bamberg 2006

Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf

Printed in Germany

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg. Zu diesem Abschluss hat eine Vielzahl an Personen beigetragen, denen ich an dieser Stelle ganz herzlich danken möchte.

An erster Stelle gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann für die engagierte Förderung meiner wissenschaftlichen Arbeit und das entgegengebrachte Vertrauen sowie für die Möglichkeit, meine eigenen und die gemeinsam entwickelten Ideen in die Tat umzusetzen. Ebenso danke ich den Herren Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, Ordinarius des iwv der TU München, für die Übernahme des Korreferates sowie seine konstruktiven Anregungen, Prof. Dr.-Ing. habil. G. Roppenecker als weiteres Mitglied des Prüfungskollegiums und Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. h.c. M. Geiger für die Übernahme des Vorsitzes.

Meine Arbeit entstand im Rahmen des Teilprojektes C4 innerhalb des Sonderforschungsbereiches 396, der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft wohlwollende Förderung erfahren hat. Ein besonderer Dank gebührt dem Sprecher Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. h.c. M. Geiger, der mit seinem unermüdlichen Engagement den Zusammenhalt und die interdisziplinäre Zusammenarbeit der Lehrstühle stets unterstützt und gefördert hat. Darüber hinaus gilt mein Dank allen Kolleginnen und Kollegen des SFB 396 sowie insbesondere Herrn Dr.-Ing. Dipl.-Inf. Hinnerk Hagenah für die hervorragende Kooperation. Ganz besonders hervorheben möchte ich die Herren Dr.-Ing. Alexander Koch und Dipl.-Ing. Michael Kerausch, denn sie sind von Kollegen zu wahren Freunden geworden!

Ein herzliches Dankeschön gilt allen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls FAPS für die angenehme Arbeitsatmosphäre und fachlichen Diskussionen. Besonders möchte ich meinen beiden Kolleginnen Frau Dr.-Ing. Gordana Michos und Frau Dipl.-Inf. Dorothee Buschhüter danken, die im Rahmen von zahlreichen Diskussionen und Gesprächen einen wesentlichen Beitrag zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein weiteres großes Dankeschön gebührt allen Studenten, die im Rahmen von Studien- und Diplomarbeiten oder als studentische Hilfskräfte mit ihrem unermüdlichen Engagement und eigenen Ideen den erfolgreichen Abschluss dieses Projektes ermöglicht haben. Besonders hervorheben möchte ich die Herren Peter Ginal, Christian Breindl, Alexander Kelz, Moritz Späth, Jochen Merhof, Christian Fischer, Michael Bär, Jürgen Ilg und Stefan Härter, die durch ihren persönlichen Einsatz einen wichtigen Teil zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben.

Danke schön – es hat mir sehr viel Spaß gemacht, mit Euch zu arbeiten!

Ein besonderer Dank aus tiefem Herzen gebührt an dieser Stelle meinen Freunden und ganz besonders meinen Eltern, die mir jede nur erdenkbare Unterstützung während meiner Zeit in Erlangen haben zuteil werden lassen. Ihnen widme ich diese Arbeit.

Erlangen, im November 2006

Veit Rückel

„Wer mit dem Herzen nicht dabei ist,
der hat keinen Beruf, sondern nur eine Beschäftigung“

Charles Tschopp
(schweizer Schriftsteller)

Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung für kooperierende Industrieroboter

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Aktuelle Entwicklungen in der Montagetechnik	6
2.1	Konventioneller Montageplanungsprozess	7
2.2	Einsatz von Industrierobotern in der Montagetechnik	10
2.3	Entwicklung von Mehrrobotersystemen	15
2.4	Zusammenfassung	19
3	Motivation und Zielsetzung: verkürzte und robuste Montageprozesse	21
3.1	Entwicklung eines durchgängigen Lösungsansatzes von der Konstruktion bis zur Montage	22
3.2	Vom 3D-CAD-Modell bis zur robotergestützten Montage	24
3.2.1	Zeitreduzierung mittels vollautomatischer Montageplanung	25
3.2.2	Verkürzung der Taktzeit durch den Einsatz kooperierender Industrieroboter	26
3.3	Darstellung der resultierenden verkürzten Montageprozesskette	28
3.4	Zusammenfassung	30
4	CAD-gestützte Montageplanung	33
4.1	Vollautomatische Montageplanung und rechnergestützte Generierung möglicher Montagesequenzen	36
4.2	3D-CAD-Modell als Datenbasis und Informationsgewinnung	43
4.3	Bauteilerkennung und Positionsbestimmung mit dem Laserscanner	45
4.3.1	Kamerasystem vs. Laserscanner	46
4.3.2	Integration des Laserscanners in die Montagezelle	47
4.3.3	Vollautomatische Positionsbestimmung der Bauteile auf dem Werkstückträger und innerhalb der Montagezelle	49

4.4	Ermittlung der Montagereihenfolge mit der kürzesten Taktzeit	51
4.5	Zusammenfassung	52
5	Autonome Bahnplanung für Industrieroboter	54
5.1	Autonome Bahnplanungsmechanismen	57
5.1.1	Landkartenmethode	58
5.1.2	Zellzerlegungsmethode	60
5.1.3	Potentialfeldmethode	63
5.2	Besonderheiten bei der Bewegungsplanung für Industrieroboter	67
5.2.1	Anwendung der autonomen Bahnplanungsmechanismen bei Industrierobotern.....	67
5.2.2	Kollisionsvermeidung durch Objektmodellierung mittels Hüllkörper.....	69
5.2.3	Nachbildung des mathematischen Modells mittels Denavit-Hartenberg-Parameter.....	71
5.3	Autonome Bahnplanung für kooperierende Industrieroboter	78
5.4	Zusammenfassung	80
6	Umsetzung des Montagekonzepts für kooperierende Knickarmroboter	83
6.1	Realisierte Montagezelle mit Knickarmrobotern der Firma Kuka	84
6.2	Steuerungskonzept für kooperierende Industrieroboter	85
6.2.1	Allgemeiner Steuerungsansatz mit einem Leitreechner.....	86
6.2.2	Kommunikation mit den Knickarmrobotern KR 6/2	87
6.2.3	Überführung des Steuerungskonzepts in ein dezentrales System	89
6.3	Autonome Bahnplanung auf Grundlage der Potentialfeldmethode für die Knickarmroboter KR 6/2.....	90
6.3.1	Mathematisches Modell mittels Denavit-Hartenberg-Parameter.....	91
6.3.2	Realisierung des Bewegungsplaners.....	92
6.3.3	Anbindung des Bahnplaners an die Kinematiksimulation Igrip	96
6.4	Entwicklung einer Ablaufsteuerung für die automatische Durchführung einer Montagesequenz	97
6.5	Verifikation der Leistungsfähigkeit anhand einer Beispielbaugruppe	99
6.6	Zusammenfassung	102

7 Vollautomatischer Montageprozess mit kooperierenden Linearrobotern.....	104
7.1 Realisierte Montagezelle mit Linearrobotern der Firma Reis	104
7.2 Kommunikation mit den Linearrobotern RL 16.....	107
7.3 Bewegungsplanung für kooperierende Linearroboter	109
7.3.1 Bahnplanung mit der näherungsweisen Zellzerlegung	109
7.3.2 Bahnplanung mittels Potentialfeldmethode	111
7.4 Realisierung von durchgängigen Montageprozessen mittels dynamischer Ablaufsteuerung.....	113
7.5 Darstellung der Versuchsergebnisse anhand diverser Montageszenarien	116
7.5.1 Baugruppe Pin-Hülse	116
7.5.2 Beispielbaugruppe Kfz-Türmodul	119
7.6 Zusammenfassung	122
8 Zusammenfassung und Ausblick	124
Summary	127
Literaturverzeichnis	129
Anhang	139
A Potentialfeldmethode in Vektorschreibweise	139
B Kommunikationsprotokoll der Robotersteuerungen	140

1 Einleitung

Die Situation von Produktionsunternehmen wird heute zunehmend vom härter werden den globalen Wettbewerb geprägt. Dies bedeutet, dass qualitativ hochwertige Artikel innerhalb kürzester Zeit mit geringen Kosten und zu niedrigen Preisen unter Berücksichtigung der Kundenanforderungen und deren Wünsche hergestellt werden müssen [141]. Demzufolge gilt es außerordentlich komplexe Zusammenhänge zu bewältigen, um auch zukünftig im internationalen Markt bestehen zu können, was nur mit einem ganzheitlichen Denkansatz bewerkstelligt werden kann [105]. Durch eine kontinuierliche Rationalisierung versuchen die Unternehmen, die Produktivität weiter zu steigern, doch gelingt dies in den hochtechnisierten Fertigungshallen oft nur durch einen immensen Aufwand – auch in finanzieller Hinsicht.

In den einzelnen Phasen des Produktentstehungsprozesses lassen sich immer noch erhebliche Verbesserungspotentiale erschließen. Insbesondere in denen der Fertigung und Montage vorgelagerten Bereichen, wie beispielsweise Konstruktion, Berechnung und Simulation, werden rechnergestützte Anwendungssysteme eingesetzt. Sie haben in den vergangenen Jahren zu einem deutlichen Anstieg der Entwicklungseffizienz geführt, doch sind damit keine weiteren signifikanten Produktivitätssprünge zu erzielen. In vielen Fällen fehlt es an einer durchgängigen Systemintegration, um Daten ablaufgesteuert und aufgabenübergreifend im gesamten Unternehmen nutzen zu können [133]. Die dahinter stehende Idee ist hier oftmals als Managementinformationssystem, Business Information System, Executive Information System, Entscheidungshilfesystem oder Decision Support System bekannt. All diese Systeme zeichnen sich durch die Sichtweise auf sämtliche während des Produktentstehungsprozesses anfallenden Daten und deren Nutzung für die anstehende Entscheidungsfindung aus.

Damit Unternehmen dem harten Konkurrenzkampf entgegentreten können, versuchen sie, Fehler bereits in einem sehr frühen Stadium der Produktentstehung zu erkennen und diese zu vermeiden. Untersuchungen im Rahmen von aufwändigen, aber sehr leistungsstarken Simulationsprogrammen erlauben es dem Ingenieur, bereits ohne überhaupt ein einziges reales Bauteil zu fertigen, Aussagen über Festigkeit, Fertigungsmöglichkeiten, Montierbarkeit, Taktzeit usw. des zu konstruierenden und herzustellen Produktes zu treffen (Frontloading). Mit Hilfe des durchgängigen Rechnereinsatzes sowie eines digitalen Produktdatenmodells besteht die Möglichkeit, den gesamten Produktentstehungszyklus von der ersten Produktidee bis zum verkaufsfertigen Bauteil und darüber hinaus virtuell am Computer nachzubilden (Digital Mock-up) [81]. Meist gestaltet sich jedoch die Umsetzung einer Durchgängigkeit in der Praxis oftmals als sehr schwierig, weswegen eine solche Vorgehensweise kaum in den Industriebetrieben wieder gefunden werden kann. Vielmehr werden dort an der einen oder anderen Stelle Spezialprogramme eingesetzt, die z. B. eine Finite Element Berechnung erlauben, Spritzguss- oder Gießprozesse veranschaulichen sowie eine Machbarkeitsanalyse bzw. Kinematikuntersuchung der Endmontage ermöglichen.

Bereits in den Achtziger Jahren wurde mit dem Ansatz des Computer Integrated Manufacturing (CIM) versucht, eine homogene Systemarchitektur zu kreieren, angefangen bei der Konstruktionszeichnung über Arbeitspläne, Fertigungsanweisungen, CNC-Programmerstellung und Montageanleitungen bis hin zu Demontagerichtlinien [27, 142]. Mit dieser Vorgehensweise erhoffte sich die Unternehmensleitung eine hohe Produktflexibilität bei gleichzeitiger Kostenreduktion. Daraus entstanden dann rechnergestützte Speziallösungen sowie kapitalintensive Fertigungslinien, doch rückblickend konnten sie die gestellten Anforderungen nicht in dem gewünschten Maße erfüllen. Dass diese Problemstellung allerdings immer noch aktuell und bislang nicht zufrieden stellend gelöst wurde, zeigen die Arbeiten und Forschungen rund um die „Digitale Fabrik“ [75, 155, 162]. Darunter ist ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen zu verstehen, die mit Hilfe eines durchgängigen Datenmanagements integriert werden. Das Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und Verbesserung sowie die Verkürzung aller wesentlichen Prozesse innerhalb der Fabrik in Verbindung mit dem Produkt [65, 125]. Die Aufgabe der Digitalen Fabrik besteht darin, die beiden Ebenen der Informationstechnologie und die der Prozesse miteinander zu verbinden [52].

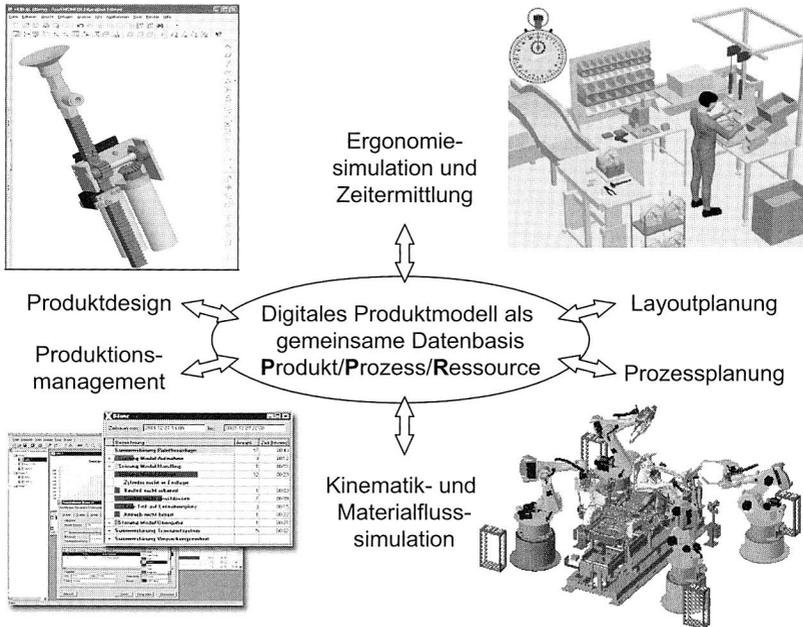


Bild 1: Verschiedene Möglichkeiten der Digitalen Fabrik unter Verwendung eines gemeinsamen Produktdatenmodells [Quelle: Delmia]

Wegen des verstärkten Rechneinsatzes hat sich der Produktentstehungsprozess im Laufe der Zeit von einer starren Verkettung der einzelnen Unternehmensbereiche hin zu einem zeitgleichen Ablauf (Simultaneous Engineering) gewandelt, wobei sich durch eine Überlappung von Arbeitsschritten die erforderliche time-to-market, d. h. die Zeitspanne von der ersten Produktidee bis zum verkaufsfertigen Produkt, bereits reduzieren ließ [24]. Im Zuge der weiteren Verkürzung der Produktentwicklungszeiten sowie eines lückenlosen Herstellungsnachweises gegenüber dem Kunden setzen Unternehmen verstärkt Produktdatenmanagement (PDM)-Systeme ein [77]. Durch die Einführung eines zentralen und vollständig digitalen Produktdatenmodells stehen jeder Abteilung jederzeit alle erforderlichen Informationen zur Verfügung. Im Hinblick auf die Digitale Fabrik genügt es nicht mehr, lediglich die reinen CAD-Daten handzuhaben, sondern vielmehr müssen auch Produkt- und Produktionsinformationen, wie z. B. Werkstoffkennwerte, Fertigungsverfahren, Montagereihenfolgen etc., verwaltet werden. Nur so können mit Hilfe von leistungsfähigen Simulationen realistische und gesicherte Aussagen in Bezug auf Belastungsgrenzen, erforderlichen Maschinenpark oder benötigte Taktzeit bei der Endmontage getroffen werden. Anhand der Fertigungssimulation lässt sich aufzeigen, dass die Prozessintegration immer mehr zur Notwendigkeit wird und eine Abgrenzung einzelner Bereiche, wie der Produktentwicklung, Fertigung oder Montage, nicht mehr möglich ist. Vielmehr müssen diese einzelnen Teilschritte funktionsübergreifend im Sinne des Produktes gesehen werden und nur dann kann eine robuste und verkürzte Prozesskette entstehen [140].

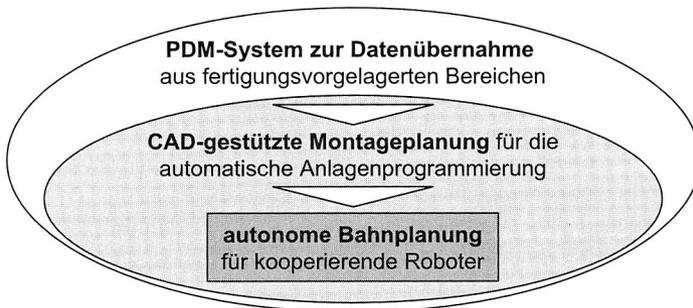


Bild 2: Ein durchgängiger Informationsfluss bildet die Grundlage für die Verkürzung von Montageprozessen

Ziel dieser Arbeit ist es, einen ganzheitlichen Ansatz im Bereich der Endmontage zu entwickeln, mit dessen Hilfe es möglich ist, die Flexibilität von Montageanlagen zu steigern und somit auch geringe Losgrößen wirtschaftlich zu fertigen. Der Schwerpunkt liegt hierbei in der Verkürzung des Montageprozesses, indem auf bereits im Rahmen des Produktentstehungsprozesses festgelegte Daten zurückgegriffen wird und daraus automatisch montagerelevante Informationen extrahiert werden [118]. Anschließend dienen diese Daten als Grundlage für die Endmontage des Produktes unter Verwen-

derung von kooperierenden Industrierobotern, die ebenfalls zur Reduzierung der Taktzeit beitragen [113]. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei in der selbstständigen Bewegungsplanung, um somit den Anwender bei der Programmierung derartiger Anlagen weitgehend zu entlasten. Das entwickelte Montagekonzept bewirkt eine nachhaltige zeitliche Verkürzung der Prozesskette „Montage“ bei gleichzeitiger Robustheitssteigerung.

Aufbau der Arbeit

Zunächst wird im folgenden Kapitel ein Überblick über den Stand der Technik sowie aktuelle Entwicklungen im Bereich der Montagetechnik gegeben. Insbesondere wird hierbei auf die verwendeten Elemente des im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Montagekonzepts eingegangen. Besonderes Augenmerk liegt zum einen in der Veränderung des Produktentstehungsprozesses sowie dessen Auswirkungen auf die Montageplanung und zum anderen auf dem Einsatzfeld von so genannten Multi-robotersystemen.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird das entwickelte Montagekonzept detailliert vorgestellt, das sich in die Schwerpunkte CAD-gestützte Montageplanung und autonome Bahnplanung für kooperierende Industrieroboter untergliedern lässt. Hierfür sind zunächst im dritten Kapitel der Lösungsansatz dargelegt und dessen Vorteile in Bezug auf eine Verkürzung der Montageprozesse eingehend erläutert. Dabei ist aufgezeigt, dass sich lediglich durch eine ganzheitliche Betrachtung der Montageplanung sowie eines durchgängigen Datenaustausches eine signifikante und nachhaltige Reduktion der Montagezeit erzielen lässt.

Im Rahmen des vierten Kapitels ist aufgezeigt, wie direkt aus einem 3D-CAD-Modell sämtliche montagerelevanten Informationen automatisch extrahiert werden können. Mit dieser Vorgehensweise lassen sich Fehler vollständig vermeiden, da der Anwender die Daten nicht mehr manuell eingeben muss, was eine signifikante Robustheitssteigerung und eine gleichzeitige Verkürzung der Prozesskette zur Folge hat. Des Weiteren ist durch die Integration einer Bauteilidentifikation und deren räumlicher Lageerkennung eine Erweiterung der Flexibilität der eingesetzten Montageanlage erreichbar.

Kooperierende Industrieroboter – darunter sind Handhabungsgeräte zu verstehen, die einen gemeinsamen Arbeitsraum besitzen und in der Lage sind, eine ihnen gestellte Aufgabe gemeinsam zu erfüllen – sind wegen der permanenten Gefahr einer Kollision sehr schwierig zu programmieren. Aus diesem Grund werden im fünften Kapitel verschiedene grundlegende Lösungen der autonomen Bahnplanung näher erläutert und hinsichtlich deren Anwendbarkeit bei Industrierobotern diskutiert. Um eine Verkürzung des gesamten Montageprozesses zu erreichen, gilt es, den Anwender bei seinen manuellen Tätigkeiten zu entlasten. Mit Hilfe der autonomen Bewegungsplanung ist es ausreichend, lediglich noch Start- und Endpunkt zu definieren, wohingegen die dazwischen liegende kollisionsfreie Trajektorie automatisch zur Laufzeit geplant wird. Dadurch lassen sich sehr flexible Montagezellen mit kooperierenden Handhabungsgeräten einfach und schnell in Betrieb nehmen.

Im sechsten und siebten Kapitel wird das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Montagekonzept auf die am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen-Nürnberg aufgebauten Montagezellen mit kooperierenden Industrierobotern angewendet und anhand von Beispielprodukten dessen Leistungsfähigkeit verifiziert. Dabei kommen jeweils zwei unterschiedliche kinematische Bauformen von Handhabungsgeräten zum Einsatz, woraus sich auch spezifische Unterschiede hinsichtlich der Bewegungsplanung ergeben. Darüber hinaus wird eine Ablaufsteuerung vorgestellt, die eine mit Hilfe der CAD-gestützten Montageplanung generierte gültige Montagesequenz selbstständig auf die beiden Roboter aufteilt, sodass nochmals eine Verkürzung der Taktzeit erzielt wird, da hierfür keine manuellen Eingriffe von Seiten des Anwenders erforderlich sind. Möglich ist dies nur durch die dynamische Aufgabenzuweisung und Trajektorienberechnung zur Laufzeit des Systems.

Abschließend werden im Rahmen des achten Kapitels die gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse zusammengefasst und diskutiert. Zusätzlich wird ein Ausblick hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten des hier entwickelten Lösungskonzepts der CAD-gestützten Montageplanung und kooperierender Roboter im industriellen Umfeld gegeben.

2 Aktuelle Entwicklungen in der Montagetechnik

Auf Grund der Globalisierung müssen sich Unternehmen zunehmend mehr Wettbewerbern stellen und in dem damit verbundenen Konkurrenzkampf behaupten. Darüber hinaus ist eine Veränderung hinsichtlich des Kaufverhaltens der Kunden aufgetreten, da diese verstärkt nach einem individuell auf sie zugeschnittenen Produkt verlangen [71, 107, 165]. Diese Entwicklung ist insbesondere im Bereich des Automobilbaus zu erkennen, denn dort werden die Kundenwünsche mittels eines breiten Produktspektrums sowie hoher Variantenvielfalt befriedigt. Dies bedingt allerdings von Seiten der Automatisierungstechnik ein hohes Maß an Flexibilität der Montageanlagen. Erschwerend kommt noch hinzu, dass sich die Produktlebensdauer verkürzt hat [55], was dazu führt, dass die Fertigungseinrichtungen im gleichen Rhythmus umgerüstet und -gebaut werden müssen. Besonders stark ist diese Entwicklung wiederum im Automobilbereich ausgeprägt, denn dort wurde der Entwicklungsprozess von 60 auf 30, in Sonderfällen sogar auf 25 Monate reduziert, was eine Halbierung der Zeit bei steigender Komplexität in Bezug auf Mechanik, Elektronik und Mechatronik bedeutet [72, 92]. Eine derartige Verkürzung des gesamten Produktentstehungsprozesses (PEP) kann lediglich mit Hilfe einer durchgängigen Rechnerunterstützung bewerkstelligt werden. Die Bestrebungen fokussieren sich auf die so genannte Digitale Fabrik, in der mittels verschiedener Simulationen der vollständige PEP von der Konstruktion über die Berechnung und Fertigung bis hin zur Montage realitätsnah am Computer nachgebildet wird, um Fehler und Schwachstellen bereits in einem sehr frühen Entwicklungsstadium zu erkennen und zu beseitigen, sodass dadurch Kosten für deren Behebung reduziert werden [3, 144, 152, 164].

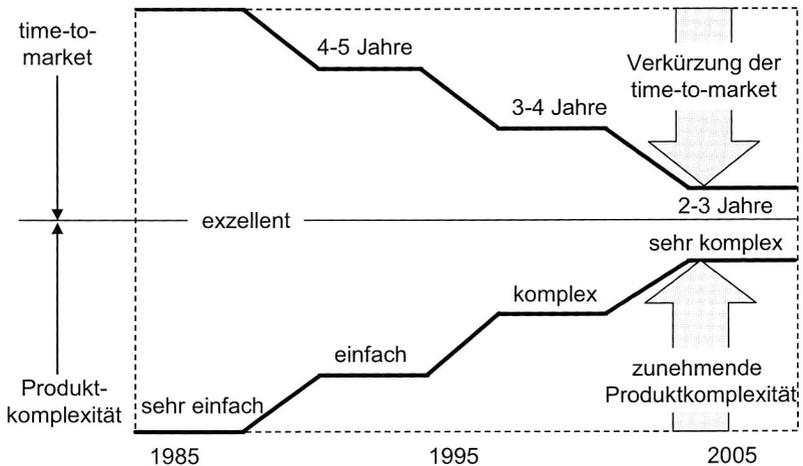


Bild 3: Verkürzung der time-to-market bei steigender Produktkomplexität ist nur mittels durchgängiger Rechnerunterstützung möglich (nach [66, 137])

Mit Hilfe der Digitalen Fabrik wird versucht, die Planungen – ganz gleich ob strategische oder operative Ziele verfolgt werden – zu einem möglichst frühen Zeitpunkt abzusichern, um nicht unnötig Investitionen zu tätigen, sodass das Unternehmen erfolgreich am Markt positioniert werden kann [32]. Anhand von Untersuchungen ließ sich beispielsweise beweisen, dass eine mehrmonatige verspätete Markteinführung eine Gewinnreduzierung von bis zu 30% zur Folge hat [104]. Aus diesem Grund sind die Bestrebungen eines Unternehmens daraufhin ausgerichtet, die Zeitspanne von der neuen Produktidee bis zum ersten verkaufsfähigen Artikel unter allen Umständen einzuhalten. Zeittreiber innerhalb der Phase der Produktentstehung lassen sich auf Defizite in der Kommunikation, der funktions-, produkt- und unternehmensübergreifenden Integration, dem Fehlen eines geeigneten Projektmanagements sowie der unzureichenden informationstechnischen (IT)-Verknüpfung der verschiedenen Unternehmensabteilungen zurückführen. Eine Beschleunigung des Produktentstehungsprozesses wird insbesondere durch die Reduzierung von ineffizienten und nicht-effektiven Arbeitsschritten erreicht [110].

2.1 Konventioneller Montageplanungsprozess

Innerhalb der Produktentstehung ist der Bereich Montage als finaler Prozessschritt vor der Produktfertigstellung zeitlich sehr spät angesiedelt (vgl. Bild 4) [4]. Die dazugehörige Planungsphase kann erst nach Beendigung und Freigabe der 3D-CAD-Modelle bzw. Bauteile beginnen. Ziel einer systematischen Montageplanung ist die Unterstützung des Anwenders in den einzelnen Planungsphasen von der Analyse, über den Entwurf, die Gestaltung bis hin zur Einführung von Montagesystemen. Hierbei werden meist informationstechnische Werkzeuge verwendet, die eine Erhöhung der Planungssicherheit und Produktivität bewirken.

Allerdings sind die sich dabei ergebenden Teilschritte durch eine Vielzahl an manuellen Tätigkeiten gekennzeichnet und demzufolge fehleranfällig und zeitintensiv. Die Aufgabe ist die Generierung von montagerelevantem Wissen, d. h. das Produkt muss mittels Stücklisten sowie geometrischen und technologischen Eigenschaften der zu montierenden Bauteile und -gruppen beschrieben werden. Darüber hinaus gilt es den zeitlichen Ablauf zu definieren, der technologisch durch die verschiedenen Montageverrichtungen und ihrer Abhängigkeit bestimmt ist. Die Erstellung der so genannten Montagevorrangrafen erfolgt jedoch meist von Hand und stellt einen sehr zeitintensiven Teilarbeitschritt dar, insbesondere dann, wenn die Anzahl der Einzelteile zunimmt.

Anschließend besteht für den Planer die Möglichkeit, unter Verwendung einer Simulationsumgebung den Montageprozess am Computer umzusetzen. Hierzu entwirft und modelliert er das Fertigungssystem inklusive der Handhabungsgeräte und Bewegungskinematiken, die im Anschluss programmiert werden können. Bei dieser Tätigkeit muss allerdings wiederum der Anwender den zeitlichen Ablauf von Hand programmieren. Ausgangspunkt bildet dabei das 3D-CAD-Modell des zu fertigenden Produktes oder ein eventuell bereits vorliegender Prototyp.

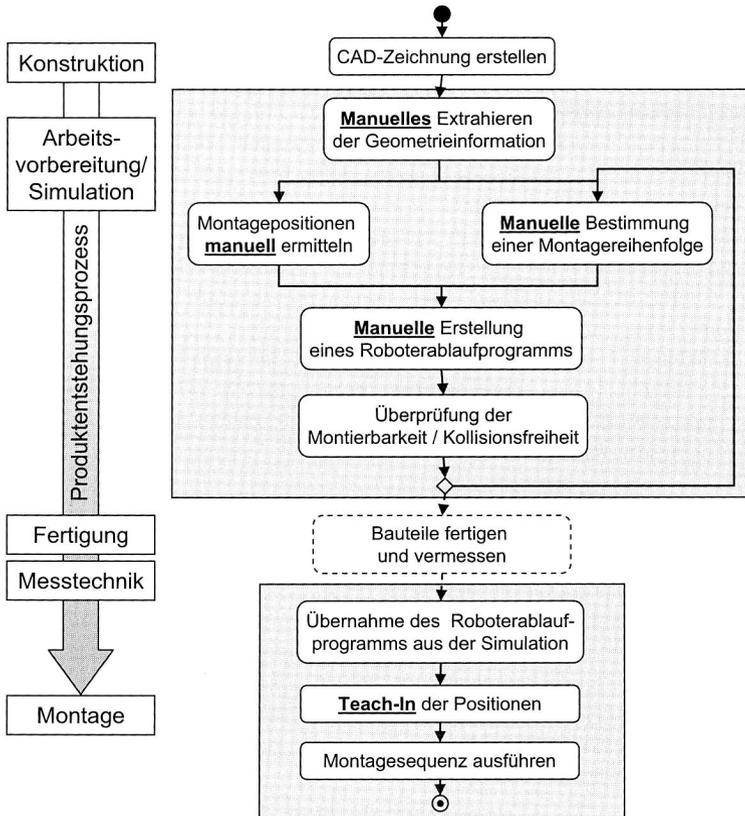


Bild 4: Die Planung von Montageprozessen ist durch eine Vielzahl an manuellen Tätigkeiten gekennzeichnet und daher sehr zeitintensiv und fehleranfällig

Bei dieser Vorgehensweise spielt die Erfahrung des Anwenders eine wesentliche Rolle, denn das Zusammenspiel der einzelnen Maschinen und demzufolge deren Einzelbewegungen müssen manuell definiert werden. Zwar unterstützen einige Werkzeuge die Planung, wie beispielsweise Überwachung der Erreichbarkeit von Punkten mit dem Handhabungsgerät oder verursachte Kollisionen während der Bewegungsausführung, doch letztendlich hängt die Qualität des Endergebnisses stark vom Menschen ab.

Produktdatenmanagement-Systeme

Die Generierung von montagerelevantem Wissen ist eine der Hauptaufgaben der Arbeitsvorbereitung und dies bedeutet Informationen, Werte und Parameter zu sammeln und für die anschließenden Prozessschritte aufzubereiten und zu verdichten. Dazu ist es erforderlich, die Daten erneut von Hand einzugeben, was jedoch sehr zeit-

aufwändig und gleichzeitig fehleranfällig und demzufolge der Forderung nach einem verkürzten Montageprozess nicht gerade zuträglich ist. Um dem entgegen zu wirken, werden verstärkt so genannte Produktdatenmanagement (PDM)-Systeme eingesetzt, deren Aufgabe es ist, jegliche Art von Daten zu klassifizieren, archivieren und recherchieren [129]. Insbesondere das strukturierte Ablegen sowie Wiederfinden von Daten ist für Unternehmen von großer Bedeutung, da Untersuchungen bestätigen konnten, dass etwa ein Viertel der Tätigkeiten eines Ingenieurs der Informationsbeschaffung zugeordnet werden und des Weiteren heutzutage überhaupt nur 5 % aller vorhandenen Informationen als Wissen verfügbar ist [36, 73, 140].

PDM-Systeme erfüllen aber nicht mehr nur die Speicherung von Daten in Sinne eines Dokumentenverwaltungssystems, sondern sind vielmehr als Wissensbasis (Knowledge Base) zu verstehen und anzuwenden [101, 140]. Anders gesagt stellen sie die informationstechnische Verbindung zwischen allen Bereichen eines Unternehmens dar und können als datentechnische Grundlage eines vollständigen Product Lifecycle Managements (PLM) angesehen werden (vgl. Bild 5) [2, 22, 124, 155].

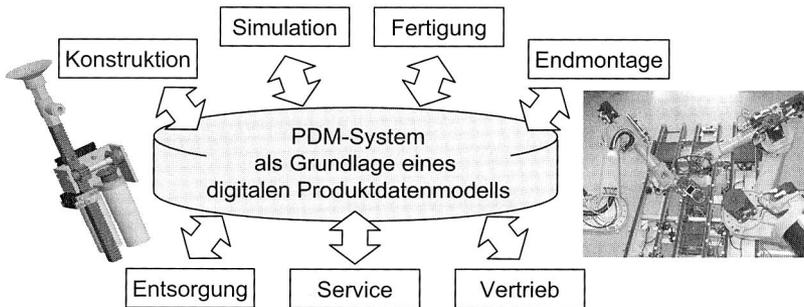
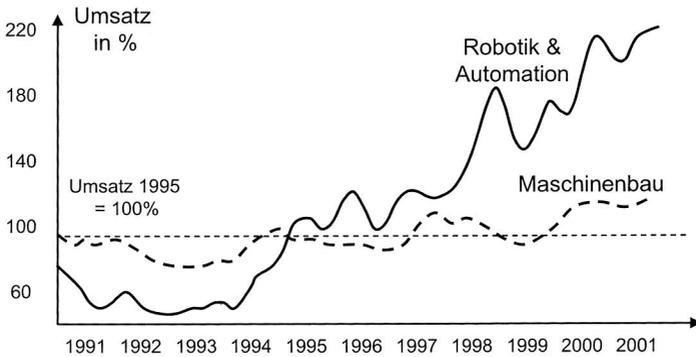


Bild 5: Das Produktdatenmanagement stellt die Grundlage für ein digitales Produktdatenmodell dar und kann demzufolge als datentechnische Basis von Produkt Lifecycle Management angesehen werden (nach [133])

Durch die Verwendung eines PDM-Systems ist demzufolge die Möglichkeit gegeben, Daten und Informationen, wie beispielsweise das CAD-Modell, geometrische Kenngrößen, prozessabhängige Parameter, Dokumente etc., zu hinterlegen, sodass alle am Produktentstehungsprozess beteiligten Bereiche darauf zugreifen und diese weiterverwenden können, wodurch sich Eingabefehler vermeiden lassen [127]. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Wartezeiten bzw. die Suche nach den richtigen und aktuellen Informationen zu reduzieren, was wiederum zu einer beschleunigten Prozessabfolge führt. Ein PDM-System stellt für das Unternehmen somit einen strategischen Ansatz dar, um die firmeninternen Abläufe zu strukturieren und rechnergestützt ablaufen zu lassen. Der damit verbundene Vorteil wird insbesondere von Großunternehmen erkannt, aber auch klein- und mittelständische Unternehmen nutzen zunehmend das Potential derartiger Systemlösungen [2].

2.2 Einsatz von Industrierobotern in der Montagetechnik

Die Unternehmen unterliegen einem stetig wachsenden Kostendruck und versuchen, durch eine zunehmende Automatisierung von Fertigungsprozessen dieser Entwicklung entgegen zu wirken [10]. Hierzu wurden häufig kapitalintensive Spezialmaschinen eingesetzt, doch oftmals konnten sie die gestellten Anforderungen nicht erfüllen [90]. Hinzu kommt noch die Tatsache, dass die Laufzeit eines Produkts immer kürzer wird und infolgedessen die gefertigte Losgröße sinkt. Dies bedingt einen häufigeren Umbau der Montageanlagen sowie erhöhte Investitionskosten, wenn dabei die Flexibilität fehlt oder nur in unzureichendem Maße vorhanden ist. Als mögliche Lösung haben sich universell einsetzbare Industrieroboter erwiesen, die sich auf Grund ihrer freien Programmierbarkeit an die unterschiedlichsten Aufgaben anpassen und somit wieder verwenden lassen [99]. Diese Entwicklung zeichnet sich auch durch die steigenden Verkaufszahlen und den positiven Umsatz in der Branche „Robotik & Automation“ (R&A) ab [100].



Neuinstallationen von Industrierobotern in Deutschland

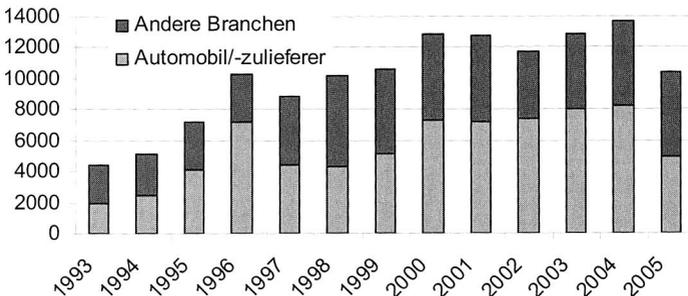


Bild 6: Die steigende Zahl an neu installierten Industrierobotern in Deutschland spiegelt sich laut VDMA in einer ebenso positiven Entwicklung der Branche „Robotik & Automation“ wieder [100]

Die von Seiten der Roboterhersteller forcierte stetige Weiterentwicklung hat dazu geführt, dass sich der Industrieroboter vom einfachen Pick&Place-Gerät zu einer hochflexiblen Maschine für die unterschiedlichsten Handhabungs- und Fertigungsaufgaben gewandelt hat. Die Anwendungsgebiete heutiger Systeme reichen vom Schweißen über Pick&Place und Maschinenbeschickung bis hin zu Lackierarbeiten. Aber auch in Einsatzfällen, wie beispielsweise zum Entgraten, Polieren, Wasserstrahlschneiden oder Laserstrahlschweißen, finden diese Geräte Anwendung.

Gegenstand von heutigen Forschungsprojekten ist die Vereinigung der spezifischen Vorteile von Mensch und Roboter in gemeinsamen Montagezellen. Die Zielsetzung besteht darin, dass die Maschine dem Werker bei seiner Tätigkeit assistiert und ihn unterstützt, indem z. B. schwere Lasten getragen oder einfache Pick&Place-Aufgaben übernommen werden. Die Programmierung erfolgt hierbei durch das Vormachen durch den Menschen sowie das Aufzeichnen und Interpretieren der Gesten und Handlungen. Erreicht wird dies durch die Kraft-Momenten-Rückkopplung, sodass der Arm auf Berührungen reagiert und der Bewegungsablauf für das Handhabungsgerät demzufolge intuitiv programmiert werden kann, was beispielsweise Gegenstand der Arbeiten des Projektes *Papas* ist [96, 136]. Auf diese Weise lassen sich auch mobile Systeme entwickeln, die den Menschen in der Produktion unterstützen, wie beispielsweise in den Forschungsprojekten *Rob@work* oder *Assistor* gezeigt wird [46, 47]. Dabei gilt es jedoch Vorkehrungen zu treffen, um das Verletzungsrisiko für den Werker zu minimieren. Dies bedeutet, dass externe Sensorik, wie z. B. Kamerasysteme, Lichtvorhänge, Trittmatten etc. erforderlich sind, um die Position des Menschen in Bezug auf das Handhabungsgerät zu bestimmen [134, 155]. Die andere Möglichkeit besteht darin, dem Roboter durch Sensoren ein „Gefühl“ für seine Umwelt zu vermitteln. Das Prinzip beruht dabei auf der Veränderung der Kapazität bei Annäherung eines wasserhaltigen Objektes, wie beispielsweise eines Menschen, in dessen Abhängigkeit die Geschwindigkeit des Effektors verändert wird [94].

Kinematische Bauformen von Industrierobotern

Gemäß der VDI-Richtlinie 2860 stellt ein Roboter ein Handhabungsgerät dar, „das aus mindestens zwei Achsen besteht, die hinsichtlich ihrer Bewegungsfreiheit frei programmierbar oder sensorgeführt sind“ [99]. Die wichtigsten Vertreter sind Scara- (Selective Compliance Assembly Robot Arm), Linear- sowie Knickarmroboter, die je nach Aufgabe hinsichtlich Kinematik, Reichweite und Traglast in entsprechender Ausführung zur Verfügung stehen [51, 163].

Die Unterschiede sind im Aufbau der kinematischen Kette zu sehen, die durch die Anzahl der zur Verfügung stehenden Achsen auch die Dimension der Freiheitsgrade im Raum vorgibt. Scararoboter verfügen in der Grundversion über drei rotatorische und eine translatorische Achse. Daraus resultiert ein zylindrischer Arbeitsraum, in dem sehr schnell, aber lediglich in negative z-Richtung positioniert werden kann. Das Gleiche gilt für die Linearroboter, die allerdings drei translatorische Haupt- sowie meist eine

rotatorische Nebenachse besitzen. Hieraus ergibt sich ein rechteckiger Arbeitsraum, in dem eine Fügebewegung wiederum nur in negative z-Richtung möglich ist. Eine Bauteilpositionierung auf schrägen Flächen ist demzufolge in der Basisversion nicht durchführbar. Erst die Integration von weiteren Dreh- und Schwenkeinheiten in Form eines Greifers würde eine derartige Montageoperation erlauben, was gleichzeitig allerdings zu einer Reduzierung der Traglast und zu größeren beschleunigten Massen führen würde.

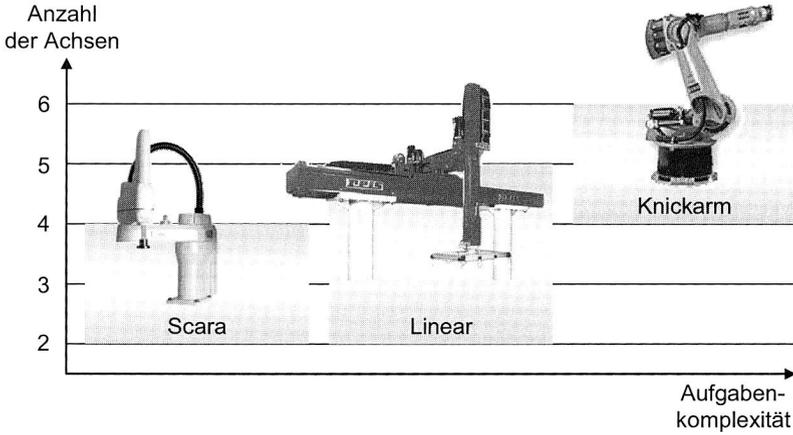


Bild 7: Kinematische Bauformen von Industrierobotern im Vergleich von Arbeitsraum und Aufgabenkomplexität (nach [59])

Im Gegensatz dazu zeichnet sich der Knickarmroboter durch sechs rotatorische Achsen aus, besitzt demnach einen torusförmigen Arbeitsraum und kann jeden Raumpunkt in verschiedenen Orientierungen anfahren (siehe Bild 8). Er bietet somit dem Anwender die höchste Flexibilität, ist aber in Bezug auf die Verfahrensgeschwindigkeit der Langsamste, da meist alle Achsen gleichzeitig interpoliert werden müssen.

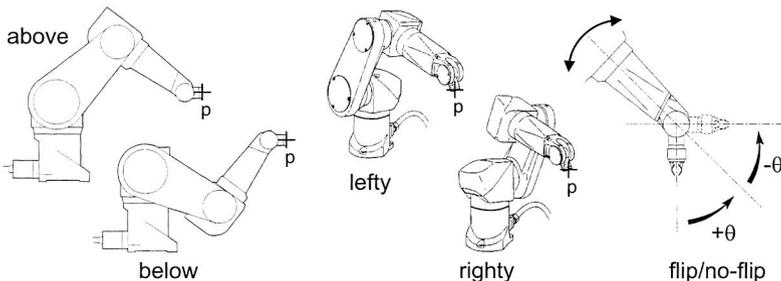


Bild 8: Ein Knickarmroboter ist in der Lage, einen Punkt p in unterschiedlichen Armkonfigurationen anzufahren (above/below, left/right, flip/no-flip) [98]

Möglichkeiten der Roboterprogrammierung

Grundsätzlich stehen für die Programmierung eines Industrieroboters drei verschiedene Methoden zur Verfügung: online, offline und sensorbasiert. Dabei ist das erste Verfahren das am meisten angewandte, da der Roboter vom Anwender über ein Handbediengerät gesteuert und verfahren wird. Gleichzeitig ist es aber auch das zeitintensivste, weil das reale System benutzt wird und demzufolge währenddessen keine Produktion möglich ist. Im Gegensatz hierzu bietet die Offlineprogrammierung die Möglichkeit, mit Hilfe einer 3D-Simulation am Computer den gewünschten Bewegungsablauf zu definieren und das erstellte Programm anschließend auf die jeweilige Steuerung zu laden sowie dort auszuführen. Infolgedessen kann der Anlagenstillstand erheblich reduziert werden, was zu einem verkürzten Gesamtprozess beiträgt.

Allerdings gilt es zu berücksichtigen, dass für die Bedienung der Kinematiksimulation meist ein Experte erforderlich ist, der auch auf dem Gebiet der Programmierung von realen Industrierobotern bewandert sein muss. Trotzdem hat der Anwender weiterhin jeden Bewegungsablauf sowie sämtliche Stützpunkte von Hand festzulegen und einen zeitlichen Ablauf zu definieren. Unterstützend kann hier die sensorgestützte Programmiermethode in Bezug auf die Lagepositionierung des Roboters gesehen werden. Bei ihr wird vom Anwender zwar eine Bewegungsbahn vorgegeben, wie beispielsweise die Geometrie einer Schweißnaht. Da allerdings ein Sensor, der die Schweißfuge detektiert, vorausieht und demzufolge vorhandene Form- und Lageabweichungen erfasst, können diese in Form von Korrekturvektoren der eigentlichen Bewegung überlagert werden, sodass eine dynamische Positionskorrektur erfolgt. Dadurch wird selbst bei Geometrieabweichungen ein gleich bleibendes Qualitätsergebnis erzielt.

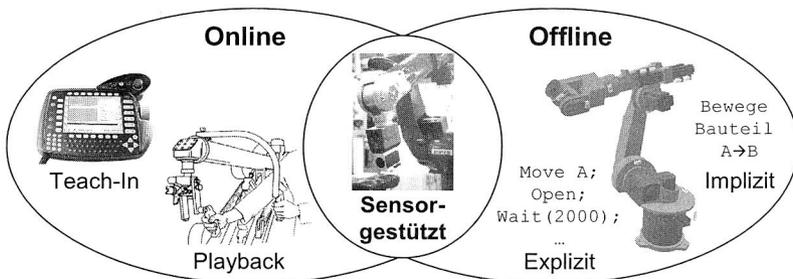


Bild 9: Verschiedene Möglichkeiten der Roboterprogrammierung, die sich in drei Hauptverfahren gliedern lassen: online, offline und sensorgestützt (nach [48])

Im Hinblick auf die Programmierung von Montageabläufen spielt die sensorgestützte Programmierung eine eher untergeordnete Rolle, da hierbei lediglich die Fügebewegung, beispielsweise von einem 6D-Kraft-Momentensensor ermittelten Korrekturvektor, noch ausgeglichen werden kann [1, 38, 149]. Im Bereich der Anlagenprogrammierung ist die Online-Programmierung viel weiter verbreitet, die zunehmend durch das

Offline-Verfahren ergänzt oder sogar substituiert wird. Dazu ist eine Modellierung der zukünftigen Montageanlage einschließlich aller Handhabungsgeräte im Rahmen einer Kinematiksimulation erforderlich. Im Anschluss daran wird vom Anwender der gewünschte Bewegungsablauf definiert, indem er Stützpunkte im Raum vorgibt, die es in einer vorgegebenen Reihenfolge abzufahren gilt. Darüber hinaus legt er an bestimmten Positionen zusätzliche Prozesse fest, wie z. B. Bauteil greifen oder loslassen, Schweißstrom an oder aus etc.. Dadurch kann der vollständige Montageprozess bereits vorab virtuell simuliert und der Ablauf realitätsgetreu visualisiert werden.

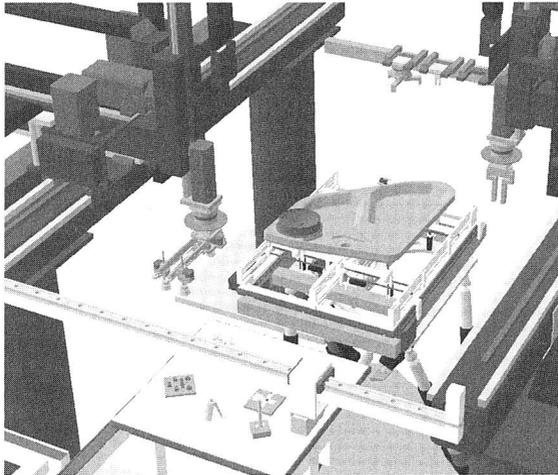


Bild 10: Leistungsfähige Kinematiksimulationen erlauben realitätsgetreue Abbildungen der Montageanlagen mit z. B. kooperierenden Robotern

Eine Kinematiksimulation dient allerdings nicht nur der Prozessvisualisierung, sondern der Benutzer erhält dadurch erst die Möglichkeit, so genannte Machbarkeitsstudien durchzuführen. Dabei wird geprüft, ob die gewünschte zeitliche Reihenfolge der Montageoperationen überhaupt möglich ist oder alle anzufahrenden Positionen vom Roboter in der gewünschten Armkonfiguration erreicht werden können. Darüber hinaus lassen sich auch Aussagen über die zu erwartende Taktzeit treffen. Demzufolge besteht die Möglichkeit, bereits in einem sehr frühen Stadium des Produktentstehungsprozesses Aussagen über die Machbarkeit und Leistungsfähigkeit der angestrebten Montage zu erhalten. Dabei muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass sämtliche Tätigkeiten, insbesondere die Bestimmung der benötigten Raumpositionen sowie die Generierung einer kollisionsfreien Bewegungsbahn, vom Anwender durchgeführt werden müssen. Deshalb hängt die Programmierung, wie auch schon die Montageplanung, wiederum stark vom Erfahrungswissen des Anwenders ab. Hinzu kommt noch die Tatsache, dass die Programmierung auf Grund der Vielzahl an manuellen Tätigkeiten sehr zeitintensiv ist.

Ferner gilt es zu berücksichtigen, dass ein in der Simulation erzeugter Programmablauf nicht ohne weiteres direkt auf die reale Anlage übertragen werden kann. Dies ist dadurch zu begründen, dass zwischen dem Computermodell und der Montagezelle Diskrepanzen in Bezug auf die geometrische Anordnung der einzelnen Geräte untereinander vorliegen. Die daraus resultierenden Abweichungen machen einen so genannten Teach-In-Vorgang unbedingt erforderlich, bei dem an der realen Anlage die exakten Punkte mit Hilfe des Bedienpanels von Hand angefahren werden. Insbesondere bei Greif- und Ablagepositionen ist eine derartige Vorgehensweise notwendig, da eine Abweichung an diesen Stellen nicht toleriert werden kann. Der Teach-In-Prozess eines komplett neuen Bewegungsablaufes kann bis zu mehrere Hundert Punkte umfassen. Demzufolge ist er zum einen sehr zeitaufwändig und zum anderen kostenintensiv, da wegen der Belegung der realen Montagezelle während der Programmierung keine Produktion möglich ist.

Aktuelle Forschungen auf dem Gebiet der Robotik versuchen die Inbetriebnahmezeiten zu verkürzen. So wurden beispielsweise im Rahmen des Projekts IROProg Methoden zur intuitiven Manipulation von Trajektorien sowie der vereinfachten Kalibrierung von Effektoren entwickelt [17]. Dabei kommt ein haptisches Eingabegerät zum Einsatz, das selber über 6 Freiheitsgrade verfügt und demzufolge sich der Knickarmroboter bzw. vielmehr sein TCP sehr einfach im Raum bewegen und positionieren lässt [159]. Allerdings ist auch hier wieder der Anwender sehr stark in die Programmierung mit involviert, sodass sie immer noch sehr zeitaufwändig und fehleranfällig ist. Aus diesem Grund wurden auch Ansätze in Bezug auf eine selbstständige Bahnplanung auf der Grundlage der Landkartenmethode (siehe Kapitel 5.1.1) angewandt, um beispielsweise Haltevorrichtungen innerhalb der Roboterzelle zu umfahren. Der Nachteil dieser Vorgehensweise ist – trotz leistungsstarker Rechner – die verhältnismäßig lange Rechenzeit, die im Bereich von 20 Sekunden bis zu mehreren Minuten liegt [17].

2.3 Entwicklung von Mehrrobotersystemen

Wie im vorangegangenen Kapitel dargelegt, sind Industrieroboter in der Lage, eine Vielzahl an unterschiedlichen Aufgaben durchzuführen. Stetig steigende Forderungen von Seiten der Anwender bedingen immer flexiblere Anlagen bei gleichzeitig sinkendem Platzangebot. Die Roboterhersteller reagieren im Moment auf diesen Bedarf mit so genannten Mehrrobotersystemen. Derartige Lösungen werden zwar keine signifikante Steigerung der Roboterverkaufszahlen bewirken, bieten allerdings erhebliches Potential, um die Fertigung flexibler zu gestalten und die Produktivität zu verbessern [61].

Hinsichtlich des Aufbaus einer Montagelinie kann die konventionelle Bauform als serielle Hintereinanderschaltung verschiedener Roboterzellen verstanden werden, die durch Nebentransportlinien mit dem Hauptmaterialfluss verbunden sind (Bild 11 links). Der Vorteil dieser Lösung besteht darin, dass bei einem Defekt eines Roboters dieser vom Bearbeitungsfluss entkoppelt, repariert und anschließend wieder eingebunden werden kann. Nachteilig erweisen sich jedoch die erhöhten Investitionskosten und der

Steuerungsaufwand für Nebenlinien sowie der gestiegene Platzbedarf. Dieser lässt sich durch den Wegfall der Nebenlinien und die räumlich kompaktere Anordnung der Roboterzellen mit der so genannten Blocklösung reduzieren (Bild 11 Mitte). Allerdings gilt es zu beachten, dass die Arbeitsräume der Handhabungsgeräte weiterhin räumlich getrennt sind und infolgedessen keine Möglichkeit der Zusammenarbeit gegeben ist. Im Gegensatz dazu bietet die Multiroboterzelle mit einem gemeinsamen Arbeitsbereich die Möglichkeit der Kooperation, was im Folgenden eingehend erläutert ist (Bild 11 rechts).

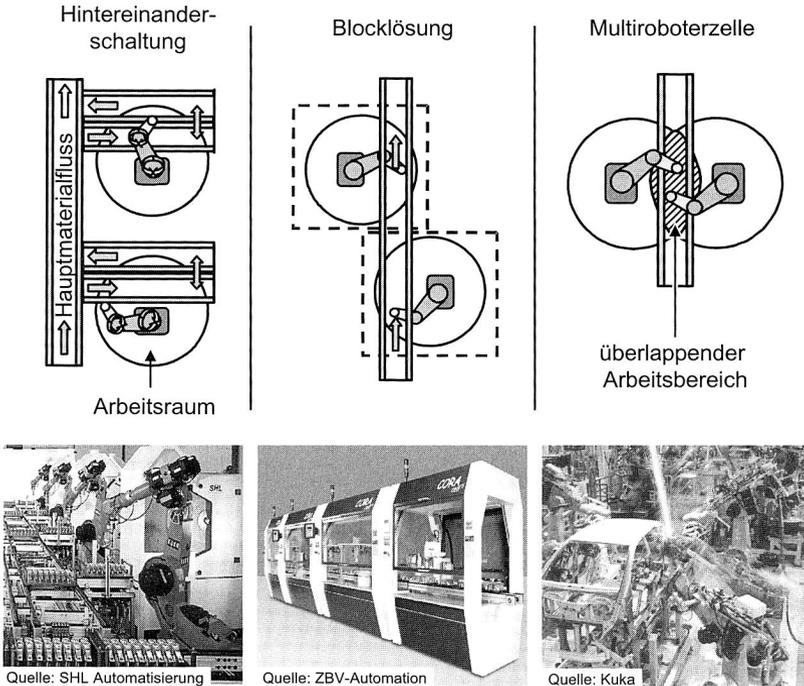


Bild 11: Anordnungsmöglichkeiten von Mehrrobotersystemen unter Berücksichtigung des erforderlichen Platzbedarfs [117]

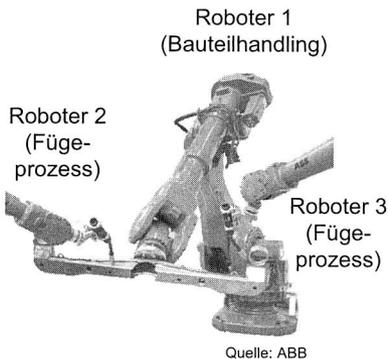
Multirobotersysteme eröffnen neue Anwendungsfelder

Hinsichtlich des Aufbaus einer Montagelinie lassen sich durch den Einsatz von Multiroboterzellen ganz neue Konzepte verwirklichen. Waren in der Vergangenheit die einzelnen Roboterzellen räumlich getrennt und über einen Materialfluss miteinander verbunden, so wachsen diese immer mehr zusammen, sodass der Teiletransport teilweise von den Robotern übernommen wird. Demzufolge lassen sich die unproduktiven Transportzeiten theoretisch auf Null reduzieren [91].

Um die Leistungsfähigkeit weiter zu erhöhen und gleichzeitig den Platzbedarf zu senken, werden innerhalb einer Zelle auf engstem Raum zwei oder mehrere Roboter verbaut, die eine ihnen gestellte Aufgabe erfüllen. Einen möglichen Anwendungsfall stellt beispielsweise der Rohbau einer Autokarosserie dar, bei dem mehrere Roboter an der linken und rechten Seite gleichzeitig Schweißpunkte setzen (vgl. Bild 11 rechts). Auf Grund einer symmetrischen Arbeitsabfolge kann der Bauteilverzug reduziert und demzufolge die Fixierung der Bauteile einfacher gestaltet sowie das Qualitätsergebnis verbessert werden. Durch die Integration mehrerer Roboter in eine Zelle wird der Aufbau für Folgestationen vermieden und der Platzbedarf für die gesamte Linie sinkt wegen der kompakten Bauform [91].

In den meisten Fällen ergibt sich bei den Multiroboterzellen infolge des beschränkten Platzangebots eine Überlappung der Arbeitsräume der einzelnen Roboter. Daraus resultiert die ständige Gefahr, dass die Effektoren miteinander bzw. mit der Zellenperipherie zusammenstoßen. Eine nähere Betrachtung von installierten Multiroboterzellen führt allerdings zu der Erkenntnis, dass es zu keiner Arbeitsraumüberschneidung kommt, da die Bewegungsräume der Handhabungsgeräte hard- oder softwaretechnisch mittels Endschaltern begrenzt sind. Somit wird wieder eine räumliche Trennung erzielt und die Gefahr eines Zusammenstoßes vermieden. Das Prinzip der räumlichen Trennung wird beispielsweise bei den Forschungen der School of Mechanical, Materials, Manufacturing Engineering and Management der Universität Nottingham angewandt, bei der zwei Tricept-Roboter jeweils auf einer Seite einer Flugzeugtragfläche Montagevorgänge durchführen [26].

Vorrichtungslose Fertigung



Gemeinsames Handhaben eines Bauteils (Load-Sharing)



Bild 12: Multirobotersysteme eröffnen neue Handhabungs- und Fertigungsmöglichkeiten, wie beispielsweise die vorrichtungslose Fertigung (links) oder das Load-Sharing (rechts)

Unterschiedliche Anwender und Roboterhersteller erkennen aber zunehmend das Potential, das sich durch einen gemeinsamen Arbeitsraum ergibt, weswegen diverse Mehrrobotersysteme kommerziell verfügbar sind, wie z. B. RoboTeam von Kuka, Robot Link bzw. DualArm von Fanuc, Multimotion von Motoman etc. (vgl. Bild 12) [83, 95]. Der Hauptgrund ist in der Verkürzung der Prozesszeit zu sehen, die durch eine Parallelisierung von Arbeitsschritten erzielt wird. Darüber hinaus werden neuartige Handhabungs- und Fertigungsmöglichkeiten eröffnet, die eine weitere Rationalisierung hinsichtlich der Automatisierungstechnik bei gleichzeitiger Flexibilitätssteigerung der Gesamtanlage erlauben. Beispiel hierfür ist die räumliche Manipulation von sehr schweren oder großen Bauteilen, die nun mit mehreren Robotern an verschiedenen Stellen gleichzeitig gegriffen und im Raum neu ausgerichtet und positioniert werden können (Load-Sharing) [64, 78]. Ein weiterer Vorteil ist in der vorrichtunglosen Fertigung zu sehen, bei der z. B. mehrere Roboter die zu verbindenden Bauteile zueinander ausrichten und andere die Fügeoperation durchführen [63, 79, 87]. Somit lassen sich die Kosten für teure Spannvorrichtungen einsparen, da lediglich einfache Greifer erforderlich sind.

Steuerungs- und Kommunikationsarchitektur

Ermöglicht werden diese Multiroboterlösungen durch die Neuentwicklung von leistungsfähigen, meist PC-basierten Steuerungen. Beim Aufbau der Kommunikationsarchitektur werden zwei unterschiedliche Strategien verfolgt:

- einerseits können mit einem einzigen Controller über 30 Achsen gleichzeitig koordiniert werden [87],
- andererseits werden Steuerungen für jeweils einen Roboter miteinander gekoppelt, wodurch Verbände mit bis zu 15 Robotern möglich sind [63].

Unabhängig von der Art und Weise des Zusammenschlusses der einzelnen Steuerungen können die Hersteller allerdings nur ihre eigenen Effektoren integrieren, sodass heterogene Systemarchitekturen per se ausgeschlossen sind. Eine Kombination verschiedener Kinematiken in einer Zelle aus aufgabenangepassten Geräten unterschiedlicher Hersteller ist demzufolge nicht möglich.

Bei den oben angesprochenen neuen Anwendungsmöglichkeiten, wie beispielsweise der vorrichtunglosen Fertigung und dem gemeinsamen Handhaben, agieren die Roboter auf engstem Raum, sodass hierbei keine Begrenzung der Arbeitsräume mehr möglich ist. Demzufolge besteht zu jedem Zeitpunkt die Gefahr eines Zusammenstoßes der Effektoren untereinander, da keine Kollisionsüberwachung vorgesehen ist. Die Programmierung kann daher nur von einem erfahrenen Spezialisten durchgeführt werden, der sämtliche Einzelbewegungen der Roboter beschreibt, was sehr zeitaufwändig und fehleranfällig ist.

Um die Programmierung zu vereinfachen, bzw. den Aufwand zu reduzieren, basieren die kommerziell verfügbaren Systeme auf einem so genannten Master-Slave-Ansatz. Darunter ist zu verstehen, dass ein Handhabungsgerät des Verbundes die Bewegungsbahn und -befehle vorgibt und alle anderen diesem durch eine starre Kopplung, meist geometrischer Art, folgen. Jedes Handhabungsgerät hat sein eigenes Programm, dessen Ablauf an gewissen Stellen, den so genannten Synchronisationspunkten, mit den Sequenzen der anderen Kinematiken abgeglichen wird. Während einer gemeinsamen Bewegung muss zwischen den Steuerungen jeweils die aktuelle Istposition der Effektoren ausgetauscht werden, um die Entfernung und Orientierung zueinander möglichst konstant und demzufolge die Abweichung (Offset) gering zu halten. Allerdings werden bei den bisherigen kommerziell verfügbaren Systemen weiterhin lediglich starre Befehlszuweisungen auf vordefinierten Bewegungsbahnen abgearbeitet.

Es lässt sich zusammenfassend festhalten, dass mit dem Einsatz von Multirobotersystemen ein neues Feld von Anwendungsmöglichkeiten eröffnet wird, das neue Entwicklungen erlaubt [132]. Mit den derzeit verfügbaren Systemen ist eine Zusammenarbeit der Roboter in Form einer vorrichtungslosen Fertigung bzw. gemeinsamen Bauteilhandhabung möglich [9]. Dies geschieht allerdings über eine Zwangskopplung der Bewegungen auf Grundlage des Master-Slave-Prinzips ohne Kollisionsüberwachung, wodurch sich die Programmierung oftmals sehr schwierig und zeitintensiv gestaltet.

2.4 Zusammenfassung

Der gesamte Produktentstehungsprozess, und dazu zählt insbesondere die Montage, erfolgt im allgemein bekannten Spannungsdreieck zwischen Kostenminimierung und hoher Qualität bei gleichzeitig kurzem Zeitbedarf. Erschwerend kommt noch hinzu, dass die Kunden zunehmend ein individuell nach ihren Vorstellungen angepasstes Produkt wünschen. In den vergangenen Jahren wurde versucht, diese konträren Zielforderungen durch die zunehmende Automatisierung von Teilprozessen zu lösen, was allerdings mit kapitalintensiven Investitionen für Spezialmaschinen verbunden war. Gleichzeitig gilt es aber auch die Kundenwünsche zu erfüllen, die einen hohen Grad an Individualisierung fordern, was wiederum von Herstellerseite mit einer großen Variantenvielfalt gelöst werden muss. Demzufolge wird eine ebenfalls hohe Flexibilität in Bezug auf die Montageanlagen gefordert, um die Maschinen schnell und einfach an unterschiedliche Applikationen adaptieren zu können oder den gesamten Umbau zu vermeiden. Aus diesem Grund haben sich Industrieroboter zu einem festen Bestandteil im Rahmen der Automatisierungstechnik etabliert und prägen maßgeblich das Erscheinungsbild moderner Montageeinrichtungen.

Insgesamt konnte der Produktentstehungsprozess im Laufe der letzten Jahre wesentlich verkürzt werden, was insbesondere auf die Reduzierung von ineffizienten und nicht-effektiven Arbeitsschritten zurückzuführen ist [110]. Aber auch die Rechnerunterstützung trägt einen Großteil dazu bei, denn mit Hilfe der Simulation und des

Digital Mock-Up können Fehler bzw. Schwachstellen bereits frühzeitig erkannt und Maßnahmen zu deren Kompensation eingeleitet werden. Demzufolge besteht das Ziel der Digitalen Fabrik darin, den gesamten Produktentstehungsprozess durch Einsatz verschiedener Simulationen am Rechner realitätsgetreu nachzubilden, um Fehlplanungen und -entscheidungen zu vermeiden [82].

Hinsichtlich der Entwicklungen im Bereich der Robotik und Automation haben sich neue Technologien auf dem Markt etabliert, die unter dem Begriff Multirobotersysteme zusammengefasst werden können. Dabei handelt es sich um die Kombination von mindestens zwei oder mehreren Handhabungsgeräten, die auf Grund ihrer engen räumlichen Anordnung meist über einen gemeinsamen Arbeitsraum verfügen. In diesem können sie sich gegenseitig bei einem Prozess unterstützen, wie z. B. beim gemeinsamen Handhaben von Bauteilen oder der vorrichtungslosen Fertigung. Dadurch werden völlig neue Anwendungsfelder erschlossen, deren Einsatzmöglichkeiten noch nicht abzuschätzen sind. Das Kommunikationsprinzip basiert hierbei allerdings immer auf dem Master-Slave-Prinzip, sodass eine gemeinsame Bewegung durch eine geometrische Zwangskopplung erzielt wird [91]. Des Weiteren erfolgt die Programmierung derartiger Anlagen immer noch manuell, was auf Grund des erhöhten Risikos eines Zusammenstoßes sehr zeitaufwändig und fehleranfällig ist und demzufolge der Forderung nach einer Verkürzung der Prozesskette konträr gegenüber steht.

Eine nachhaltige Verkürzung der gesamten Prozesskette kann nur durch eine enge Kopplung der einzelnen Abteilungen eines Unternehmens über einen durchgängigen und intensiven Informationsfluss erzielt werden [120]. Lediglich durch eine stärkere Bindung der Phase des Produktdesign (= Konstruktion) an die Fertigungs- und Montageprozesse wird die Möglichkeit geboten, ein wettbewerbsfähiges Gesamtprodukt innerhalb sehr kurzer Zeit auf den Markt zu bringen [93]. Für die Umsetzung sind viel versprechende Technologien auf dem Markt verfügbar, die bislang allerdings meist als Insellösungen eingesetzt werden und demzufolge ihr Potential hinsichtlich der Zeiteinsparung noch nicht voll entfalten konnten. Aus diesem Grund wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Lösungskonzept entwickelt und vorgestellt, mit dem der Montageprozess nachhaltig verkürzt werden kann.

3 Motivation und Zielsetzung: verkürzte und robuste Montageprozesse

Unternehmen müssen sich im Zuge der Globalisierung verstärkt gegen Wettbewerber am Markt behaupten. Hierzu gilt es neue Produkte möglichst kostengünstig zum richtigen Zeitpunkt mit hoher Qualität am Markt zu platzieren. Um dies zu bewerkstelligen, werden die Geschäftsprozesse verändert und stetig verbessert. Einige wichtige Entwicklungen sind in Kapitel 2 angesprochen worden. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Arbeitsabfolgen möglichst transparent, rechnergestützt und einfach gestaltet sein sollen. Die Bausteine für die datentechnisch durchgängige Digitale Fabrik stehen inzwischen zur Verfügung, doch es gilt diese zu einem vorteilsbringenden Verbund zu vereinen [127].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll deshalb ein durchgängiges Montagekonzept entwickelt und vorgestellt werden, das zu einer nachhaltigen Verkürzung der Prozesszeit führt. Insbesondere bei der Montage von geringen Losgrößen ist ein erhöhter Programmieraufwand der Anlagen auf Grund des häufigen Umrüstens erforderlich. Dies bedingt sowohl einen hohen zeitlichen Bedarf und beinhaltet gleichzeitig auch ein großes Fehlerpotential. Mit Hilfe des entwickelten Lösungsansatzes können eben diese Fehlerquellen weitgehend eliminiert und wegen der durchgängigen Rechnerunterstützung die gesamte Prozesskette zeitlich verkürzt werden [114].

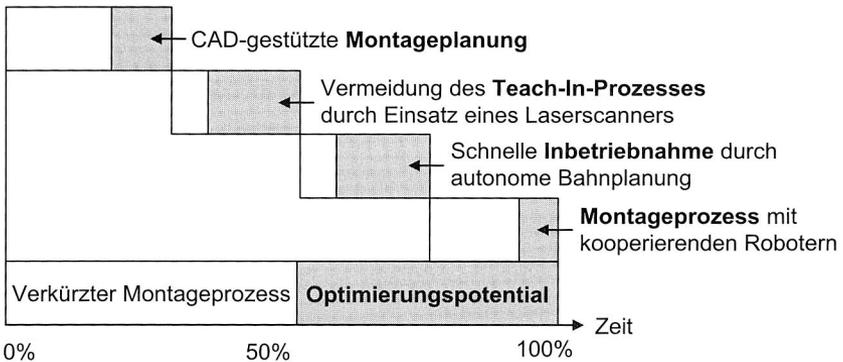


Bild 13: Die Ausnutzung des zeitlichen Optimierungspotentials führt zu einer Verkürzung des Montageablaufs

Deshalb gilt es zunächst die gesamte Prozesskette „Montage“ zu betrachten, die sich in Montageplanung, Rüstzeit, Teach-In-Vorgang, Inbetriebnahme und Programmadaptation sowie den eigentlichen Montageprozess untergliedern lässt (vgl. Bild 13) [56, 57]. Die konventionelle Vorgehensweise besteht darin, dass nach Beendigung der Produktentwicklung die CAD-Zeichnungen und -Modelle an die Arbeitsvorbereitung weitergeleitet werden und dort ein Bearbeiter von Hand die Montageplanung durchführt. Dazu zählt

zunächst die Definition einer zeitlichen Reihenfolge, in der die einzelnen Prozessschritte auszuführen sind. Des Weiteren gilt es geometrische Kenngrößen, wie beispielsweise Greif- und Ablagepositionen, zu verwendender Greifer etc., zu bestimmen. Anschließend werden meist unter Zuhilfenahme einer Kinematiksimulation, in der die Montagezelle nachmodelliert ist, die entsprechenden Roboterprogramme offline programmiert. Charakteristisch hierbei ist wiederum, dass diese Arbeiten durch eine manuelle Vorgehensweise geprägt sind. Demzufolge werden für diese Tätigkeiten erfahrene Programmierer benötigt, die dafür Rechnung tragen, dass die von ihnen geplanten Verfahrbewegungen der eingesetzten Handhabungsgeräte kollisionsfrei sind. Erfahrungsgemäß sind dazu mehrere Iterationsstufen erforderlich bis die Bewegungsabfolge zum gewünschten Endergebnis führt.

Damit das am Rechner erstellte Programm allerdings mit den Industrierobotern in der realen Montagezelle ausgeführt werden kann, ist zunächst in der Montageanlage ein sehr zeitintensiver Teach-In-Prozess erforderlich. Dabei werden sämtliche Greifpositionen sowie Stützpunkte mit dem Roboterarm, auch als Effektor bezeichnet, exakt angefahren und deren Koordinaten in das bereits bestehende Ablaufprogramm übernommen. Üblicherweise dauert dieser Vorgang mehrere Stunden, kann aber bei komplexen Programmabläufen und Anwendungen auch mehrere Tage erfordern. Während dieser Tätigkeit steht die Zelle nicht für den wertschöpfenden Montageprozess zur Verfügung, sondern dient ausschließlich dem Teach-In.

Durch den Einsatz von mehreren Industrierobotern (vgl. Kapitel 2.3) und die Parallelisierung von Einzelarbeitsschritten lässt sich die Taktzeit reduzieren. Gleichzeitig steigt jedoch das Kollisionsrisiko und demzufolge gestaltet sich die Programmierung der Einzelbewegungen wieder schwieriger. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die herkömmliche Prozesskette „Montage“ durch zahlreiche manuelle Tätigkeiten geprägt ist. Die vielfältigen Optimierungsmöglichkeiten, die im Rahmen eines durchgängigen Montagekonzepts realisierbar und einer verkürzten Prozesskette zuträglich sind, werden in den nachfolgenden Kapiteln eingehend erläutert.

3.1 Entwicklung eines durchgängigen Lösungsansatzes von der Konstruktion bis zur Montage

In den frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses hat sich das digitale Produktmodell bereits etabliert, doch die Fortsetzung in die Fertigungs- und Automatisierungstechnik ist ein noch sehr wenig bearbeitetes Gebiet [158]. Genau an dieser Stelle setzt das hier vorgestellte Montagekonzept an, dessen Ziel es ist, einen durchgängigen Informations- und Datenfluss zu realisieren, um somit manuelle, fehleranfällige und zeitintensive Tätigkeiten zu reduzieren und infolgedessen eine verkürzte Prozesskette zu erhalten.

Wie bereits oben angesprochen und aus Bild 13 ersichtlich, beinhaltet nicht nur der reine Montageprozess mit den Handhabungsgeräten noch zeitliches Optimierungs-

potential, sondern auch die vorgelagerten Bereiche, insbesondere die Montageplanung. Als Grundlage dient hier das 3D-CAD-Modell aus der Produktentwicklung. Durch eine konsequente Rechnerunterstützung gilt es dieses unter Verwendung geeigneter Algorithmen zu analysieren und daraus alle für den eigentlichen Montageprozess erforderlichen Daten und Informationen automatisch zu extrahieren [117]. Dazu zählen neben rein geometrischen Kenngrößen, wie beispielsweise Hauptabmessungen, Greif- und Ablagepositionen etc., auch die chronologische Reihenfolge, in der die Einzelbauteile zum fertigen Produkt gefügt werden müssen. Durch diese Vorgehensweise lassen sich alle erforderlichen Daten schnell und fehlerfrei zusammensetzen, was im Sinne einer verkürzten Prozesskette ist.

Darüber hinaus lässt sich die Taktzeit der Montage in der realen Zelle reduzieren, indem nicht mehr nur ein Handhabungsgerät, sondern mehrere parallel bzw. vielmehr miteinander arbeiten. Wichtig dabei ist, dass die kooperierenden Industrieroboter während der Montage gleichberechtigt sowie selbstständig agieren und nicht einfach fest vorgegebene Programme abarbeiten. Dies wiederum setzt allerdings voraus, dass die Bewegungsbahnen, auch Trajektorien genannt, erst zur Laufzeit berechnet und anschließend abgefahren werden. Des Weiteren besteht die Schwierigkeit beim Einsatz kooperierender Roboter darin, die zeitlichen und räumlichen Bewegungen der Effektoren aufeinander abzustimmen, sodass es nicht zu Zusammenstößen kommen kann. Diese Programmieraufgabe ist von Hand nahezu unlösbar, weswegen der Anwender bei der Benutzung und Programmierung von Multiroboterzellen durch die Rechnerunterstützung entlastet werden muss. Aus diesem Grund gilt es autonome Bahnplanungsmechanismen zu entwickeln und zu implementieren, sodass die Roboter eigenständig und insbesondere kollisionsfrei zu einem ihnen vorgegebenen Zielpunkt gelangen. Durch den Einsatz eines autonomen Bewegungsplaners in Verbindung mit kooperierenden Industrierobotern wird erreicht, dass sich der Programmieraufwand reduziert und die Taktzeit verkürzt [115].

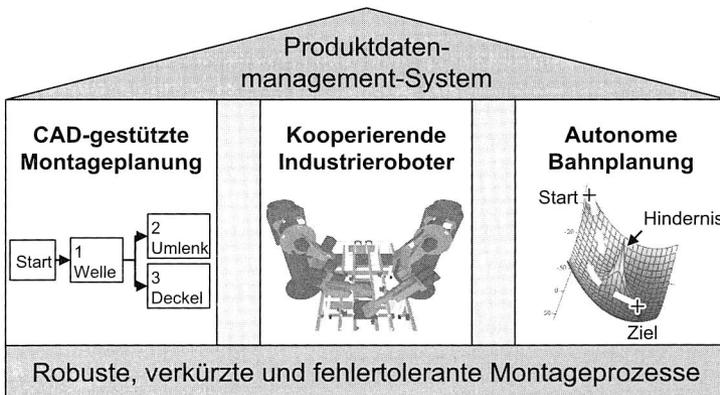


Bild 14: Grundpfeiler einer robusten, verkürzten und fehlertoleranten Montage

Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Lösungskonzept lässt sich in drei unterschiedliche Schwerpunkte untergliedern. Dazu zählen neben der CAD-gestützten Montageplanung die Entwicklung von autonomen Bahnplanern, um damit den Einsatz von kooperierenden Industrierobotern zu ermöglichen (vgl. Bild 14). Die Anwendung jedes einzelnen Themenkomplexes bewirkt bereits eine Verkürzung der Prozesskette „Montage“. Allerdings tritt das gesamte Leistungspotential des Lösungsansatzes erst dann zum Vorschein und bewirkt eine nachhaltige Verkürzung von Montageprozessen, wenn die drei Teilaspekte in dem durchgängigen Montagekonzept zum Tragen kommen und gemeinsam angewandt werden.

Um eine datentechnische Vernetzung der einzelnen Abteilungen eines Unternehmens zu erreichen, die im Rahmen des Produktentstehungsprozesses zusammenarbeiten, bietet sich die Verwendung eines übergeordneten Produktdatenmanagement-Systems (PDMS) an [36]. Dieses dient der gemeinsamen und zentralen Datenhaltung von Informationen, damit diese jederzeit von allen angegliederten Bereichen wieder- und weiterverwendet und ergänzt werden können, wie dies beispielsweise bei dem 3D-CAD-Modell der Fall ist. Mit Hilfe des PDM-Systems können Daten nicht nur im Sinne der klassischen Produktentstehung, d. h. von der Produktentwicklung in Richtung Fertigung und Montage weitergeleitet werden, sondern es besteht darüber hinaus die Möglichkeit, Informationen auch in die umgekehrte Richtung weiterzugeben. Dies ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn bei Problemen, beispielsweise in der Montage, die entsprechenden vorgelagerten Abteilungen, wie die Konstruktion und Fertigung, umgehend informiert werden müssen, um den aufgetretenen Fehler schnellstmöglich zu beseitigen. Die Verwendung eines Produktdatenmanagement-Systems sei jedoch im Rahmen des hier vorgestellten durchgängigen Montagekonzepts an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber mit aufgeführt. Der Ansatz der Integration eines PDM-Systems ist in den eigenen Veröffentlichungen [56, 57, 118-120] ausführlich dargestellt, sodass im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht näher darauf eingegangen wird.

3.2 Vom 3D-CAD-Modell bis zur robotergestützten Montage

Das im Rahmen dieser Arbeit verfolgte und umgesetzte Ziel besteht in der Realisierung eines verkürzten und robusten Montageprozesses, um unwirtschaftliche Nebenzeiten zu reduzieren und in wertschöpfende Produktionszeiten umzuwandeln. Dabei soll allerdings nicht nur die eigentliche Montagetätigkeit mit Handhabungsgeräten im Blickfeld der Betrachtungen stehen, sondern bereits bei der Montageplanung mit der Analyse der Abläufe begonnen werden. Nur durch die ganzheitliche Betrachtung der gesamten Prozesskette lassen sich wesentliche zeitliche Verbesserungspotentiale erkennen, die zu einer nachhaltigen Verkürzung der Montageprozesse führen.

3.2.1 Zeitreduzierung mittels vollautomatischer Montageplanung

Der Bereich der Montageplanung bzw. Arbeitsvorbereitung ist durch eine Vielzahl an manuellen Arbeitsschritten geprägt. Als Grundlage dienen meist die CAD-Zeichnungen oder 3D-Modelle, aus denen die erforderlichen Informationen von Hand extrahiert werden, um anschließend die Montage mit Industrierobotern durchzuführen. Dazu zählen geometrische Kenngrößen, wie z. B. die maximalen Abmessungen der Bauteile oder Abhol- bzw. Fügepositionen. Die Hauptabmessungen der Werkstücke sind insbesondere bei der Handhabung und der damit verbundenen Bewegungsplanung für die Roboter von Bedeutung, da es zu jedem Zeitpunkt gilt, Zusammenstöße mit anderen Objekten oder der Zellenperipherie zu vermeiden. Darüber hinaus beinhaltet die Zusammenstellungszeichnung bzw. das CAD-Modell Informationen darüber, wie die Bauteile in ihrer Endlage zueinander angeordnet und orientiert sind. Diese Angaben können in Form von Ablage- bzw. Fügepositionen wiedergegeben werden, die mit dem Roboterarm angefahren werden müssen, um die Werkstücke miteinander zu fügen oder zu montieren. Unter Zuhilfenahme des Zellenlayouts, aus dem die räumlichen Beziehungen zwischen Zuführeinrichtungen und demzufolge auch die Abholpositionen der Einzelteile ersichtlich sind, können somit alle geometrischen Kenngrößen von Hand ermittelt werden.

Der nächste Arbeitsschritt des Planers besteht darin, eine mögliche chronologische Reihenfolge zu bestimmen, in der die Einzelteile miteinander zu Baugruppen gefügt bzw. montiert werden. Dabei greift er auf sein Erfahrungswissen zurück, hat jedoch keine gesicherte Aussage über die zu erwartende Taktzeit oder ob der vorgeschlagene Ablauf überhaupt mit den Handhabungsgeräten durchführbar ist. Als nächstes wird meist mit Hilfe einer Kinematiksimulation die festgelegte Sequenz in Form eines Ablaufprogramms für die Roboter nachgebildet. Auch diese Tätigkeit erfolgt ausschließlich manuell und ist dementsprechend zeitaufwändig. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass im Rahmen der Simulationsumgebung zwar alle Kollisionen oder unzulässigen Gelenkstellungen des Roboterarms visualisiert werden können, doch eine automatische Vermeidung bzw. Korrektur in den kommerziellen Anwendungen nicht implementiert ist. Demzufolge ist der Programmierer dafür verantwortlich, dass die von ihm vorgegebene Trajektorie kollisionsfrei ist. Aus diesem Grund ist deswegen neben Abhol- und Fügepositionen meist noch eine Vielzahl an Hilfsstützpunkten erforderlich. Das offline erstellte Programm kann sodann auf die reale Anlage transferiert werden, wobei vor der ersten Ausführung ein sehr zeitaufwändiger Teach-In-Prozess erforderlich ist. Hierbei werden mit dem Roboter in der Zelle alle vorgegebenen Raumpunkte exakt angefahren und ggf. korrigiert. Dieser Schritt ist unbedingt erforderlich, da zwischen Simulation und realer Anlage immer Abweichungen in Bezug auf die räumlichen Abmaße vorliegen. Dies führt dazu, dass insbesondere die Greif- und Ablagepositionen in der virtuellen Welt und der realen Montagezelle nicht genau übereinstimmen. Demzufolge kann erst nach diesem Abgleich der Montageprozess erfolgreich durchgeführt werden.

Um den Ablauf der Montageplanung nachhaltig zu verkürzen, besteht die Idee nun darin, alle manuellen Einzelschritte soweit wie möglich zu vereinfachen, beziehungsweise zu automatisieren und demzufolge zu vermeiden. Die Ausgangsbasis dabei bildet wiederum das CAD-Modell. In Kapitel 4 wird im Detail gezeigt, wie daraus alle montagerelevanten Informationen gewonnen werden können. Wichtig dabei ist, dass sämtliche möglichen Montagereihenfolgen mit Hilfe der Rechnerunterstützung vollautomatisch ermittelt werden. Folglich kann anschließend durch die Verwendung einer entsprechenden Simulationsumgebung diejenige mit der kürzesten Taktzeit bestimmt werden. Die für den Ablauf erforderlichen Greif- und Fügepositionen lassen sich ebenfalls selbstständig aus dem CAD-Modell extrahieren. Somit können die chronologischen Reihenfolgen sowie die geometrischen Kenngrößen vollautomatisch aus dem CAD-Modell ermittelt werden, ohne manuelle Eingriffe vornehmen zu müssen. Deswegen ist eine wesentliche Beschleunigung und fehlertolerante Gestaltung des Montageplanungsprozesses möglich, da durch die Rechnerunterstützung erneute händische Dateneingaben vermieden werden [121].

Der sehr zeitintensive Teach-In-Prozess lässt sich durch den Einsatz eines Sensorsystems nahezu vollständig eliminieren. Die Idee besteht darin, die auf einem Werkstückträger befindlichen Einzelbauteile zu detektieren und deren Greifposition in Bezug zu einem definierten Koordinatensystem automatisch zu ermitteln. Somit kann auf die ansonsten erforderlichen Formnester und Haltevorrichtungen verzichtet werden. Darüber hinaus wird der Montageprozess sogar dann erfolgreich ausgeführt, wenn Bauteile verschoben oder sogar vertauscht sind, da sie und die jeweilige Greifposition erst unmittelbar vor der Ausführung automatisch detektiert und bestimmt werden.

3.2.2 Verkürzung der Taktzeit durch den Einsatz kooperierender Industrieroboter

Industrieroboter sind in heutigen Fertigungseinrichtungen als fester Bestandteil der Automatisierungstechnik zu sehen und eignen sich auf Grund ihrer freien Programmierbarkeit für eine Vielzahl von unterschiedlichen Aufgaben. Insbesondere im Bereich der Montagetechnik werden Handhabungsgeräte vorzugsweise für Pick&Place-Vorgänge eingesetzt, die durch eine häufige Wiederholrate sowie hohe Positioniergenauigkeit gekennzeichnet sind. Eine Entwicklungstendenz, die sich im Bereich der Robotik abzeichnet, ist der Einsatz von so genannten Multiroboterzellen, in denen sich mehrere Handhabungsgeräte einen gemeinsamen Arbeitsraum teilen und nach dem Master-Slave-Prinzip eine ihnen übertragene Aufgabe gemeinsam erfüllen können, wobei lediglich starre Bewegungsfolgen abgefahren werden können und eine Kopplung der Handhabungsgeräte über eine geometrische Zwangsbeziehung erfolgt (vgl. Kapitel 2.3).

Durch das Vorhandensein von mehreren Effektoren besteht jedoch prinzipiell die Möglichkeit, während einer Montagesequenz verschiedene Einzelschritte zu parallelisieren und somit Stillstandszeiten beziehungsweise die Taktzeit zu reduzieren [31]. Voraussetzung hierbei ist allerdings, dass entweder in zwei getrennten Arbeitsräumen gearbeitet wird, demzufolge jedoch keine Kooperation möglich ist oder aber der

Programmieraufwand sehr groß ist. Dies wiederum bedingt einen erfahrenen Programmierer, der dafür sorgt, dass die Roboter zu keinem Zeitpunkt der Bewegungsausführung untereinander oder mit der Zellenperipherie zusammenstoßen.

Aus diesem Grund finden in der vorliegenden Arbeit **kooperierende Industrieroboter** Verwendung. Darunter sind Handhabungsgeräte zu verstehen, die in der Lage sind, aufeinander zeitlich und/oder räumlich abgestimmte Bewegungen durchzuführen, und durch die Parallelisierung von Arbeitsschritten eine Reduzierung der Taktzeit erlauben sowie Montagevorgänge ermöglichen, die mit nur einem Roboter lediglich unter Zuhilfenahme von externen Zusatzachsen möglich wären.

Um diesen zeitlichen Vorteil bei der Verwendung von kooperierenden Industrierobotern weiter auszubauen, muss der Anwender bei der Inbetriebnahme und Programmierung derartiger Montageanlagen weitgehend entlastet werden. Deshalb sind autonome Bahnplaner für den effektiven und wirtschaftlichen Einsatz von kooperierenden Robotern essentiell, die für die Effektoren eine kollisionsfreie Trajektorie bestimmen. Dabei gilt es nicht nur Bewegungsbahnen einmalig im Voraus zu berechnen und diese dann lediglich starr abzufahren, sondern Ziel muss es sein, eine dynamische Bahnplanung zur Laufzeit einzusetzen. Erst dadurch wird die Möglichkeit geschaffen, auf die räumliche Positionierung der Handhabungsgeräte zu reagieren und entsprechende Ausweichbewegungen durchzuführen. Darüber hinaus kann auf unvorhergesehene Ereignisse, wie beispielsweise die Wiederholung eines Fügeprozesses, automatisch mit einer Alternativstrategie reagiert werden, woraus ein robuster Gesamtprozess resultiert.

Die dynamische Befehlszuweisung setzt allerdings leistungsfähige Algorithmen zur autonomen Berechnung der Trajektorien voraus, da die Bewegungsstützpunkte im Interpolationstakt der Robotersteuerungen vorgegeben werden müssen, der typischerweise im Bereich von 10-15 msec liegt. Die dafür notwendige Kommunikation soll unter Verwendung von Standardschnittstellen erfolgen, die vom Hersteller mit angeboten werden. Nur so ist sichergestellt, dass sich die hier entwickelte und vorgestellte Lösung auch auf andere Systeme übertragen und in industrielle Anwendungen überführen lässt.

Als Grundlage für die Befehlszuweisung dienen die aus dem vorhergehenden Schritt bestimmte chronologische Montagereihenfolge mit der kürzesten Taktzeit sowie die dazugehörigen geometrischen und prozessspezifischen Parameter, wie beispielsweise Positionsangaben, zu verwendender Greifer, Fügeoperation etc.. Eine der Bewegungsplanung übergeordnete Ablaufsteuerung zerlegt die jeweiligen Montageanweisungen in Elementarschritte und weist diese den entsprechenden Handhabungsgeräten zu, sodass Stillstandszeiten möglichst vermieden werden. Durch den Wegfall einer aktiven Anlagenprogrammierung und Reduzierung von ablaufbedingten Wartezeiten kann die Zykluszeit während des realen Montageprozesses nachhaltig verkürzt werden.

3.3 Darstellung der resultierenden verkürzten Montageprozesskette

Das Ziel des oben vorgestellten Lösungskonzepts ist eine nachhaltige Verkürzung der Montageprozesskette. Erst durch eine ganzheitliche Betrachtung des Produktentstehungsprozesses lassen sich in Hinblick auf den eigentlichen Montagevorgang wesentliche Optimierungspotentiale erkennen, die sowohl in der Planungsphase, als auch bei der Montagedurchführung mit Industrierobotern vorhanden sind. Um diese nutzen zu können, gilt es einen durchgängigen Daten- und Informationsfluss zu realisieren, sodass alle beteiligten Bereiche eines Unternehmens auf eine einheitliche, stets aktuelle Datenbasis zugreifen und daraus automatisch die für sie erforderlichen Informationen extrahieren und ggf. neue Parameter für andere Abteilungen bereitstellen können. Somit lässt sich die meist sehr zeitaufwändige und fehlerbehaftete Eingabe von Daten vermeiden und bereits dadurch eine nachhaltige Verkürzung erzielen.

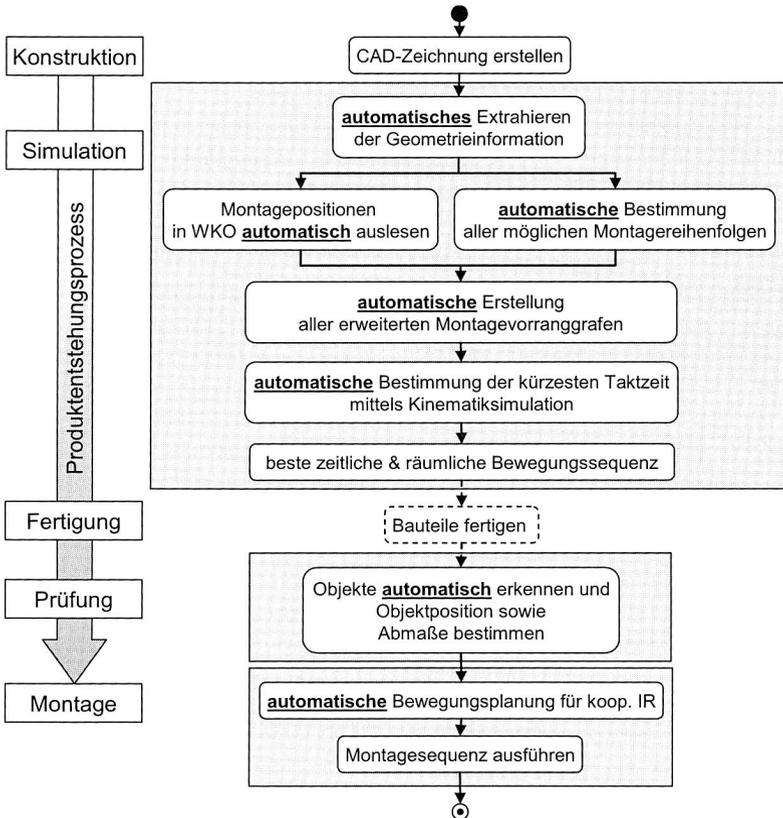


Bild 15: Ganzheitlicher und durchgängiger Lösungsansatz zur Verkürzung und Robustheitssteigerung von Montageprozessen

Der Ablauf einer Montageplanung und -durchführung, der sich aus dem oben beschriebenen Lösungskonzept ergibt, ist in Bild 15 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass als Ausgangspunkt das 3D-CAD-Modell aus dem Bereich der Produktentwicklung dient. Es enthält bereits alle montagerelevanten Informationen, wie beispielsweise chronologische Reihenfolge und geometrische sowie prozessbezogene Parameter, die im Rahmen der Montageplanung mittels geeigneter Algorithmen vollautomatisch extrahiert werden können, sodass ein manuelles Eingreifen von Seiten des Anwenders nicht mehr erforderlich ist.

Existieren mehrere gültige Montagesequenzen, so lässt sich unter Verwendung einer geeigneten Simulation diejenige mit der kürzesten Taktzeit ermitteln. Dabei sollen lediglich die im vorangegangenen Schritt erzeugten Daten als Grundlage weiterverwendet werden. Der Benutzer initiiert folglich nur den Simulationsstart, programmiert allerdings nicht die Bewegungsabläufe der verwendeten Handhabungsgeräte. Diese Aufgabe wird von autonomen Bahnplanern übernommen, wie sie auch in der realen Montagezelle zum Einsatz kommen. Sie sind in der Lage, eine kollisionsfreie Trajektorie zu einem vorgegebenen Zielpunkt für jeden Roboter zu planen. Wenn nun der Endpunkt einer Bewegung einer Greif- bzw. Fügeposition entspricht, die aus dem CAD-Modell automatisch bestimmt wurde, so kann die gesamte Sequenz selbstständig abgefahren werden. Durch das Hinzufügen einer Ablaufsteuerung, die noch die entsprechenden Prozesse, wie beispielsweise Greifen, Ablegen, Schrauben, Nieten, Kleben etc., in Abhängigkeit der Bewegungen koordiniert, kann auf diese Weise die komplette gültige Montagereihenfolge ohne aktive Anlagenprogrammierung durchgeführt werden. Durch die Verwendung eines autonomen Bewegungsplaners wird der Anwender bei der Inbetriebnahme sowie der damit verbundenen Programmierung wesentlich entlastet. Dies hat ebenfalls zur Folge, dass eine Vielzahl an manuellen Tätigkeiten auf Grund der durchgängigen Datenkommunikation und selbstständig ablaufender Prozessschritte entfällt, sodass sich der Montageprozess nachhaltig verkürzt.

Dieser Umstand wirkt sich noch deutlicher aus, wenn kooperierende Industrieroboter innerhalb der Montageanlage eingesetzt werden. Wegen des gemeinsamen Arbeitsraumes besteht allerdings permanente Kollisionsgefahr und der Programmierer müsste mit einer zeitlichen und räumlichen Koordination dafür sorgen, dass die Effektoren nicht untereinander oder mit der Zellenperipherie zusammenstoßen. Durch die Verwendung einer dynamischen Bewegungsplanung zur Laufzeit des Systems lassen sich somit die Trajektorien entsprechend selbstständig planen, sodass es zu keiner Kollision mehr kommen kann.

Auf Grund einer dynamischen Ablauf- und Bewegungsplanung sowie Befehlszuweisung bei dem hier entwickelten Lösungskonzept besteht darüber hinaus die Möglichkeit, den sehr zeitintensiven Teach-In-Prozess, d. h. das Anfahren der Abhol- und Fügepositionen mit den realen Industrierobotern, zu vermeiden. Hierfür werden die in die Montagezelle eingebrachten Bauteile sensorgestützt detektiert, um daran anschließend automatisch deren Identifikation durchzuführen und die entsprechenden Abhol-

positionen zu bestimmen. Die aus dem CAD-Modell ermittelten Werte können daraufhin korrigiert und an den Bewegungsplaner übermittelt werden, sodass der Roboter das zu verbauende Werkstück richtig greift und anschließend fügt. Daraus resultiert zum einen eine wesentliche Verkürzung des Montageprozesses und zum anderen gestaltet sich dieser sehr tolerant gegenüber Abweichungen hinsichtlich der Bauteilzuführung.

Anhand der Vorstellung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten ganzheitlichen Montagekonzepts sowie der obigen Ausführungen konnte gezeigt werden, dass aus Sicht der Automatisierungstechnik eine robuste und verkürzte Montageprozesskette durch die folgenden drei wesentlichen Maßnahmen realisiert werden kann:

- Anwendung einer CAD-gestützten vollautomatischen Montageplanung sowie
- autonome Bahnplanung für Effektoren und dem
- Einsatz von kooperierenden Industrierobotern für die Montagedurchführung.

Auf Grund der Rechnerunterstützung und der weitgehenden Automatisierung von Prozessabläufen wird der Anwender von manuellen und fehleranfälligen Tätigkeiten nahezu vollständig entlastet, woraus eine zeitliche Beschleunigung der gesamten Prozesskette „Montage“ resultiert.

3.4 Zusammenfassung

Mit der vorliegenden Arbeit wird das Ziel verfolgt, einen verkürzten Montageprozess für kleine Losgrößen zu realisieren. Dabei werden nicht nur die eigentliche Durchführung mit Handhabungsgeräten und die dabei erzielte Taktzeit betrachtet, sondern auch bereits die Planungsphase mit einbezogen. Nur durch die ganzheitliche Sichtweise lässt sich eine Vielzahl an zeitlichen Optimierungspotentialen erschließen, die im Rahmen des hier entwickelten Lösungsansatzes zu einer nachhaltigen Verkürzung des Gesamtprozesses beitragen.

Kennzeichnend für das vorgestellte Konzept ist die automatische Generierung aller montagerelevanten Informationen auf Basis eines 3D-CAD-Modells. Daraus werden mit Hilfe eigens entwickelter Algorithmen sowohl geometrische und prozessspezifische Parameter, als auch zeitliche Montagereihenfolgen vollautomatisch abgeleitet. Diese Informationen dienen sodann als Grundlage für die sich anschließenden Schritte Prozesssimulation und reale Montagedurchführung mit kooperierenden Industrierobotern [30].

Der Visualisierung des geplanten Montageprozesses unter Zuhilfenahme einer entsprechenden Kinematiksimulation kommen dabei zwei unterschiedliche Aufgaben zu. Zum einen besteht so die Möglichkeit, bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt innerhalb des Produktentstehungsprozesses die Machbarkeit der Montage zu überprüfen, Fehler zu erkennen und Verbesserungsstrategien einzuleiten und somit das Endergebnis simulationstechnisch abzusichern (Frontloading). Zum anderen können jedoch auch Aussagen in Bezug auf die zu erwartende Taktzeit getroffen werden. Dies ist insbeson-

dere dann von Bedeutung, wenn mehrere gültige Montagereihenfolgen generiert worden sind, da a priori nicht bekannt ist, welche von ihnen die geringste Taktzeit aufweist.

Auf Seiten der realen Montageanlage kann die reine Zykluszeit durch den Einsatz von kooperierenden Industrierobotern weiter gesenkt werden. Darüber hinaus werden dadurch erst Füge- und Handhabungsoperationen ermöglicht, die ein Roboter alleine überhaupt nicht durchführen könnte. Derartige Systeme, die aus mindestens zwei Industrierobotern bestehen, sind in der Lage, in einem Arbeitsraum eine ihnen gestellte Aufgabe gemeinsam durchzuführen. Demzufolge lassen sich Teilschritte parallelisieren, wodurch die Zykluszeit im Vergleich zur Montage mit nur einem Handhabungsgerät signifikant sinkt. Allerdings gestaltet sich die Programmierung dieser Anlagen äußerst schwierig und zeitintensiv, da permanent die Gefahr eines Zusammenstoßes besteht. Aus diesem Grund kommen selber entwickelte autonome Bahnplaner zum Einsatz, die eine kollisionsfreie Trajektorie von der aktuellen Ist-Position zu einem vorgegebenen Zielpunkt in Echtzeit berechnen. Somit ist gewährleistet, dass der Anwender bei der Programmierung nahezu vollständig entlastet wird. Dies ist auch durch die Integration einer übergeordneten Ablaufsteuerung sichergestellt, die als Eingangsgrößen die gültige zeitliche Montagereihenfolge sowie alle erforderlichen Positions- und Prozessinformationen verwaltet. Daraus lassen sich Elementaranweisungen generieren, die in entsprechende Fahr- bzw. Technologieanweisungen übersetzt und ausgeführt werden.

Eine weitere Besonderheit des entwickelten Lösungsansatzes besteht darin, dass auf den ansonsten unerlässlichen, aber sehr zeitintensiven Teach-In-Vorgang gänzlich verzichtet werden kann. Durch die Integration eines Sensorsystems werden die auf einem Werkstückträger in die Zelle eingebrachten Bauteile identifiziert und deren aktuelle Lage automatisch bestimmt. Die sich daraus ergebenden Greifpositionen werden an die Ablaufsteuerung übermittelt und fließen unmittelbar in die Bewegungsplanung mit ein. Demzufolge kann auf spezielle Formnester und Montagehilfen weitgehend verzichtet werden, was in wirtschaftlicher Hinsicht von Vorteil ist. Allerdings steht der zeitliche Gewinn im Vordergrund und dieser wird besonders dann deutlich, wenn die zu fertigende Losgröße gering ist und infolgedessen eine häufige Neuprogrammierung der Montageanlage erfolgen muss.

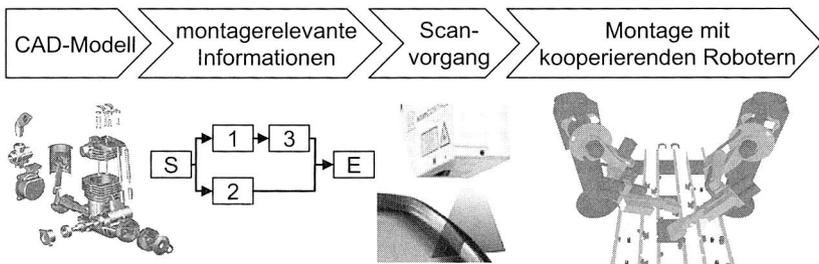


Bild 16: Sämtliche montagerelevanten Daten werden automatisch extrahiert und weitergeleitet

Insgesamt lässt sich festhalten, dass mit Hilfe des hier vorgestellten durchgängigen und rechnergestützten Lösungsansatzes eine nachhaltige Verkürzung der Montageprozesskette realisiert werden kann. In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Aspekte näher betrachtet und detailliert dargestellt. Die praktische Umsetzung des Montagekonzepts erfolgt im Rahmen von zwei Versuchsanlagen mit kooperierenden Industrierobotern unterschiedlicher Kinematik und verschiedener Hersteller. Mittels diverser Beispielprodukte wird abschließend die Leistungsfähigkeit der erarbeiteten Lösung verifiziert und das zeitliche Einsparungspotential verdeutlicht.

4 CAD-gestützte Montageplanung

Stetig kürzer werdende Produktlebenszyklen bei gleichzeitig wachsender Komplexität moderner Produkte führen zu geringeren Entwicklungszeiten. Unternehmen – vornehmlich Groß- aber auch zunehmend Kleinbetriebe und Mittelständler – versuchen diese Herausforderung mit leistungsfähigen Werkzeugen, wie der Rechnerunterstützung und Simulation, zu bewerkstelligen [6]. Bisherige Bestrebungen, die Prozesskette zeitlich zu verkürzen, konzentrierten sich auf Verbesserungen für die frühen Phasen der Produktentstehung, d. h. Konstruktion und Berechnung. Dies ist jedoch nicht ausreichend, denn es gilt auch die späteren Phasen, wie Fertigung und insbesondere die Montage, bei der Betrachtung zu berücksichtigen. Untermauert wird dies durch die Tatsache, dass bis zu 70 % der Kosten eines Produktes durch die Montage verursacht werden und demzufolge Verbesserungen in diesem Bereich besonders signifikante Auswirkungen zur Folge haben [139]. Aus diesem Grund lassen sich Aussagen im Sinne von „Wir fertigen nichts, ohne es vorher simuliert zu haben“ wieder finden, was sich in einer durchgängigen Simulation aller Produktentstehungsprozesse, insbesondere der Montage, in Form der Digitalen Fabrik bzw. des Digital Mock-Up widerspiegelt [54].

Die für den Planungsprozess erforderlichen Einzelschritte sind durch eine Vielzahl von manuellen Tätigkeiten gekennzeichnet, die wiederum einen sehr hohen Zeitbedarf nach sich ziehen und demzufolge der Prozesskettenverkürzung konträr gegenüber stehen. Für den Bereich der Montage bedeutet dies, dass der Planer als Ausgangsbasis zunächst eine geeignete Abfolge der einzelnen Prozessschritte sowie alle Verfahrenswege und Positionen der erforderlichen Maschinen manuell definieren muss [3]. Besondere Bedeutung hat dabei die Generierung einer zulässigen chronologischen Montage Reihenfolge, die sich auf eine Problemstellung der „Anordnungsmöglichkeiten von geometrischen Objekten“ zurückführen lässt. Dadurch tritt sie nicht nur im Bereich der Montage auf, sondern ist auch in der Robotik, Computergrafik und modernen Medizintechnik wieder zu finden [35]. Aus diesem Grund wurde in den letzten Jahren eine Vielzahl an unterschiedlichen Lösungen entwickelt, die sich in die drei Klassen einteilen lassen: manuell, halb- und vollautomatisch (vgl. Bild 17).

Die am naheliegendste und am meisten angewandte Methode ist die manuelle Erstellung einer zeitlichen Abfolge von Einzelschritten, deren Endergebnis eine Baugruppe oder das Endprodukt darstellt [15, 70]. Hierbei generiert der Anwender von Hand einen so genannten Verrichtungsfolge-, Gozinto- oder Ablaufgraf, in dem meist nur die zeitliche Reihenfolge definiert ist [49]. Eine Überprüfung der Montagefolge auf deren Funktionalität, wie z. B. das Auftreten von Kollisionen beim Ein- oder Ausbau, wird nicht vorgenommen. Dies führt häufig dazu, dass Montierbarkeitsprobleme bis zum Prototypen bzw. den ersten realen Bauteilen unentdeckt bleiben. Die sich dann anschließenden Änderungskosten liegen um ein Vielfaches höher, als wenn der Fehler in einem noch frühen Stadium der Produktentstehung entdeckt worden wäre [165]. Genau aus diesem Grund spielt die Rechnerunterstützung bei der Planung eine immer

wichtigere Rolle, denn sie eröffnet dem Anwender die Möglichkeit, bestimmte Sachverhalte oder Missstände frühzeitig zu erkennen, wodurch Kosten gespart und der Zeitaufwand für deren Beseitigung verringert werden können.

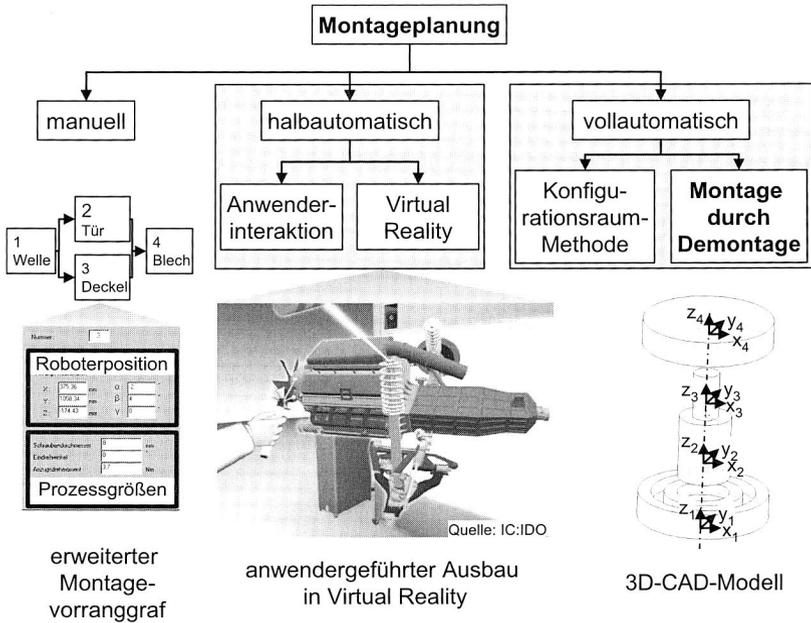


Bild 17: Verschiedene Ansätze der rechnerunterstützten Montageplanung = CAAP (Computer Aided Assembly Planning)

Die halbautomatischen Ansätze finden vermehrt in den Achtziger Jahren Anwendung [27], wobei die dort vorgestellten Lösungen mittels eines Fragenkatalogs sehr stark mit dem Anwender interagieren und aus den gegebenen Antworten sowie geometrischen Randbedingungen die zeitliche Montageabfolge erstellen [8, 16, 34]. Des Weiteren konnten aber auch bereits Methoden und Ansätze zur rechnergestützten Planung entwickelt werden, sodass der Benutzer bei der Anwendung entlastet wird [33, 106, 126]. Neuere Ansätze versuchen den Montagevorgang mit Hilfe der Virtuellen Realität (VR) [53, 58, 156, 157, 160] sowie der Rückkopplung von wirkenden Kräften (Force Feedback) detailgetreu nachzubilden [143, 161]. Somit erhält der Anwender einen sehr guten Eindruck von den Prozessen und kann Fehler bereits frühzeitig erkennen und beheben. Hierzu zählen auch Möglichkeiten der 3D-Darstellung mittels VRML-Technik (Virtual Reality Modelling Language) über das Internet [145, 146] sowie kommerzielle CAD- und Simulationsumgebungen, mit denen die geplanten Prozesse abgesichert werden [86, 89].

Um den Anwender von manuellen Arbeiten weitestgehend zu entlasten und den Montageplanungsprozess signifikant zu beschleunigen, wird mit dem dritten Ansatz die vollautomatische Vorgehensweise verfolgt. Auf Grund der Komplexität und Mannigfaltigkeit der Problemstellung befindet sich dieser Bereich noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase. Dabei haben sich zwei unterschiedliche Hauptrichtungen herauskristallisiert:

- Planung im Konfigurationsraum (C-Cell space) [40, 122, 148] sowie
- Montage durch Demontage [25, 33].

Die erste Methode überführt das kinematische Problem in eine reine mathematische Beschreibung. Dabei lassen sich Objekte als Punkte repräsentieren, deren Bewegungen in einem n-dimensionalen Konfigurationsraum erfolgen. Als Konfigurationsraum wird die Menge aller überhaupt möglichen und zulässigen, d. h. kollisionsfreien Konfigurationen bezeichnet [48].

Bei der Vorgehensweise „Montage durch Demontage“ wird ausgehend von der komplett montierten Baugruppe versucht, diese auseinander zu bauen. Wenn eine Möglichkeit gefunden wurde, so stellt deren umgekehrte Abfolge eine umsetzbare Montagereihenfolge dar. Bei der Lösungsgenerierung gilt es entsprechende Algorithmen zu entwerfen und anzuwenden, die entscheiden, ob die Montage von zwei Bauteilen oder mit einer Baugruppe gültig bzw. realisierbar ist. Dabei wird häufig die Kollisionsfreiheit als Kriterium zu Grunde gelegt. Jedoch erweist sich die Bauteilkomplexität hinsichtlich des Berechnungsaufwands oftmals als Schwierigkeit bzw. limitierender Faktor, sodass Vereinfachungen und Beschränkungen, wie z. B. nur die Verwendung von konvexen Bauteilen oder lediglich einfache räumliche Problemstellungen, vorausgesetzt werden [160].

Netzplantechnik zur Visualisierung der Montagereihenfolgen

Für die Darstellung der gefundenen zeitlichen Prozessabfolgen existieren verschiedene Möglichkeiten, wie z. B. das Gantt-Diagramm, Petri-Netz, And/Or-, Gozinto- oder Vorranggraf, um nur einige wenige zu nennen [13, 16, 20, 39, 62, 70, 112, 150]. Unabhängig von ihrer Art und Weise werden mit diesen Techniken die Produktbeziehungen zwischen zwei Werkstücken oder Baugruppen dargestellt. Jedoch wird meist nur die zeitliche Reihenfolge der Einzelschritte abgebildet, d. h. die Vorgänger-/Nachfolgerbeziehungen definiert. Dies ist aber für einen Montageprozess nicht ausreichend, da hierfür auch noch Geometrie-, Positions- und ggf. Technologieparameter erforderlich sind. Aus diesem Grund wurde z. B. der Montagevorranggraf erweitert, sodass sämtliche montagerelevanten Informationen mit abgespeichert werden können [34, 70, 126]. Bei der grafischen Darstellung (vgl. Bild 18) fällt auf, dass einige Prozessschritte parallel angeordnet sind. Dies bedeutet, dass sie zeitlich unabhängig voneinander durchgeführt werden können und demzufolge ihre chronologische Ausführungsreihenfolge nicht fest vorgegeben ist. Die Darstellung in Form eines Grafen ist für die automatisierte Weiterverarbeitung allerdings weniger gut geeignet. Jedoch lassen sich daraus schnell lineare

Sequenzen generieren. Das heißt, dass alle Möglichkeiten beginnend bei einem Startknoten bis zum Ende durchlaufen werden, sodass sich bei der Parallelisierung von zwei Teilprozessen zwei gleichwertige Montagelösungen ergeben würden.

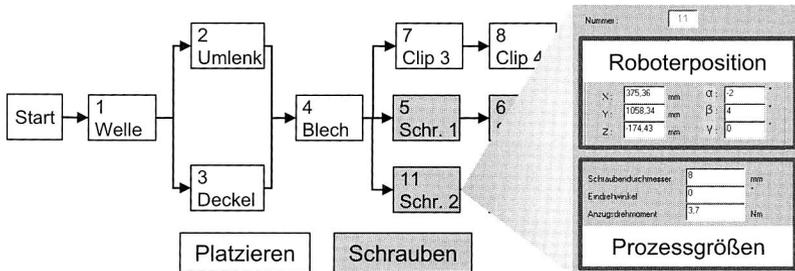


Bild 18: Darstellung der zeitlichen Montagereihenfolge mittels Grafen und deren Erweiterung um Geometrie-, Positions- und Technologieparameter

In den folgenden Abschnitten ist nun gezeigt, wie mit Hilfe der vollautomatischen Montageplanung alle möglichen Montagereihenfolgen automatisch generiert werden können. Dabei wird auch erläutert, dass ein 3D-CAD-Modell in Form einer Zusammenstellungszeichnung als Datengrundlage für die zeitlichen Reihenfolgen sowie Geometrie- und Technologieparameter herangezogen wird. Die gewonnenen Informationen stellen Idealwerte dar und müssen anschließend noch mit den real vorliegenden Gegebenheiten innerhalb der Montagezelle abgeglichen werden, wozu ein geeignetes Sensorsystem Verwendung findet.

4.1 Vollautomatische Montageplanung und rechnergestützte Generierung möglicher Montagesequenzen

Zur Ermittlung von zeitlichen Montagereihenfolgen existieren, wie oben aufgezeigt, mehrere verschiedene grundlegende Methoden. Eine gute und schnelle Lösung dieses Problems für den Zusammenhang von Produkten zu finden, die aus einer Vielzahl von unterschiedlich geformten Komponenten bestehen, ist in der Robotik allerdings eine echte Herausforderung. Die hier aufgezeigte Vorgehensweise der vollautomatischen Montageplanung basiert auf dem Prinzip „Montage durch Demontage“ und geht bei der Lösungsfindung schrittweise voran [25]. Ziel ist es, alle möglichen und gültigen zeitlichen Reihenfolgen zu generieren, bei denen sämtliche Einzelteile zur Baugruppe bzw. dem Endprodukt zusammengefügt werden. Das Grundprinzip besteht darin, zwei Werkstücke kollisionsfrei gegeneinander zu bewegen, sodass diese in umgekehrter Ausführung zusammengesetzt werden können. Die dafür erforderlichen Einzelschritte sind im Folgenden ausführlich dargestellt und lassen sich in

- Definition der geometrischen Freiheitsgrade der Einzelteile,
- Generierung der Verbindungsmatrix,
- Angabe des Roboterbewegungstupels und schließlich der
- Erstellung der Durchführbarkeitsmatrix sowie das
- Ableiten von gültigen Montagesequenzen

untergliedern. Zusätzlich können auch noch weitere Randbedingungen, wie beispielsweise die Berücksichtigung von Fügeflächen etc., in Form von zusätzlichen Matrizen berücksichtigt werden. Um den Rechenaufwand etwas zu reduzieren, sind als mögliche Bewegungsrichtungen die Hauptrichtungen eines der im Rahmen der Konstruktion verwendeten Koordinatensysteme anzusehen.

Definition der geometrischen Freiheitsgrade der Einzelteile

Jeder Körper hat im Raum geometrische Freiheitsgrade, in die er sich frei bewegen kann. Solange kein Zusammenstoß mit einem anderen Objekt in eine dieser Richtungen vorkommt, kann sie als kollisionsfrei angesehen werden. Demzufolge lassen sich für jedes Bauteil die geometrischen Freiheitsgrade mit Hilfe eines entsprechenden Tupels in der Form:

$$F_{\text{Bauteil}} = \begin{cases} [x+, x-, y+, y-, \alpha+, \alpha-] & \text{für 2D} \\ [x+, x-, y+, y-, z+, z-, \alpha+, \alpha-, \beta+, \beta-, \gamma+, \gamma-] & \text{für 3D} \end{cases} \quad (1)$$

darstellen, wobei x , y und z die Verschiebungen in den kartesischen Raumrichtungen sowie α , β und γ die Drehungen um die x -, y - und z -Achse bedeuten. Mit Hilfe der Booleschen Algebra, d. h. 1 = frei beweglich bzw. 0 = Kollision, können so für jedes betrachtete Objekt die Freiheitsgrade bestimmt werden.

Bei einer Füge- bzw. Montageoperation kann immer zwischen einem aktiven und einem passiven Bauteil differenziert werden. Das Erste wird dabei bewegt, wohingegen der zweite Fügepartner festgehalten wird. Somit lässt sich eine $N \times N$ -Matrix aufstellen, in der jeweils die Freiheitsgrade zwischen zwei Bauteilen festgehalten sind. Die Dimension N der Matrix entspricht dabei der Anzahl an betrachteten Bauteilen. Die Spalten repräsentieren die passiven Bauteile, wohingegen die Zeilen die aktiv bewegten darstellen. Die daraus resultierende Freiheitsgradmatrix ist im erweiterten Sinn „diagonal symmetrisch“, wobei jeweils die Plus- und Minus-Tupelwerte vertauscht werden müssen. Die Diagonaleinträge von links oben nach rechts unten sind immer mit dem Wert 0 besetzt.

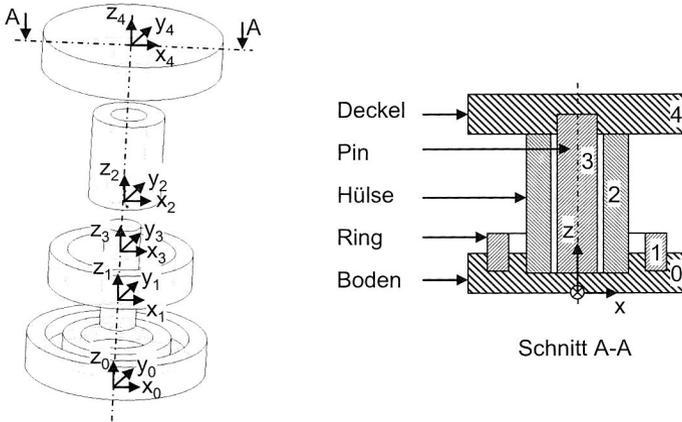


Bild 19: Beispielbaugruppe zur Ermittlung der Freiheitsgradmatrix unter der Voraussetzung von lediglich kartesisch zulässigen Bewegungen

Die grundlegende Vorgehensweise der vollautomatischen Montageplanung soll anhand eines einfachen Beispiels „Pin-Hülse-Ring“ (siehe Bild 19) näher erläutert werden. Dabei wird vereinbart, dass die Bauteile lediglich in den drei translatorischen Hauptrichtungen beweglich und zunächst alle Bauteilkoordinatensysteme gleichorientiert sind, sodass sie demzufolge auf ein gemeinsames Weltkoordinatensystem reduziert werden können. Somit lässt sich die dazugehörige Freiheitsgradmatrix wie folgt angeben:

		<i>passiv</i>				
		0	1	2	3	4
$Freiheit_0 =$	0	0	000001	000001	000001	111101
	1	000010	0	000001	000001	111101
	<i>aktiv</i> 2	000010	000010	0	000011	111101
	3	000010	000010	000011	0	000001
	4	111110	111110	111110	000010	0

(2)

Automatische Generierung der Verbindungsmatrix

Nicht weniger von Bedeutung ist die Angabe, ob eine Teilbaugruppe nach deren Montage stabil ist oder nicht. Dies kann mit Hilfe der Verbindungsmatrix näher spezifiziert werden, wobei für deren Generierung mehrere Möglichkeiten existieren. Die erste besteht darin, dass der Konstrukteur durch das Hinzufügen von semantischen Zusatzinformationen die Verbindungsart zwischen zwei Bauteilen näher klassifiziert und sich daraus ein spezifischer Wert im Bereich von 0 (= keine Verbindung) und 1 (= Formschluss) ableiten lässt. Allerdings würde bei dieser Vorgehensweise der Konstrukteur dafür verantwortlich sein, die erforderlichen Informationen manuell zu definieren.

Die andere Möglichkeit besteht darin, in Abhängigkeit der Kontaktflächen zwischen den Objekten die Verbindungsmatrix automatisch zu generieren. Dazu werden die in Beziehung stehenden Bauteile mit Hilfe von entsprechenden Algorithmen automatisch ermittelt und sodann in der Matrix an den jeweiligen Stellen eine 1 geschrieben. Darüber hinaus wäre es möglich, in Relation des Spaltmaßes zwischen zwei Bauteilen die Hafffestigkeit zu variieren. Somit könnte der Produktentwickler bereits während der Konstruktion durch den Abstand, den zwei Werkstücke zueinander haben, die Verbindung genauer klassifizieren. Dieses Maß könnte sodann wiederum als Grundlage für die automatische Generierung der Verbindungsmatrix dienen.

In dem obigen Beispiel soll z. B. vereinbart werden, dass der Pin und die Hülse eine nicht stabile Teilbaugruppe bilden, hingegen Pin sowie Deckel aber mit einer Pressverbindung miteinander gefügt und anschließend gehandhabt werden können. Demzufolge ergibt sich folgende symmetrische Verbindungsmatrix:

$$\text{Verbind}_0 = \begin{array}{c|ccccc} & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{array} \quad (3)$$

Definition des Roboterbewegungstupels

Die Montage soll anschließend von einem Handhabungsgerät durchgeführt werden, das unter Umständen hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade Restriktionen aufweist. Verdeutlicht werden kann dies z. B. anhand der für die Montage eingesetzten Linearroboter (vgl. Kapitel 7). Die Bewegungsrichtungen dieser Flächenausleger sind parallel zu einem kartesischen Koordinatensystem ausgerichtet, woraus folgt, dass eine Montagebewegung nur von oben oder der Seite her erfolgen kann. Unter der Vereinfachung, dass eine Fügebewegung nur von oben, d. h. in negative z-Richtung, durchführbar ist, lässt sich das dazugehörige Roboterbewegungstupel wie folgt angeben $Rob_{Linear} = [0,0,0,0,0,1]$. Für die weitere Verwendung muss jedoch jeweils die positive und negative Tupelposition paarweise getauscht werden, sodass sich ein $Rob_{Linear}^* = [0,0,0,0,1,0]$ ergibt. Somit kann für jede zum Einsatz kommende Kinematik auf einfache Weise ein Roboterbewegungstupel definiert werden. Würde an dieser Stelle nicht das Robotertupel transformiert, so hätte dies zur Folge, dass sich die Bezeichnung „aktiv“ und „passiv“ an der Durchführbarkeitsmatrix vertauschen würde.

Bestimmung der Durchführbarkeitsmatrix

Ziel der Montageplanung ist es, gültige Fügeoperationen zu ermitteln, was mit Hilfe der vorher bestimmten Matrizen erfolgt. Dazu werden jeweils die Einträge der Freiheitsgrad- und Verbindungsmatrix sowie des Robotertupels paarweise mittels einer booleschen und-Operation zu einer Durchführbarkeitsmatrix verknüpft. Dabei gilt die Vorschrift, dass das Ergebnis wahr ist, wenn alle Einträge den Wert 1 haben. Anschließend kann noch eine Verdichtung der Ergebnisse durchgeführt werden, d. h. die Null-Tupel ergeben keine gültige Montageoperation, wohingegen die 1 eine mögliche Fügeoperation zwischen zwei Bauteilen bzw. -gruppen anzeigt. Für das obige Beispiel ergibt sich demnach die Durchführbarkeitsmatrix zu:

$$\begin{array}{r|cccc}
 & & \text{passiv} & & & \\
 & & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\
 \hline
 \text{Durchführbarkeit}_0 = & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & \text{aktiv} & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & & 3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & & 4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0
 \end{array} \quad (4)$$

Automatische Generierung aller möglichen Montagesequenzen

Aus der Durchführbarkeitsmatrix sind alle gültigen Fügeoperationen zwischen zwei Bauteilen ersichtlich. Um nun eine komplette chronologische Reihenfolge für die gesamte Baugruppe zu erhalten, gilt es zunächst zwei Bauteile gemäß dem Ergebnis der Durchführbarkeitsmatrix miteinander zu verbinden und diese Unterbaugruppe wiederum als ein Teil zu betrachten. Sodann kann damit begonnen werden, die Prozedur von neuem zu starten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass nunmehr lediglich N-1 Bauteile vorhanden sind und sich jede Matrix um eine Dimension verkleinert. Dieses Vorgehen wird wiederholt, solange eine gültige Montageoperation in der Durchführbarkeitsmatrix möglich ist. Die Anzahl an bereits verbauten Werkstücken kann dabei als Indexierung der jeweiligen Matrizen herangezogen und auch als Stufe oder Ebene bezeichnet werden. Wenn sich keine zwei Bauteile oder -gruppen mehr miteinander verbinden lassen, so muss eine Ebene zurückgegangen und – falls vorhanden – mit einer anderen Werkstückkombination fortgesetzt werden. Durch diese Vorgehensweise werden alle Möglichkeiten von gültigen Montageoperationen getestet, die sich anschaulich in einem Baum darstellen lassen. Alle Äste, die bis in die N-1-te Ebene hinabreichen, d. h. alle Bauteile sind verbaut worden, stellen sodann eine gültige Montagesequenz dar.

Unter der Voraussetzung, dass lediglich generativ gearbeitet werden kann, d. h. aufeinander aufbauend, ergeben sich bei dem obigen Beispiel insgesamt 8 mögliche Montagereihenfolgen, die in Bild 20 dargestellt sind. Daraus ist ersichtlich, dass der Montageprozess immer mit dem Boden beginnt. Des Weiteren folgt aus der

Verbindungsmatrix, dass die Bauteile Deckel (4) und Pin (3) zu einer stabilen Teilbaugruppe, hier mit 4&3 gekennzeichnet, zusammengefügt werden können und sich anschließend wie ein Werkstück handhaben lassen.

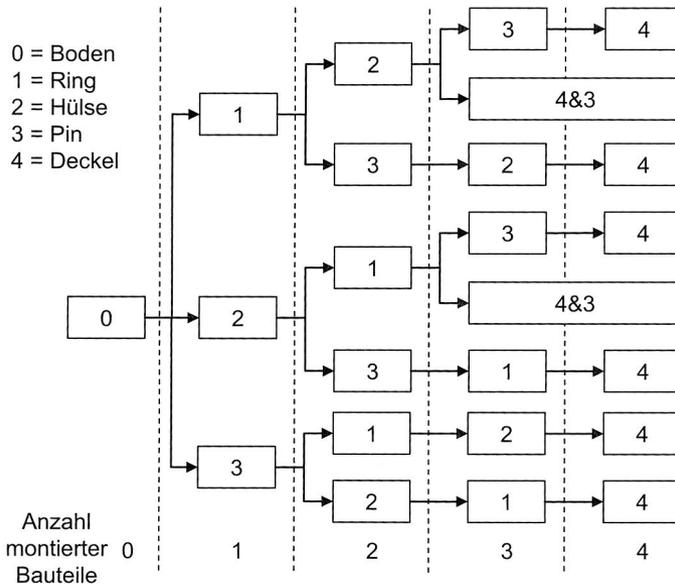


Bild 20: Darstellung der gefundenen Lösungen mit Hilfe der Baumstruktur, die alle möglichen Unterbaugruppen sowie gültigen Montagesequenzen enthält

Als nachteilig an dieser Vorgehensweise erweist sich jedoch, dass jedes Mal, wenn eine weitere Teilbaugruppe gebildet wird, alle Matrizen neu erstellt werden müssen, was mit einem relativ hohen Rechen- und demzufolge auch Zeitaufwand verbunden ist. Eine genauere Betrachtung der Problemstellung führt dazu, dass sich das Bewegungstapel für den Roboter überhaupt nicht verändert, da es während der gesamten Montagesequenz Verwendung findet und die Verbindungsmatrix – bis auf die Dimensionsreduzierung – durch eine oder-Verknüpfung aus der vorhergehenden berechnen lässt, d. h. es ist ausreichend, diese nur ein einziges Mal aufzustellen. Hierzu gilt es jeweils die Zeile bzw. Spalte des aktiven Bauteils mit der des passiven zu verodern und anschließend die Einträge zu nullen oder zu löschen.

Der größte zeitliche Aufwand besteht allerdings darin, die Bewegungsmatrix aufzustellen. Daher empfiehlt es sich, die Tupel der neu gebildeten Baugruppe aus den beiden Einzelteilen zusammensetzen und nicht wieder durch Kollisionsüberprüfung mit den anderen Bauteilen aufzustellen. Dazu werden die Einträge der aktiven mit denen des passiven Bauteils mittels einer booleschen und-Verknüpfung miteinander kombiniert. Infolgedessen ist es ausreichend, lediglich ein einziges Mal die Bewegungs-

matrix aufzustellen. Darüber hinaus kann Zeit eingespart werden, indem nur diejenigen Raumrichtungen bei der Verschiebung der Bauteile berücksichtigt werden, in die das Handhabungsgerät auch Fügebewegungen durchführen kann. Anhand der beiden Überlegungen lässt sich demzufolge der erforderliche Rechenaufwand nachhaltig reduzieren.

Erweiterung um Handhabungsrestriktionen durch Greifflächen

Zusätzlich können beliebige Randbedingungen in Form von weiteren Matrizen abgebildet werden und mit in die Berechnung einfließen. So stellt z. B. die Definition von Greifflächen an den handzuhabenden Bauteilen eine sinnvolle Ergänzung dar. Wird z. B. bei dem Beispiel in Bild 19 am oberen Ende des Pins (= Bauteil 3) eine Greiffläche definiert, so kann dieser nur noch in negative z-Richtung in die Hülse (= Bauteil 2) gefügt werden. Es gilt sodann zu prüfen, ob die Greiffläche mit anderen Bauteilen im Rahmen der zulässigen Bewegungsrichtungen kollidiert. Daraus kann wiederum eine Tupel-Matrix aufgebaut werden, aus der die möglichen Bewegungsrichtungen der Einzelteile zueinander ersichtlich sind und die bei der Generierung der Durchführbarkeitsmatrix in Form einer und-Verknüpfung mit berücksichtigt werden muss.

Erweiterung auf beliebig orientierte Bauteile

In den seltensten Fällen sind jedoch die Koordinatensysteme aller Bauteile gleich orientiert, sodass es nicht ausreicht, lediglich eine einzige Bewegungsmatrix aufzustellen. Vielmehr verfügt jedes Bauteil über sein eigenes Koordinatensystem und daher müssen insgesamt maximal N Freiheitsgradmatrizen aufgestellt werden.

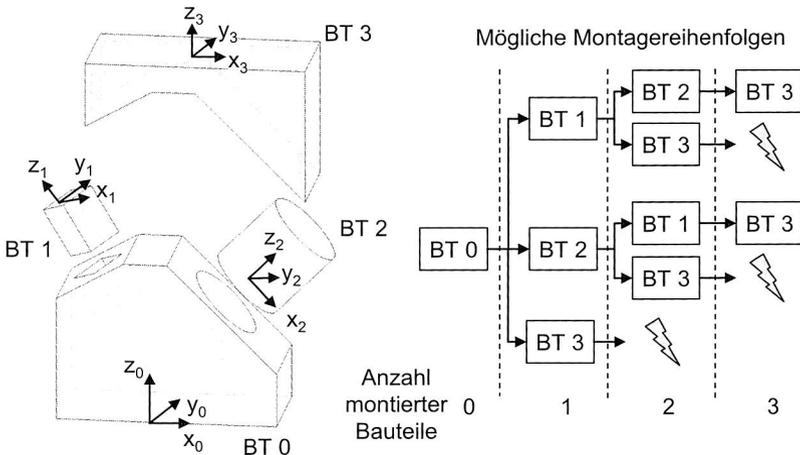


Bild 21: Beispielbaugruppe bestehend aus 4 Bauteilen (BT) mit unterschiedlich orientierten Koordinatensystemen und allen möglichen Montagereihenfolgen

Dabei gilt es das Robotertupel entsprechend dem betrachteten Bezugssystem neu zu transformieren. Abschließend müssen die so generierten Durchführbarkeitsmatrizen mittels einer booleschen oder-Verknüpfung, d. h. die 1 setzt sich durch, zu einer resultierenden Matrix zusammengefasst werden, aus der sich wiederum alle möglichen Montageschritte entnehmen lassen.

4.2 3D-CAD-Modell als Datenbasis und Informationsgewinnung

Die Ausführungen im vorhergehenden Kapitel zeigen, dass es möglich ist, anhand des 3D-CAD-Modells vollautomatisch alle zulässigen Montagesequenzen zu ermitteln. Jedoch wurde bislang nur die zeitliche Reihenfolge berücksichtigt, die für sich allein genommen aber nicht ausreichend ist, um eine anschließende Montage mit Handhabungsgeräten durchzuführen. Hierfür sind zusätzlich Geometrie- sowie Technologieparameter erforderlich. Allerdings können die notwendigen Informationen aus dem CAD-Modell automatisch extrahiert werden, was in den folgenden Abschnitten näher erläutert wird.

Die Grundlage für die Informationsgewinnung bilden die Bauteil- bzw. Produktmodelle, die mit Hilfe eines 3D-CAD-Programms, wie z. B. Pro/ENGINEER der Firma PTC oder Catia von IBM/Dassault Systèmes, erstellt worden sind. Prinzipiell kann jedes kommerziell verfügbare Programm verwendet werden, doch bieten die beiden genannten eine sehr umfangreiche Benutzerschnittstelle an, sodass auch auf programmintern verwaltete Variablen, wie beispielsweise GeometrieKenngrößen, Hauptabmessungen, definierte Greifflächen, Fügeprozesse, etc., zugegriffen werden kann.

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten Bauteile sind durchgängig mit dem CAD-Programm Pro/ENGINEER erstellt worden, das die Programmierschnittstelle Pro/TOOLKIT zur Verfügung stellt. Daher war es nahe liegend, die Umsetzung der in Kapitel 4.1 vorgestellten Vorgehensweise zur automatischen Generierung der zeitlichen Montagereihenfolgen mit diesen beiden Programmen durchzuführen. Hierzu wurde der entsprechende Algorithmus in C++ implementiert. Unter Verwendung der von Pro/TOOLKIT angebotenen Funktionen ist es möglich, auf die geometrischen Kenngrößen, wie beispielsweise Koordinatensysteme sowie Durchdringung von zwei Objekten, zuzugreifen und dementsprechend mit zur Auswertung heran zu ziehen. Ferner sind für die autonome Bewegungsplanung z. B. die maximalen Bauteilabmessungen oder die Endlagen der Bauteile im zusammengebauten Zustand von Interesse, um die Fügepositionen sowie die Raumorientierungen zu ermitteln.

Aber nicht nur montagerelevante, sondern auch Zusatzinformationen lassen sich in einem CAD-Modell mit abspeichern. Hierzu hat der Anwender die Möglichkeit, beliebige Ergänzungen mit an das Bauteil anzufügen, die innerhalb eines Unternehmens von Interesse sind. Dazu sind z. B. Bauteiltoleranzen für die Fertigung, Kennzeichnung sicherheitsrelevanter Werkstücke für deren Dokumentation, Kenngrößen für Fügeprozesse etc., zu zählen, um nur einige wenige zu nennen. Demzufolge enthält das

3D-CAD-Modell nicht mehr nur die reinen Geometriedaten, sondern weit darüber hinausgehende Informationen, die firmenintern an verschiedenen Stellen innerhalb des Produktentstehungsprozesses spezifisch genutzt und entsprechend erweitert bzw. neu erstellt werden können.

Montagerelevante Informationsbereitstellung

Damit eine automatische Montage mit Handhabungsgeräten erfolgen kann, sind zunächst alle dafür erforderlichen Informationen bereit zu stellen. Die elementarste davon ist die zeitliche Montagereihenfolge der Bauteile. Hierfür bietet es sich an, die Bauteilbezeichnungen des CAD-Modells weiter zu verwenden, da jedes Werkstück systemintern eine Identifikationsnummer besitzt und somit eindeutig zugeordnet werden kann. Demzufolge lassen sich die automatisch erzeugten chronologischen Reihenfolgen in der Form:

37/38/39/40/41/42/43#

37/38/41/42/39/40/43#

...

darstellen und in einer Textdatei oder dem Produktdatenmanagement-System abspeichern. Der Schrägstrich dient dabei als Separationszeichen zwischen zwei Montageprozessen sowie die Raute als Kennzeichnung einer abgeschlossenen Sequenz. Somit ist eindeutig definiert, in welcher Reihenfolge die einzelnen Bauteile nacheinander montiert werden müssen.

Darüber hinaus sind Positionen innerhalb der Montagezelle von großer Wichtigkeit, an denen die Einzelteile aufgenommen und abgelegt bzw. miteinander gefügt werden. Jeder dieser Punkte wird in 3D durch sechs Koordinaten eindeutig beschrieben: x , y , z , α , β und γ . Des Weiteren ist die Angabe eines zu verwendenden Werkzeugs oder Greifers erforderlich, da z. B. ein zylindrisches Werkstück vorzugsweise mit einem Dreibackengreifer, eines mit parallelen Greifflächen mit einem Parallelbackengreifer gehandhabt wird. Ferner ist die Deklaration des durchzuführenden Fügeprozesses notwendig, der mittels eines eindeutigen Schlüssels zugeordnet werden kann. Dabei bedeutet z. B. der Wert 1, dass es sich um eine Pick&Place-Operation handelt, 2 entspricht einem Schraubvorgang usw.. Dadurch lassen sich beliebige Prozesse realisieren und die dazugehörigen Roboterbewegungen und Aktionen definieren. Somit erhält jedes Bauteil seine spezifischen Informationen in der Form

/Bauteil-ID/Greifer/Pick-Position/Place-Position/Fügeprozess#

/37/1/1703.5/205.0/-47.5/90/0/-90/910.8/540.6/-104.5/90/0/-90/1#

/38/4/1536.2/167.4/-56.5/75/20/-48/45.4/76.9/4.5/130/34.7/-89/1#

...

wobei der erste Wert die im CAD-Modell verwendete Bauteilidentifikationsnummer beschreibt, gefolgt von dem zu verwendenden Greifer, der Pick-, dann der Place-

Position sowie abschließend dem Fügeprozess. Diese Informationen werden ebenfalls entweder in einer Textdatei oder einem PDM-System abgespeichert [119].

Somit stehen sämtliche montagerelevanten Informationen in Form von einfach strukturierten Dateien zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung. Dazu zählen neben der chronologischen Reihenfolge auch geometrische sowie technologische Informationen, die aus dem CAD-Modell automatisch gewonnen werden. Allerdings bestehen zwischen idealem und real gefertigtem Werkstück auf Grund der vorgegebenen Toleranzen sowie Fertigungsverfahren Abweichungen. Normalerweise ist für deren Kompensation der Teach-In-Vorgang erforderlich, der allerdings wiederum sehr zeitintensiv ist. Um nun unmittelbar anschließend eine automatische Montagedurchführung mit Industrierobotern zu ermöglichen, müssen die entsprechenden Korrekturwerte zwischen dem CAD-Modell und den realen Bauteilen selbstständig ermittelt werden, was im nächsten Kapitel erläutert ist.

4.3 Bauteilerkennung und Positionsbestimmung mit dem Laser-scanner

Wie bereits oben dargestellt, sind für die automatische Montage mit Handhabungsgeräten neben der chronologischen Reihenfolge die entsprechende Bauteilgeometrie und hierbei insbesondere Positionsangaben für die Greif- und Ablagepunkte unerlässlich. Bisher erfolgt vor dem eigentlichen Montageprozess ein so genanntes Teach-In. Dabei wird der Roboter vom Anwender mittels des Handbediengerätes manuell von Punkt zu Punkt gesteuert und sämtliche Aufnahme- und Ablagepositionen werden im Raum exakt angefahren und abgespeichert. Diese Vorgehensweise ist sehr zeitaufwändig und stellt somit einen Widerspruch hinsichtlich der Verkürzung des Montageprozesses dar. Während dieser Tätigkeit werden jedoch lediglich Geometrieinformationen abgespeichert, die ebenfalls in der CAD-Zeichnung hinterlegt sind. Aus diesem Grund kann das dreidimensionale Zusammenstellungsmodell als Datengrundlage verwendet werden (vgl. auch Kapitel 4.2). Allerdings kommt es wegen Fertigungstoleranzen bei den realen Bauteilen im Vergleich zum Modell zu Form-, Lage- und Maßabweichungen. Diese führen ohne entsprechende Korrektur beim eigentlichen Montageprozess meist zu einem fehlerhaften Ablauf, demzufolge zu einer ungewollten Störung und somit zu einem unerwünschten sowie unwirtschaftlichen Anlagenstillstand. Deswegen müssen das zulässige Toleranzfenster eng und die Bauteilbereitstellung sehr präzise gewählt werden, was mit einem erhöhten Fertigungs-, Positionier- und somit Kostenaufwand verbunden ist.

Damit die Bauteilbereitstellung und -zuführung einfacher und flexibler gestaltet werden kann, besteht der hier angewandte Lösungsansatz darin, unmittelbar vor Durchführung der Sequenz alle Einzelteile zu erkennen, zu vermessen und aus den gewonnenen Daten die erforderlichen Merkmale zu extrahieren. Somit lässt sich der Teach-In-Vorgang vermeiden, da die Positionen direkt vor der Montageausführung automatisch detektiert werden.

Die Flexibilität kann demzufolge durch den Einsatz einer geeigneten Sensorik nachhaltig gesteigert werden. Im Bereich der Robotik werden verstärkt Sensoren zur Nahtverfolgung während des Schweißprozesses [154] oder Klebstoffauftrags sowie 6D-Kraft-Momenten-Sensoren für Korrekturbewegungen bei Fügeprozessen eingesetzt [19, 151]. Dadurch lassen sich kleine Abweichungen, die erst während der Bewegungsausführung erkannt werden, selbstständig korrigieren, sodass ein gleich bleibendes Qualitätsniveau sichergestellt ist [108].

Im Bereich der Automatisierungstechnik kommen verstärkt Bildverarbeitungssysteme zum Einsatz, mit denen Mess- und Überwachungsaufgaben automatisiert durchgeführt werden und somit den Prozess in Bezug auf mögliche Fehlerquellen sicherer gestalten. Allerdings sind derartige Systeme hinsichtlich äußerer Einflüsse, wie z. B. Licht, Verschmutzungen etc. äußerst störanfällig. Demgegenüber etablieren sich auf dem Markt in zunehmendem Maße Laserscanner, die ebenfalls für Überwachungs- und Kontrollaufgaben, wie beispielsweise die Vermessung der Maßhaltigkeit eines Endlosprofils o. ä., eingesetzt werden. Für die Realisierung des in Kapitel 3 vorgestellten Montagekonzepts ist es demzufolge unumgänglich, ein Sensorsystem mit zu integrieren, um damit eine schnelle Inbetriebnahme der Anlage durch die automatische Positionsbestimmung aller Bauteile zu ermöglichen und infolgedessen den Anwender bei der Programmierung zu entlasten sowie den erforderlichen Zeitbedarf zu reduzieren.

4.3.1 Kamerasystem vs. Laserscanner

Mit Hilfe von einer oder mehreren CCD-Kameras (CCD = charge-coupled device) sowie eines Bildverarbeitungssystems lassen sich Objekte unterschiedlichster Art erfassen. Anhand einer Lernroutine werden zu Beginn die verschiedenen Werkstücke eintrainiert, d. h. die unterschiedlichen Geometriemerkmale gespeichert. Des Weiteren können Regionen auf dem Bauteil, die von wichtiger Bedeutung sind, genauer betrachtet und näher spezifiziert werden, wie z. B. bei der Überprüfung eines korrekt aufgetragenen Schriftzuges. Durch den Einsatz verschiedener Objektive lassen sich von Total- bis Makroaufnahmen die unterschiedlichsten Einstellungen realisieren [84].

Als nachteilig erweist sich bei CCD-Kamerasystemen allerdings die sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Fremdlicht. Aus diesem Grund wird durch Zusatzbeleuchtung, spezielle Lichtfarben oder UV-Licht versucht, die Störlichteinflüsse weitgehend zu eliminieren, um somit gleich bleibende Bedingungen herbeizuführen. Oftmals kommt eine „Black-Box“ zum Einsatz, in der die zu untersuchenden Teile unter Ausschluss von Tages- und Fremdlicht von einem optischen System detektiert werden. Ein weiterer Nachteil der vorwiegend eingesetzten CCD-Kameratechnik ist die Objektdarstellung in lediglich zwei Raumdimensionen. Demzufolge verlieren alle Bauteile ihre Höheninformation, was allerdings insbesondere für die automatische Bestimmung der Greif- oder Fügepositionen von entscheidender Bedeutung ist. Dieser Nachteil lässt sich lediglich mit Hilfe eines sehr teuren sowie aufwändig zu installierenden und empfindlichen Stereokamerasystems vermeiden. Hierbei wird die Objektsilhouette von

mehreren Kameras gleichzeitig aufgenommen. Charakteristische Punkte im Raum dienen als Bezugsgrößen, sodass auf Grund der redundanten Bildinformationen ein 3D-Bild erzeugt werden kann [41, 88].

Völlig unabhängig vom Tageslicht und dem Problem der Zweidimensionalität arbeitet hingegen ein Laserscanner. Das Messverfahren beruht hierbei auf dem Triangulationsprinzip, d. h. der Laufzeitmessung eines ausgesandten Lichtstrahls. Daraus kann anschließend die zurückgelegte Entfernung ermittelt werden. Wenn der Laserstrahl zusätzlich noch über eine entsprechende Optik bzw. rotierendes Prisma in eine Linie aufgespaltet wird, so lässt sich damit bereits ein Höhenprofil entlang einer Geraden erkennen. Typischer Anwendungsfall ist beispielsweise die Überwachung der Maßhaltigkeit eines Werkstücks, sodass Fehler während des Herstellungsprozesses bereits frühzeitig bemerkt werden.

Für die zeitliche Verkürzung der Montageplanung ist neben der chronologischen Reihenfolge (vgl. Kapitel 4.1) die Angabe von Aufnahme- und Ablagepositionen der Bauteile für die anschließende automatische Durchführung mit Handhabungsgeräten unerlässlich. Mit Hilfe eines Laserscanners können genau diese montagerelevanten Informationen vollautomatisch ermittelt werden. Hierbei wird ein Werkstückträger mit den darauf befindlichen Bauteilen dreidimensional erfasst und in ein rechnerinternes Modell abgebildet. Damit kann sodann die Identifikation der Werkstücke erfolgen und im Anschluss daran deren Position auf der Palette in Bezug auf ein Referenzkoordinatensystem bestimmt werden. Auf diese Art und Weise lässt sich der ansonsten sehr zeitintensive und unerlässliche Teach-In-Prozess vermeiden. Darüber hinaus ist ein 2D-Scanner in der Lage, auch die Höheninformation eines Werkstückes zu liefern, die für das selbstständige Greifen mit einem Roboter von wesentlicher Bedeutung ist. Aus diesem Grund wurde der Laserscanner einem konventionellen Kamerasystem vorgezogen und mit in die am Lehrstuhl aufgebaute Montagezelle integriert.

4.3.2 Integration des Laserscanners in die Montagezelle

Für die Bauteilerkennung und die Positionsbestimmung der Werkstücke auf der Palette wird der Laserscanner vom Typ scanControl LLT 2800-100 der Firma Micro-Epsilon verwendet. Er zeichnet sich durch einen maximalen Messbereich von 100 mm in z-Richtung bei einer Auflösung von 40 μm aus. Die damit erreichbare Genauigkeit ist ausreichend, um das jeweilige Bauteil mit einem Handhabungsgerät zu greifen, dessen Positioniergenauigkeit üblicherweise im Bereich von Zehntelmillimetern liegt.

Auf Grund der punktförmigen Laserstrahlquelle und dem Aufspalten in eine Linie ergibt sich im so genannten erweiterten Messbereich eine maximale Linienbreite von 140 mm (Bild 22 links). Demzufolge kann mit nur einem Sensor die im Einsatz befindliche Palette mit einer Breite von 640 mm lediglich teilweise erfasst werden. Daher ist der Scanner zusätzlich in y-Richtung beweglich an einer Traverse fixiert, die das Doppelgurttransportband überspannt. Der auf einer Linearführung montierte Sensor kann mittels eines Getriebemotors, der durch einen Mikrocontroller angesteuert wird, um die

gewünschte Scannbreite translatorisch verschoben werden, sodass sich die gesamte Palettenbreite detektieren lässt. Auf Grund der zusätzlichen Linearbewegung des Werkstückträgers auf dem Transportband kann somit die gesamte Palette in alle drei Raumrichtungen erfasst werden. Da sich diese sequenzielle Vorgehensweise allerdings negativ auf die angestrebte Verkürzung der Taktzeit auswirkt, besteht die Möglichkeit, diesen Nachteil durch die Integration mehrerer entlang der Traverse parallel angeordneter Laserscanner sehr einfach zu kompensieren.

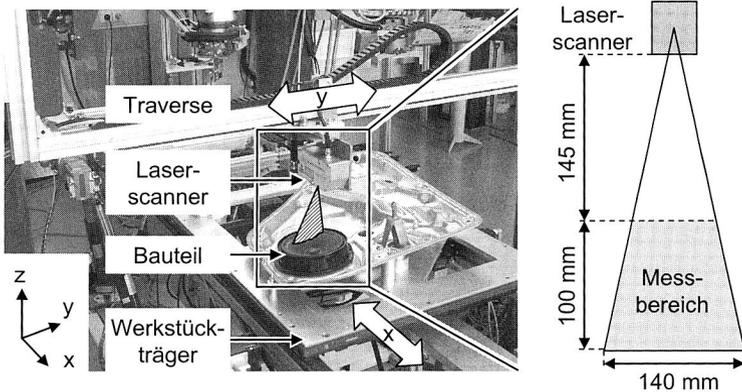


Bild 22: Integration des 2D-Laserscanners in die Roboterzelle zum Vermessen der zu montierenden Bauteile unmittelbar vor dem eigentlichen Montageprozess

Spezifische Eigenschaften des Laserscanners

Die maximale Breite der Laserlinie beträgt 140 mm, doch sobald ein Objekt mit einer Höhe h detektiert wird, verringert sich deren Länge auf Grund des dreieckförmigen Messbereichs:

$$\text{maximale Scannbreite} = \frac{140 \text{ mm} \cdot (245 \text{ mm} - h)}{245 \text{ mm}} \quad (5)$$

Demzufolge nimmt die Laserlinienlänge mit zunehmender Höhe des zu vermessenden Objektes, an dem der Strahl reflektiert wird, proportional ab. Im vorhergehenden Abschnitt wurde bereits dargelegt, dass die gesamte Palette in mehreren Streifen erfasst wird. Um eine lückenlose Detektion des Werkstückträgers zu erzielen, müssen sich die Ränder von zwei aufeinander folgenden Scannprozessen überlappen, indem die Translation des Laserscanners an der Traverse um z. B. jeweils lediglich 100 mm erfolgt. Der Nachteil bei dieser Vorgehensweise besteht allerdings darin, dass es auf Grund der äquidistanten Abstände von 100 mm bei der Erfassung von Bauteilen ab einer Höhe von 70 mm zu Abschattungseffekten kommt, sodass Randbereiche an den Objekten nicht detektiert werden können (Bild 23 Mitte).

Der Abschattungseffekt, resultierend aus der Veränderung der Scannbreite in Abhängigkeit von der Objekthöhe, kann durch eine Reduzierung der Translation des Lasersensors verringert werden. Durch eine Adaption der Schrittweite als Funktion der maximal erfassten Höhe lassen sich derartige Informationsverluste vermeiden (Bild 23 rechts). Dies führt allerdings zu einer Erhöhung der Anzahl an erforderlichen Detektionsvorgängen und demzufolge steigt auch die daraus resultierende Taktzeit. Aus diesem Grund gilt es einen Kompromiss zwischen Anzahl an Scannprozessen und Abschattung einzugehen.

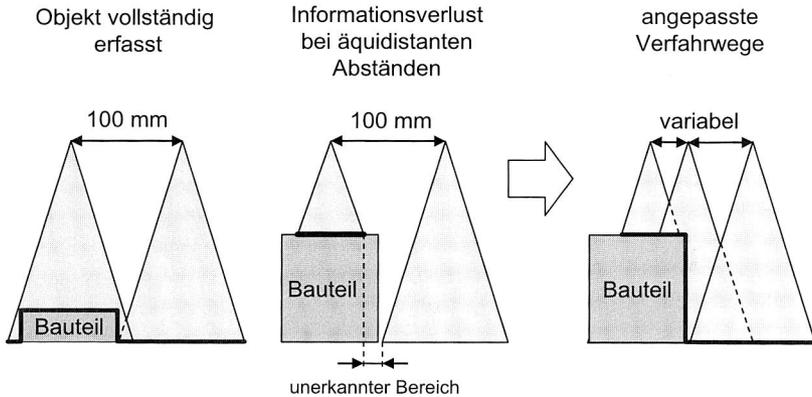


Bild 23: Informationsverlust bei äquidistanten Verfahrenswegen des Laserscanners, der durch Schrittweitenadaption kompensiert werden kann

4.3.3 Vollautomatische Positionsbestimmung der Bauteile auf dem Werkstückträger und innerhalb der Montagezelle

Nachdem die Palette mit den darauf befindlichen Werkstücken abgescannt wurde, können die einzelnen Streifen zu einem rechnerinternen Abbild zusammengesetzt werden. Dieses dient sodann als Basis für die weiteren Analysen wie Bauteilidentifikation und Positionsbestimmung.

Als Grundlage für die Erkennung der Werkstücke findet erneut das 3D-CAD-Modell Verwendung, aus dem jeweils die Seitenansichten der unterschiedlichen Bauteile ausgeleitet werden. Anhand der Referenzobjekte sowie verschiedener daraus extrahierter geometrischer Merkmale lassen sich mit Hilfe einer Bildverarbeitungssoftware die entsprechenden Werkstücke im rechnerinternen Datenmodell des Werkstückträgers wieder finden. Auf diese Weise können alle Bauteile mit ihrer eindeutigen Identifikationsnummer aus Pro/ENGINEER den gescannten Objekten auf der Palette zugeordnet werden, sodass sich anschließend deren Positionen sowie Drehung und Orientierung bestimmen lassen.

Wegen des immer gleich bleibenden Scanvorgangs in Verbindung mit einer festen Spannstation für den Werkstückträger innerhalb der Montagezelle lässt sich ebenfalls die Position der Bauteile in Bezug auf ein Referenzkoordinatensystem bzw. des Handhabungsgerätes automatisch ermitteln. Dazu dient wiederum das CAD-Modell, in dem mögliche Greifflächen festgelegt wurden. In Verbindung mit charakteristischen Merkmalen, wie beispielsweise Löchern oder Bauteilkonturen, können diese ebenfalls im rechnerinternen Scannmodell identifiziert werden.

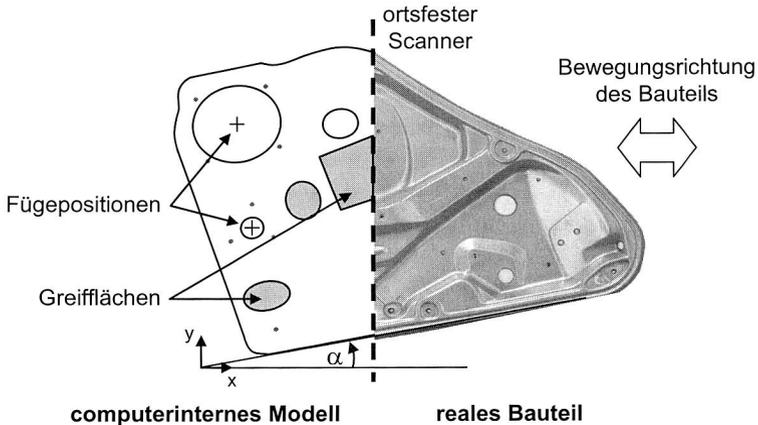


Bild 24: Aus dem rechnerinternen Abbild lassen sich Fügepositionen sowie die Verdrehung und Greifflächen in Bezug auf ein Referenzkoordinatensystem automatisch bestimmen

Unter Zuhilfenahme eines einmalig festgelegten Umrechnungsfaktors, der sich aus der Geschwindigkeit des Transportbandes und der Frequenz an Profilaufnahmen des Lasersensors ergibt, können einzelne Werte in Form von Bildpixeln in x-, y- und z-Koordinaten umgerechnet werden. Somit lässt sich für jedes Bauteil die entsprechende Greifposition bestimmen und anschließend anhand der zuvor ermittelten ID-Nummer in die jeweilige Zeile der Textdatei an die Pick-Position schreiben (vgl. Kapitel 4.2). Durch analoge Vorgehensweise können ebenfalls die Place-Positionen generiert werden. Als Software kommt das Programm Common Vision Blox der Firma Stemmer Imaging zum Einsatz, da es wiederum über eine in C++ programmierbare Anwenderschnittstelle CVB iTuition verfügt und demzufolge die entsprechenden Positionen mittels geeigneter Algorithmen automatisch extrahiert und weiterverarbeitet werden können.

Auf diese Weise ist es möglich, sämtliche Bauteile sowie deren Greifpositionen vollautomatisch zu bestimmen. Deshalb müssen die Werkstücke nicht mehr in aufwändigen und meist sehr kapitalintensiven Werkstückträgern bereitgestellt werden, sondern es ist ausreichend, die Bauteile lose auf eine Palette zu legen und diese

abzuscannen. Ebenso lässt sich der Teach-In-Prozess vermeiden, da die jeweiligen Pick-Positionen unmittelbar vor der Montage mit den Robotern bestimmt werden. Die Werte gilt es dann in Form einer Textdatei bzw. mit dem PDM-System weiter zu verarbeiten, sodass die Handhabungsgeräte die richtigen Bauteile an der entsprechenden Stelle innerhalb der Montagezelle selbstständig greifen und montieren können.

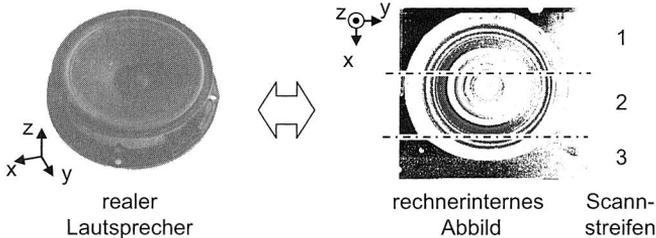


Bild 25: Überführung von realen Bauteilen mittels mehrerer Scannstreifen in ein zusammengesetztes Bild, das für die Bauteilidentifikation dient, aber zusätzlich noch die Höheninformation enthält

4.4 Ermittlung der Montagereihenfolge mit der kürzesten Taktzeit

Die automatisch ermittelten Montagereihenfolgen lassen sich in vielfältiger Weise grafisch darstellen. Hierzu eignen sich z. B. Gantt-Diagramme, Petri-Netze, And/Or-, Gozinto- oder Vorranggrafen (vgl. Bild 18). Für die maschinelle Weiterverarbeitung ist es jedoch einfacher, jeweils eine mögliche Abfolge aller Montageschritte in Form einer Sequenz abzubilden. Sobald mehrere gültige Varianten existieren, ist a priori nicht bekannt, welche am besten geeignet ist. Dafür ist eine frei wählbare Gewichtungsfunktion erforderlich, mit der jede Reihenfolge bewertet wird. Als Kriterien dienen oftmals die erforderliche Zeit, Länge der zurückgelegten Fahrwege, Anzahl an Greiferwechsel, erforderlicher Platzbedarf etc. [5, 70, 74].

Auf Grund der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist insbesondere die Zeitdauer für die Montage des Endproduktes, auch als Taktzeit bezeichnet, von essentieller Bedeutung. Existieren nun mehrere zulässige Sequenzen, so gilt es diejenige mit der kürzesten Taktzeit auszuwählen. Hierfür lässt sich z. B. eine kommerziell verfügbare Kinematiksimulation verwenden, mit deren Hilfe die einzelnen Bewegungsabläufe der Handhabungsgeräte nachgebildet werden und somit auch die erforderliche Bearbeitungszeit bestimmt wird. Jedoch ist diese Vorgehensweise durch eine Vielzahl an manuellen Tätigkeiten gekennzeichnet. So muss beispielsweise die Programmierung der Roboter durch den Anwender erfolgen, was mit einem hohen zeitlichen Aufwand verbunden ist. Allerdings sind auf diese Art und Weise sehr präzise Aussagen über die zu erwartende Taktzeit möglich, da mit Hilfe von hinterlegten Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsprofilen für die verwendete Roboterkinematik ein exaktes Bewegungsprofil erstellt und daraus die erforderliche Zeitdauer ermittelt werden kann.

Eine Alternative besteht darin, den gesamten Montagevorgang in Elementarschritte aufzuteilen, denen jeweils definierte Zeitspannen zugewiesen werden können. Bei der manuellen Montage wären dies Hinlangen, Bringen, Greifen, Fügen und Trennen. Für die Ermittlung der jeweiligen Zeiten existieren unterschiedliche Methoden, wie beispielsweise AWF (Ausschuss für wirtschaftliche Fertigung), REFA (Reichsausschuss für Arbeitszeitermittlung) oder MTM (Methods-Time Measurement) etc., die allerdings eine sehr detaillierte Beschreibung der Vorgänge voraussetzen [42, 45]. Kennzeichnend für die Zeitermittlung ist dabei wiederum die überwiegend manuelle Vorgehensweise, die allerdings zunehmend durch den Rechneinsatz unterstützt wird [85].

Zur Taktzeitermittlung bei der automatisierten Montage mit Industrierobotern kann der Katalog der Einzelprozesse in erster Näherung auf einige wenige beschränkt werden. Dazu zählen das Greifen eines Bauteils, der Greiferwechsel sowie das Fahren zu einem Montagepunkt (siehe auch Bild 58). Sobald nun jedem Elementarschritt eine Zeitdauer zugewiesen ist, kann auf Grund der zurückzulegenden Bewegungsbahnen sowie Anzahl an Greiferwechseln automatisch die zu erwartende Taktzeit für eine Montagesequenz berechnet werden.

Bei der Ermittlung der Zeiten für die Elementarschritte hat sich herausgestellt, dass ein Greiferwechsel im Verhältnis zu einer freien Fahrbewegung auf einen Zielpunkt oder dem Greifen bzw. Loslassen eines Werkstückes etwa drei Mal so lange andauert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass innerhalb der Greiferbereitstellungszone erhöhtes Kollisionsrisiko besteht und deswegen die Roboterbewegung mit einer wesentlich geringeren Verfahrensgeschwindigkeit durchgeführt wird.

4.5 Zusammenfassung

Mit Hilfe der CAD-gestützten Montageplanung besteht die Möglichkeit, auf der Grundlage des Zusammenstellungsmodells alle relevanten Informationen für den sich anschließenden Montageprozess bereitzustellen. Hierfür sind grundsätzliche Algorithmen bekannt, die auf Basis der Kollisionserkennung sowie dem Prinzip „Montage durch Demontage“, ausgehend vom 3D-Modell alle chronologischen Montagesequenzen für die betrachtete Baugruppe generieren. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit dienen diese als Ausgangspunkt für eine entsprechende Weiterentwicklung, wobei zusätzlich verschiedene Randbedingungen, wie z. B. eingesetztes Handhabungsgerät, Verbindungsfestigkeit zwischen zwei Objekten oder mögliche Greifflächen an Bauteilen, berücksichtigt werden können. Die zeitliche Reihenfolge bildet die Grundlage für eine automatisierte Montage mit Industrierobotern, jedoch werden durch sie lediglich die Vorgänger-/Nachfolgerbeziehungen festgelegt, sodass damit allein noch kein selbstständiger Prozessablauf umsetzbar wäre.

Aus diesem Grund wurden geeignete Mechanismen entwickelt, um sowohl geometrische als auch prozessspezifische Informationen bereitzustellen. Dazu zählen insbesondere Ortsangaben für die Abhol- und Fügepositionen von Bauteilen. Darüber hinaus können zusätzlich noch der Fügeprozess definiert und technologische

Parameter im Datenmodell in Form von semantischen Informationen mit hinterlegt sein, wie z. B. zulässiges Drehmoment, Nietkraft etc., die mit ausgewertet und berücksichtigt werden müssen. Alle Daten werden vollautomatisch generiert, extrahiert und im PDM-System oder in Form von ASCII-Textdateien für die Weiterverwendung und -verarbeitung bereitgestellt, sodass mit Hilfe der entwickelten CAD-gestützten Montageplanung eine nachhaltige Verkürzung der Prozesskette erzielt werden kann.

Sobald mehrere gültige Montagereihenfolgen existieren, gilt es diejenige mit der geringsten Taktzeit zu bestimmen. Dazu wird unter Zuhilfenahme einer eigens entwickelten Simulationsumgebung die Montagesequenz in ihre Elementarschritte zerlegt. Diese lassen sich in Greifen eines Bauteils, Greiferwechsel sowie Fahren zu einem Montagepunkt untergliedern. Auf Grund von hinterlegten Zeiten sowie der Berechnung der zurückzulegenden Entfernungen lässt sich so auf einfache Art und Weise die zu erwartende Taktzeit berechnen. Dabei hat sich herausgestellt, dass weniger die Verfahrbewegungen des bei der Montage zum Einsatz kommenden Industrieroboters optimiert werden müssen, als vielmehr die Anzahl an erforderlichen Greiferwechseln, die die Gesamtzeit weitaus mehr beeinflussen.

Darüber hinaus lässt sich in Vorbereitung auf die Montage der Teach-In-Prozess vollständig vermeiden, indem ein Sensorsystem die zu montierenden Bauteile detektiert. Hierbei kommt ein 2D-Laserscanner zum Einsatz, der den in die Zelle einfahrenden Werkstückträger erfasst und daraus ein rechnerinternes Modell generiert. Im Gegensatz zu einem herkömmlichen Kamerasystem, das lediglich zwei Raumdimensionen abbildet, bietet der Scanner den Vorteil der dreidimensionalen Bauteilvermessung. Auf Grund der zusätzlichen Höheninformation lassen sich die realen Bauteile durch eine Objekterkennung eindeutig identifizieren. Des Weiteren ist es nicht mehr erforderlich, die Werkstücke in speziellen Formnestern oder Blistern zuzuführen, sondern es ist ausreichend, diese lose auf einer Standardpalette zu positionieren. Die jeweilige Greif- und Ablageposition wird automatisch in Bezug auf ein Referenzkoordinatensystem in Abhängigkeit der Bauteillage und -orientierung von der entwickelten Auswertesoftware bestimmt.

Die Kombination aus der automatischen Generierung von chronologischer Montagereihenfolge sowie den Abhol- und Fügepositionen aller Bauteile hat zur Folge, dass die Montageplanung nicht mehr manuell, sondern vollständig rechnergestützt erfolgt. Dadurch gestaltet sie sich äußerst robust und erfordert im Vergleich zur manuellen Vorgehensweise lediglich einen Bruchteil der Zeit. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit der hier vorgestellten CAD-gestützten Montageplanung die erforderliche Grundlage geschaffen wurde, damit sich daran eine vollautomatische Prozessausführung mit Handhabungsgeräten, insbesondere mit kooperierenden Industrierobotern, anschließen kann. Die Basis hierfür bilden kollisionsfreie Bewegungen der Handhabungsgeräte, die mit Hilfe von autonomen Bahnplanern erstellt und im folgenden Kapitel näher erläutert werden.

5 Autonome Bahnplanung für Industrieroboter

Bei der Programmierung von Industrierobotern gilt es zwischen zwei grundlegenden Methoden, dem Online- und Offline-Verfahren, zu unterscheiden. Die am meisten angewandte Vorgehensweise ist das so genannte Teach-In, das zu den Online-Verfahren zählt. Dabei wird der Effektor in der realen Zelle vom Anwender mittels des Handbediengeräts manuell bewegt und die gewünschte Bahn oder Trajektorie abgefahren sowie währenddessen alle erforderlichen Stützpunkte abgespeichert. Der dabei entstehende Punktezug wird noch durch Verfahrensanweisungen und Technologiefunktionen ergänzt, sodass ein Ablaufprogramm entsteht, das anschließend von der Steuerung interpretiert und ausgeführt werden kann. Die Programmierung erfolgt hierbei ausschließlich von Hand und demzufolge muss der Anwender dafür Sorge tragen, dass die von ihm erstellte Trajektorie auch kollisionsfrei ist. Das Teach-In wird daher für die Erstellung von einfachen Programmabläufen oder zur Nachjustage von Positionen verwendet. Nachteilig erweist sich hierbei jedoch der hohe zeitliche Aufwand, da während des gesamten Vorganges an der realen Zelle gearbeitet wird, wodurch ein stillstandsbedingter Anlagen- und damit verbundener Produktionsausfall die Folge ist.

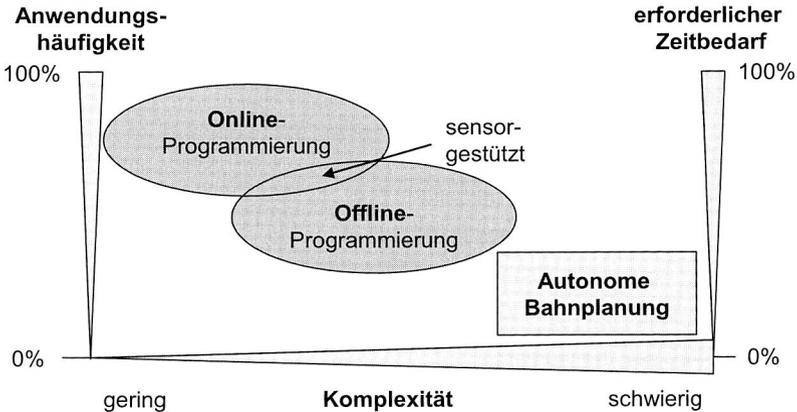


Bild 26: Überblick und Einordnung unterschiedlicher manueller und automatischer Programmiermöglichkeiten für Industrieroboter

Der durch die Belegung der realen Anlage entstehende und nicht unerhebliche Zeitverlust kann mittels der Offline-Programmierung vermindert werden. Hierzu ist zunächst ein Modell der Montage- oder Fertigungszelle für eine Kinematiksimulation erforderlich. Anschließend besteht für den Anwender die Möglichkeit, den gewünschten Programmablauf in der virtuellen Welt sowie die dafür erforderlichen Roboterbewegungen zu definieren. Allerdings erfolgt die Programmierung wiederum manuell.

Ein Nachteil dieses Verfahrens ist darin zu sehen, dass zwischen dem Modell und der Montagezelle immer geometrische Abweichungen vorhanden sind. Dies wirkt sich insbesondere auf die Greif- und Ablagepositionen aus, sodass die Bauteile nicht korrekt gegriffen bzw. positioniert würden. Deswegen ist zusätzlich noch ein Teach-In der Punkte an der realen Anlage erforderlich. Der dadurch bedingte Produktionsstillstand fällt im Vergleich zum Online-Verfahren allerdings wesentlich geringer aus, sodass sich die Investitionskosten für eine Kinematiksimulation meist schnell amortisieren [81]. Vielfach sind jedoch neben einfachen Pick&Place-Aufgaben auch komplizierte Bahnen auf Freiformflächen erforderlich, wie dies z. B. beim Schweißen, Kleben oder Lackieren der Fall ist. Durch die Verwendung der CAD-Bauteilmodelle als Planungsgrundlage, der Definition der abzufahrenden Bahn auf der Oberfläche sowie geeigneter Prä- und Postprozessoren lassen sich daraus automatisch die entsprechenden Bewegungsbahnen ableiten, sodass die Vielzahl an erforderlichen Stützpunkten nicht einzeln eingeteacht werden müssen, was zu einer wesentlichen Arbeiterleichterung beiträgt [147].

Um den Abgleich zwischen Realität und Simulation zu beschleunigen und zu vereinfachen, besteht die Möglichkeit, die so genannte sensorgestützte Programmierung anzuwenden. Hierbei werden mit Hilfe eines Sensorsystems die Bauteile und deren räumliche Orientierungen automatisch erkannt. Daraus können zwischen den Offline definierten Positionen sowie real gemessenen entsprechende Korrekturwerte bestimmt werden, die sodann zur Laufzeit in die Robotersteuerung zurückgekoppelt und der Bewegung überlagert werden. Somit lassen sich die Vorteile der Offline-Programmierung in Kombination mit einer automatischen Bewegungsanpassung zur Laufzeit und einem damit einhergehenden verminderten Zeitaufwand vereinen.

Unabhängig vom eingesetzten Programmierverfahren, von denen jedes durch eine Vielzahl an manuellen Tätigkeiten gekennzeichnet ist, muss die Bewegungsbahn des Roboters durch den Anwender vorgegeben werden. Darüber hinaus ist er dafür verantwortlich, dass die Trajektorie kollisionsfrei ist, was sich bei anspruchsvollen Anlagen mit z. B. externen Zusatzachsen, komplexen Bewegungsabfolgen etc., als schwierig erweist. Zwar lassen sich potentielle Gefahrenquellen bereits anhand der Simulation erkennen und beseitigen, doch finale Tests an der realen Anlage sind unerlässlich.

Der besonderen Bedeutung einer kollisionsfreien Bewegung wird bei Multiroboteranlagen ein noch höherer Stellenwert zugeschrieben, denn hier müssen auf engstem Raum mehrere bewegliche Kinematiken kontrolliert werden. Deutlich wird dies z. B. bei der Übergabe eines Bauteils zwischen zwei Robotern, wie in Bild 27 dargestellt. Der konventionelle Lösungsansatz besteht darin, das Bauteil auf einen Ablageplatz zwischen zu puffern und anschließend von dort wegzugreifen. Dadurch wird allerdings ein erhöhter Platz- und Zeitbedarf benötigt und außerdem die Leistungsfähigkeit einer Multiroboteranlage nicht ausgenutzt. Um dieses „shake hand“ zu ermöglichen, ist eine einfache Kommunikation, z. B. mit digitalen Ein-/Ausgängen, erforderlich, mit der ein gegenseitiger Ausschluss (Mutual Exclusion) des Befahrens der Übergabezone umgesetzt werden kann.

Roboterhersteller haben diese Problematik erkannt und versuchen mit Hilfe von Master-Slave-Anlagen eine derart aufwändige Programmierung zu vermeiden. Durch die Kopplung der Steuerungen besteht die Möglichkeit, die Bewegungsabfolgen der Roboter mit Hilfe von so genannten Synchronisationspunkten aufeinander abzustimmen (vgl. Kapitel 2.3) oder die Programmierung mit Hilfe eines virtuellen Masters zu vereinfachen. Allerdings ist auch hier wieder der Anwender dafür verantwortlich, dass die Trajektorien für alle Handhabungsgeräte kollisionsfrei sind. Insbesondere, wenn die Roboter voneinander unabhängige Bahnen abfahren bzw. Bewegungen durchführen sollen, erweist sich die Programmierung als sehr schwierig sowie fehleranfällig und kann selbst von erfahrenen Spezialisten nur durch eine Vielzahl von Testläufen bewerkstelligt werden, was wiederum zu einem hohen zeitlichen Aufwand führt.

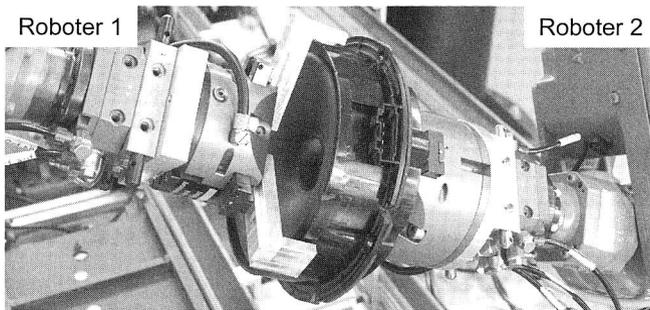


Bild 27: Bauteilübergabe als möglicher Prozessschritt unter Verwendung von kooperierenden Industrierobotern mit autonomer Bahnplanung

Mit Hilfe von autonomen Bahnplanern lässt sich allerdings der manuelle Programmieraufwand nachhaltig reduzieren. Hierbei muss der Anwender lediglich noch den Start- und Endpunkt einer Bewegung definieren, woraufhin eine kollisionsfreie Trajektorie auf Grund des hinterlegten Zellenmodells bestimmt wird. Insbesondere bei der Bewegungsplanung in Multiroboterzellen bzw. für kooperierende Industrieroboter wird die Leistungsfähigkeit von automatischen Bahnplanern deutlich, da hier wegen der kompakten räumlichen Anordnung permanent die Gefahr eines Zusammenstoßes besteht und demzufolge der Programmierer wesentlich entlastet werden kann.

Die Hauptaufgabe eines selbstständigen Bewegungsplaners besteht demzufolge darin, einen Weg zwischen einem Start- und Zielpunkt zu finden und währenddessen sicherzustellen, dass es zu keiner Kollision zwischen dem Roboter und anderen Objekten kommt, die sich im Arbeitsraum befinden, wie beispielsweise Transportbänder, Haltevorrichtungen, Maschinenteile oder andere Effektoren. Sollten mehrere Trajektorien möglich sein, so muss der Bahnplaner in der Lage sein, die am besten geeignete Bewegung zu ermitteln. Hierzu müssen von Anwenderseite entsprechende Kriterien, so genannte Gewichtungsfunktionen, für die Auswahl definiert und vorgegeben werden. Als Entscheidungsgrundlage dient z. B. die Länge der zurückgelegten

Strecke, die erforderliche Ausführungszeit oder die geringste Gelenkbelastung, um nur einige zu nennen.

Meistens kommen autonome Bahnplaner bei der Navigation von fahrerlosen Fahrzeugen in unbekanntem Terrain zum Einsatz, wie dies z. B. bei Gebäudeüberwachungsrobotern oder Planetenerkundungsfahrzeugen der Fall ist [138]. Allerdings lassen sich diese Grundprinzipien auch auf Industrieroboter übertragen und deshalb werden im Folgenden die verschiedenen Mechanismen und Verfahren näher erläutert, wobei auf die Besonderheiten bei der Bewegungsplanung von Handhabungsgeräten explizit eingegangen wird.

5.1 Autonome Bahnplanungsmechanismen

In der Literatur ist eine Vielzahl an unterschiedlichen Bahnplanern zu finden, die sich jedoch alle auf drei wesentliche Grundprinzipien zurückführen lassen: Landkarten-, Zellzerlegungs- und Potentialfeldmethode (vgl. Bild 28) [43, 44, 67, 68]. Zur Verdeutlichung der Funktionsweise sowie Unterschiede zwischen den einzelnen Verfahren, die im Folgenden vorgestellt sind, soll zunächst angenommen werden, dass es sich bei dem betrachteten Roboter um ein so genanntes „Free Flying Object“ handelt, d. h. er kann als Punkt repräsentiert werden, sich auf der Stelle drehen und in alle Raumrichtungen bewegen.

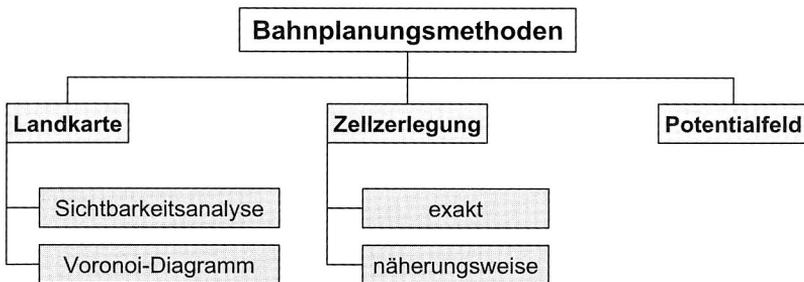


Bild 28: Unterteilung der Bahnplanungsverfahren in die wichtigsten Vertreter

Das Gebiet, in dem sich der Roboter bewegt, wird als Bewegungs- oder Arbeitsraum definiert. Alle anderen Objekte, die sich ebenfalls in diesem Bereich befinden und mit denen er während seiner Bewegungsausführung nicht zusammenstoßen darf, sind als Hindernisse H_i anzusehen. Die Bahn eines Roboters ist im Zweidimensionalen eine orientierte Bewegungskurve und wird im Dreidimensionalen auch Trajektorie genannt. Die eindeutige Beschreibung der Start- und Endpunkte erfolgt in 2D durch die drei Parameter x , y sowie der Drehung yaw um die Flächennormale. Im dreidimensionalen Raum sind hierfür drei Längenangaben x , y und z sowie die räumliche Orientierung, beschrieben durch die Winkel α , β und γ erforderlich. Bei der Drehung eines Objektes um die Achsen des Bezugkoordinatensystems, ist die Einhaltung einer definierten

Reihenfolge von Bedeutung, da ansonsten unterschiedliche Endlagen – trotz gleicher Drehwinkel – erzielt werden. Aus diesem Grund sind die Winkel auch oft als yaw, pitch und roll bezeichnet. Hierbei ist von vornherein vereinbart, dass das Objekt zunächst um die z-, dann die neue y- und abschließend die neue z-Achse jeweils um die Winkel α , β und γ gedreht wird.

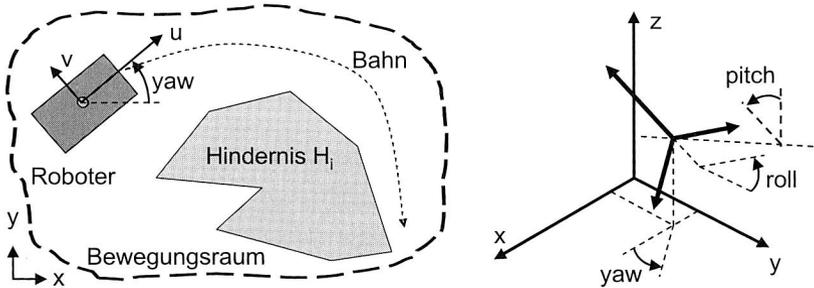


Bild 29: Erklärung von Grundbegriffen für die 2D (links) und 3D (rechts) Problemstellung der autonomen Bahnplanung

5.1.1 Landkartenmethode

Bahnplaner für Fahrzeuge oder Roboter, die sich in einem unbekanntem Terrain orientieren und navigieren sollen, basieren häufig auf der Landkartenmethode. Während der Bewegungsausführung wird durch entsprechende Sensoren der das Fahrzeug umgebende Nahbereich erfasst und somit die Umgebung kartografiert. Vorher nicht bekannte Hindernisse lassen sich auf diese Weise während der Laufzeit detektieren und bei der Wegplanung berücksichtigen. Demzufolge können die Routen der Roboter auch bei sich verändernden räumlichen Situationen adaptiert werden und der vorgegebene Zielpunkt wird dennoch erfolgreich erreicht. Als typische Beispiele sind an dieser Stelle Überwachungsroboter, fahrerlose Transportfahrzeuge oder automatische Staubsauger zu nennen [103].

Der bekannteste Vertreter der Landkartenmethode ist der Sichtbarkeitsgraf. Bei diesem Verfahren werden alle bereits bekannten Hindernisse sowie Start- und Endpunkt in ein rechnerinternes Abbild des Bewegungsraumes eingetragen. Mögliche Fahrstrecken entstehen nun dadurch, dass Start-, End- sowie alle Eckpunkte von Objekten mit Geraden verbunden werden, die kein Hindernis schneiden. Somit entsteht eine Landkarte, die alle möglichen Bahnen enthält, auf denen kollisionsfrei durch den Bewegungsraum navigiert werden kann (vgl. Bild 30). Ist der Roboter zusätzlich noch mit Sensoren ausgestattet, die eine Aktualisierung der Umgebung erlauben, so lässt sich bei einer Abweichung zwischen Modell und Wirklichkeit die Landkarte anpassen, sodass anschließend die gültigen Bewegungsbahnen neu berechnet werden können.

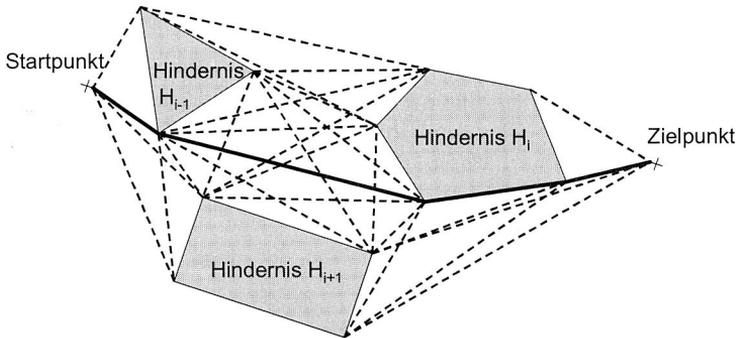


Bild 30: Darstellung eines Sichtbarkeitsgraphen für eine Beispielumgebung mit möglichen Bahnen (gestrichelte Linien) und der kürzesten Verbindung (durchgezogene Linie)

Nachteilig an dieser Methode ist das Entlangfahren an der Kante eines Hindernisses, da hieraus ein hohes Kollisionspotential zwischen Objekt und Roboter resultiert. Eine Möglichkeit besteht darin, alle Hindernisse im Modell virtuell zu vergrößern, sodass zwischen der Objektbegrenzung und dem Fahrzeug ein zusätzlicher Zwischenraum entsteht, was allerdings gleichzeitig mit einer Verkleinerung des Bewegungsraumes einhergeht.

Aus diesem Grund wird häufig das so genannte Voronoi-Diagramm verwendet, ein weiterer Vertreter der Landkartenmethode. Der wesentliche Unterschied zum Sichtbarkeitsgraphen besteht darin, dass die Knoten, die später als Stützpunkte der Bewegungen dienen, derart konstruiert werden, dass sie von mindestens zwei Hindernissen oder Bewegungsraumbegrenzungen gleich weit entfernt sind. Anschließend werden diese Voronoi-Punkte durch Linien miteinander verbunden, die demzufolge maximalen Abstand zu den Hindernissen besitzen. Somit kann die Gefahr eines Zusammenstoßes nachhaltig gesenkt werden (vgl. Bild 31).

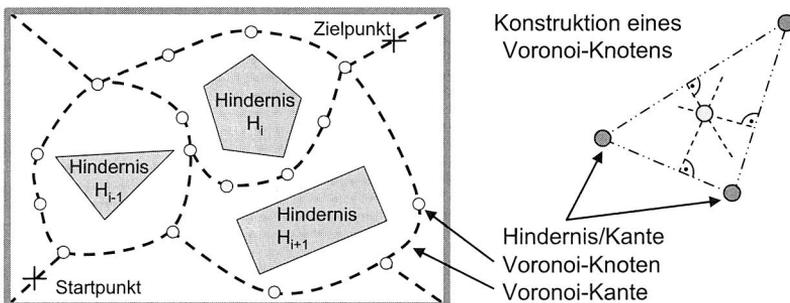


Bild 31: Bahngenerierung mit Hilfe des Voronoi-Diagramms unter Einhaltung maximalen Abstandes zu den Hindernissen

5.1.2 Zellerlegungsmethode

Analog zum Landkartenverfahren dient auch bei der Zellerlegungsmethode der gesamte Bewegungsraum des Roboters als Planungsgrundlage für eine kollisionsfreie Bewegung zwischen einem Start- und Endpunkt. Dabei wird der Freiraum durch meist einfache geometrische Körper, die so genannten Zellen, repräsentiert. In Abhängigkeit von der Darstellung des Bewegungsraumes muss zwischen exakten und näherungsweisen Verfahren differenziert werden. Bei den erstgenannten sind die Zellen mit Polygonen gleichzusetzen, die eine vollständige Abbildung des Freiraumes ermöglichen. Im Gegensatz dazu finden bei den näherungsweisen Lösungsansätzen einfache geometrische Formen Verwendung, wie beispielsweise Rechtecke oder Quader, um den Freiraum zu approximieren.

Exakte Zellerlegung (Trapezzerlegung)

Bei der exakten Zellerlegungsmethode wird der Freiraum, in dem sich der Roboter kollisionsfrei bewegen darf, mittels Polygonen nachmodelliert. Ein einfaches und zugleich schnelles Verfahren stellt die Trapezmethode dar, bei der ausgehend von einer Ecke eines Hindernisses unter einem beliebigen Winkel eine Linie gezogen wird, bis diese entweder wiederum ein Objekt oder aber die Begrenzung des Bewegungsraumes trifft. Durch wiederholtes Vorgehen von allen Hindernisecken sowie unter Beibehaltung des gewählten Winkels entstehen auf diese Art und Weise trapezförmige Zellen, in denen sich der Roboter kollisionsfrei bewegen kann (vgl. Bild 32).

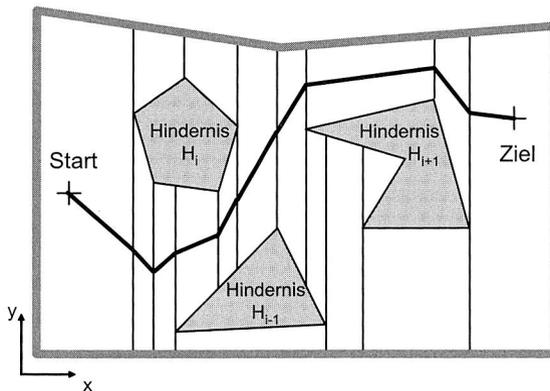


Bild 32: Exakte Zellerlegung mit der Trapezmethode und anschließende mögliche Bahngenerierung

Die entstandenen trapezförmigen Zellen dienen nun als Grundlage für die Bewegungsplanung von Start- zu Endpunkt. Eine mögliche Vorgehensweise besteht darin, jeweils einen Stützpunkt in der Mitte einer Begrenzungslinie zu erstellen. Durch das Verbinden der Punkte von zwei benachbarten Zellen entsteht eine kollisionsfreie Bahn, die der

Roboter abfahren kann. Die Leistungsfähigkeit dieser Methode ist stark von der Menge an Hindernissen sowie deren Anzahl an Ecken abhängig, denn damit wird direkt der Verwaltungs- und Suchaufwand beeinflusst. Um diesen zu reduzieren, gilt es die Zahl der Zellen möglichst gering zu halten, was mit Hilfe der im folgenden Abschnitt dargestellten näherungsweise Zellzerlegung erreichbar ist.

Näherungsweise Zellzerlegung

Bei dieser Methode wird der gesamte Bewegungsraum – unabhängig von seiner Form oder Anordnung und Anzahl an Hindernissen – mittels einfacher geometrischer Objekte approximiert. Im einfachsten Fall wird im Zweidimensionalen ein Raster bestehend aus gleichgroßen Rechtecken, wie bei einem Schachbrett, über den Bewegungsraum gelegt. Bei hinreichend kleiner Zellengröße kann demzufolge der gesamte Raum durch drei verschiedene Zellzustände repräsentiert werden: „frei“, wenn kein Hindernis enthalten ist, „vollständig belegt“, wenn die Zelle völlig mit einem Objekt besetzt ist und „teilweise belegt“.

Diese grobe und insbesondere feste Rasterung kann durch die Anwendung des Quadtree-Verfahrens wesentlich verbessert werden (vgl. Bild 33). Dabei werden ausgehend vom Bewegungsraum zunächst vier gleichgroße Tochterzellen gebildet, indem die Kantenlänge jeweils halbiert wird. Jede neu entstandene Zelle, die den Zustand „teilweise belegt“ besitzt, wird wiederum nach dem obigen Schema weiter unterteilt. Dies geschieht solange, bis eine festgelegte minimale Zellengröße erreicht ist. Alle vollständig belegten bzw. freien Zellen brauchen nicht weiter unterteilt zu werden, da sie mit dem Roboter entweder überhaupt nicht oder vollständig kollisionsfrei befahren werden können. Durch diese Vorgehensweise der näherungsweise Zellzerlegung wird eine sehr gute Approximation des Arbeitsraumes bei gleichzeitig geringer Anzahl an gebildeten Zellen erreicht.

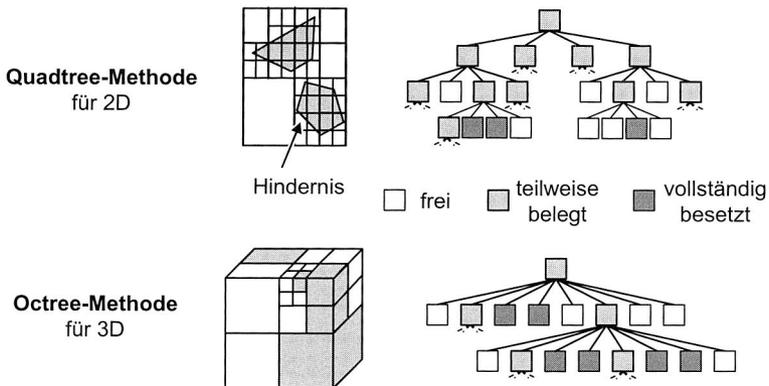


Bild 33: Repräsentation des Bewegungsraumes mittels einfacher geometrischer Objekte (links) und deren rechnerinterne Darstellung als 2^m -Baum (rechts)

Für die anschließende Bahnplanung lassen sich alle bei der Unterteilung entstandenen Tochterzellen als 2^m -Baum darstellen. Dabei beschreibt m die Dimension des Raumproblems, d. h. im Zweidimensionalen ist m gleich 2 und im Dreidimensionalen gleich 3. Die Wegsuche vom Start- zum Zielpunkt erfolgt nun lediglich innerhalb der freien Zellen, sodass als Ergebnis ein oder mehrere Kanäle aus zusammenhängenden Zellen vorliegen, in denen die Bewegung des Roboters kollisionsfrei ist. Hierfür können aus dem Bereich der Graphentheorie eine Vielzahl an unterschiedlichen Suchalgorithmen herangezogen werden, von denen die bekanntesten und wichtigsten im folgenden Abschnitt kurz erläutert sind.

Wegsuche innerhalb eines 2^m -Baumes unter Zuhilfenahme der Graphentheorie

Für die Wegsuche innerhalb eines Baumes existiert eine Vielzahl an möglichen Suchalgorithmen, von denen die Tiefen- (depth-first-search) und Breitensuche (breadth-first-search) sowie der A*-Algorithmus die bekanntesten sind [14, 18, 43, 123, 135]. Bei der Tiefensuche werden zu Beginn alle Knoten als „unbesucht“ markiert. Von einem Initialisierungsknoten K_{Start} aus erfolgt rekursiv der Abstieg in die Tiefe, wobei jeder besuchte Knoten markiert wird, bis entweder der Zielknoten K_{Ziel} gefunden oder aber alle erreichbaren Unterknoten besucht wurden (Bild 34 links). Anders verhält es sich bei der Breitensuche, die iterativ arbeitet. Hierbei befindet sich zu Beginn nur der Startknoten K_{Start} in einer Liste. Der aktuell besuchte Knoten wird gestrichen, wobei gleichzeitig alle seine Kinder unten an die Liste angehängt werden. Wenn der gesuchte Zielpunkt erreicht ist, bricht der Algorithmus ab, ansonsten führt er dies solange fort, bis sich kein Eintrag mehr in der Liste befindet (Bild 34 Mitte).

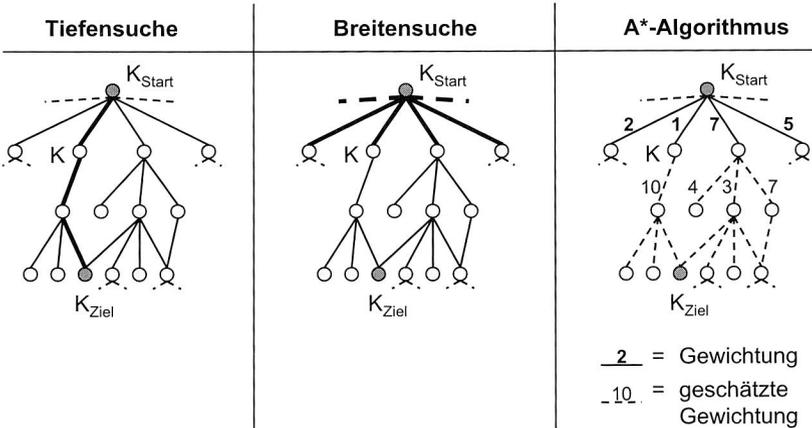


Bild 34: Die bekanntesten Suchalgorithmen und die dazugehörigen Suchrichtungen innerhalb eines Baumes

In vielen Fällen können die Kanten zwischen zwei Knoten durch einen Faktor mittels einer Gewichtungsfunktion bewertet werden. Der A*-Algorithmus von Hart, Nilsson und Raphael ist auf Grund der verwendeten Heuristik in der Lage, den Weg mit den geringsten Kosten zu finden (Bild 34 rechts). Dazu kann der bereits zurückgelegte Pfad genau bewertet werden, wohingegen der noch zurückzulegende geschätzt wird. Somit lässt sich anhand dieser beiden Werte der beste Weg zwischen Start- und Endpunkt ermitteln, was mit Hilfe der Minimierung der Gesamtkosten erfolgt.

5.1.3 Potentialfeldmethode

Bei der Potentialfeldmethode handelt es sich um ein rein mathematisches Verfahren, mit dem an jedem Punkt innerhalb des Arbeitsraumes des Roboters eine kollisionsfreie Bewegungsrichtung zum Zielpunkt bestimmt werden kann. Hierfür ist es nicht wie bei der Landkarten- oder Zellzerlegungsmethode erforderlich, den gesamten Bewegungsraum zu berücksichtigen, sondern es ist ausreichend, die nähere Umgebung zu betrachten, weswegen die Potentialfeldmethode auch zu den so genannten lokalen Verfahren zählt. Darüber hinaus entsteht nicht wie bei den oben vorgestellten Methoden ein Baum bzw. Graf, der anschließend nach einem möglichen Weg durchsucht werden muss, sondern es wird unmittelbar eine Bewegungsrichtung bestimmt.

Das Grundprinzip der Potentialfeldmethode basiert auf anziehenden und abstoßenden Kräften. Dazu wird zunächst ein Potentialtopf definiert, dessen Minimum im Zielpunkt der auszuführenden Bewegung liegt. Würde der Roboter gedanklich durch eine Kugel repräsentiert und diese an ihrem Startpunkt losgelassen werden, so rollt sie im Schwerfeld der Erde selbstständig in Richtung des Zielpunktes und kommt dort zum Liegen. Befinden sich zusätzlich noch Hindernisse im Raum, so können diese mit Hilfe von Bergspitzen abgebildet werden, woraus eine Art Gebirgslandschaft resultiert (vgl. Bild 35). Demzufolge würde der Roboter, der wieder am Startpunkt losgelassen wird, in Richtung Ziel rollen, wobei allerdings die Bergspitzen umfahren werden, was mit einer kollisionsfreien Bewegung gleich zu setzen ist.

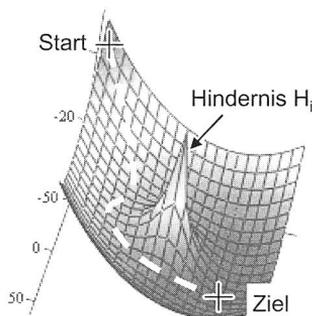


Bild 35: Darstellung der Potentialfeldmethode für eine 2D-Problemstellung, bei der die Bergspitze ein Hindernis und das Tal den Zielpunkt repräsentiert

Das anziehende Potential

Durch die Definition eines Potentialfeldes kann jedem Raumpunkt ein skalarer Wert zugeordnet werden. Mit Hilfe der Gradientenbildung entsteht ein Vektorfeld, das als Bewegungsrichtungsfeld interpretiert werden kann, um von der aktuellen Ist-Position \mathbf{p} in Richtung des Zielpunktes \mathbf{p}_{Ziel} zu gelangen. Das anziehende Potential $U_{an}(\mathbf{p})$ lässt sich z. B. als quadratische Quellfunktion

$$U_{an,quad}(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot \rho_{Ziel}^2(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot \|\mathbf{p}_{Ziel} - \mathbf{p}\|^2 \quad (6)$$

beschreiben, wobei ε ein positiver Skalierungsfaktor und ρ_{Ziel} der euklidische Abstand zwischen der betrachteten Position \mathbf{p} und dem Zielpunkt \mathbf{p}_{Ziel} ist (Bild 36 links). Aber auch die Definition durch ein konisches Potential gemäß

$$U_{an,kon}(\mathbf{p}) = \varepsilon \cdot \rho_{Ziel}(\mathbf{p}) = \varepsilon \cdot \|\mathbf{p}_{Ziel} - \mathbf{p}\| \quad (7)$$

ist als Quellfunktion geeignet (Bild 36 rechts). Charakteristisch für beide Funktionen ist, dass jede von ihnen jeweils am Zielpunkt den Wert Null besitzt und ansonsten positiv definiert ist. Dies bedeutet, dass dem Roboter immer eine Bewegungsrichtung impliziert wird, wenn er sich nicht an seinem Zielpunkt befindet.

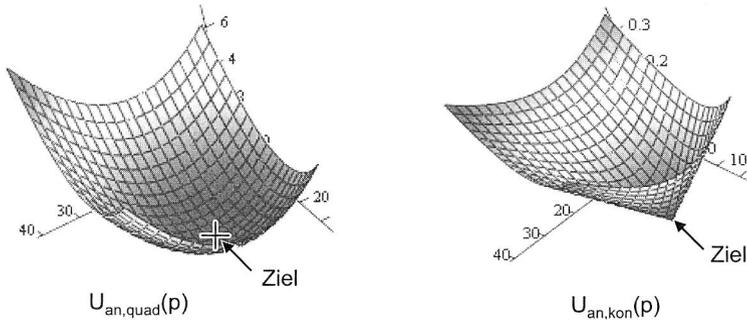


Bild 36: Das anziehende Potential einer quadratischen (links) und linearen Quellfunktion (rechts)

Das dazugehörige Vektorfeld und demzufolge die in Punkt \mathbf{p} resultierende Vorzugsrichtung wird durch Gradientenbildung von U_{an} definiert:

$$F_{an,quad}(\mathbf{p}) = -\nabla U_{an,quad}(\mathbf{p}) = -\varepsilon \cdot \rho_{Ziel}(\mathbf{p}) \cdot \nabla \rho_{Ziel}(\mathbf{p}) = \varepsilon \cdot (\mathbf{p}_{Ziel} - \mathbf{p}) \quad (8)$$

bzw.

$$F_{an,kon}(\mathbf{p}) = -\nabla U_{an,kon}(\mathbf{p}) = \varepsilon \cdot \frac{(\mathbf{p}_{Ziel} - \mathbf{p})}{\|\mathbf{p}_{Ziel} - \mathbf{p}\|} \quad (9)$$

Die Funktion $F_{an,kon}(\mathbf{p})$ ist, mit Ausnahme des Zielpunktes, in dem eine Singularität vorliegt, konstant.

Das abstoßende Potential

Innerhalb des Arbeitsraumes befinden sich jedoch meist noch Hindernisse H_i , wie z. B. Maschinen, Haltevorrichtungen etc., mit denen der Roboter nicht kollidieren darf, d. h. er muss sie auf seinem Weg zum Ziel umfahren. Im Rahmen der Bahnplanung kann dies durch die Einführung eines abstoßenden Potentials realisiert werden. Die dabei zu verwendende Funktion soll die Eigenschaft besitzen, die Bewegungsrichtung des Roboters derart zu beeinflussen, sodass es zu keinem Zusammenstoß kommen kann. Wenn das Hindernis allerdings weit genug entfernt ist, dann sollte es keinerlei Auswirkungen auf die ursprüngliche Bewegung haben. Demzufolge lässt sich vereinbaren, dass kein Einfluss mehr vom Hindernis ausgeht, wenn der Abstand zwischen betrachtetem Objekt und aktueller Ist-Position einen vordefinierten Wert, den so genannten Einflussradius ρ_0 , überschreitet. In allen anderen Fällen soll sich die Änderung auf die Bewegungsrichtung indirektproportional zur Entfernung zwischen Hindernis H_i und der aktuellen Position \mathbf{p} verhalten, d. h. je kleiner der Abstand der beiden Punkte ist, desto größer ist die Abstoßung. Diese Forderungen können mit folgender Funktionsdefinition erfüllt werden, deren grafische Darstellung Bild 37 zeigt:

$$U_{ab}(\mathbf{p}) = \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot \left(\frac{1}{\rho_{Hind}(\mathbf{p})} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2, & \text{wenn } \rho(\mathbf{p}) \leq \rho_0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (10)$$

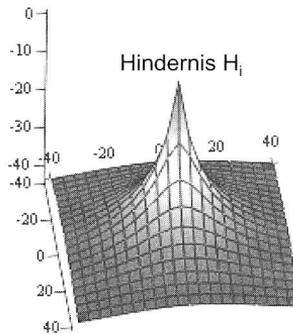


Bild 37: Das abstoßende Potential für ein Hindernis H_i

Bildlich gesprochen entstehen dadurch an den Stellen der Hindernisse Bergspitzen, die den Roboter während seiner Bewegung abstoßen. Das dazugehörige Vektorfeld $\mathbf{F}_{ab}(\mathbf{p})$ wird wiederum durch die Gradientenbildung gebildet und ergibt sich zu

$$\mathbf{F}_{ab}(\mathbf{p}) = \begin{cases} \eta \cdot \left(\frac{1}{\rho_{Hind}(\mathbf{p})} - \frac{1}{\rho_0} \right) \cdot \frac{1}{\rho^2(\mathbf{p})} \cdot \nabla \rho(\mathbf{p}), & \text{wenn } \rho(\mathbf{p}) \leq \rho_0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (11)$$

Die resultierende Bewegungsrichtung

Für die autonome Bahnplanung auf der Grundlage der Potentialfeldmethode ist es erforderlich, eine resultierende Bewegungsrichtung zu ermitteln. Dazu kann ein resultierendes Potential $U_{res}(\mathbf{p})$, bestehend aus dem anziehenden sowie allen abstoßenden Potentialen und das dazugehörige Vektorfeld $\mathbf{F}_{res}(\mathbf{p})$ zu

$$U_{res}(\mathbf{p}) = U_{an}(\mathbf{p}) + U_{ab}(\mathbf{p}) \tag{12}$$

$$\mathbf{F}_{res}(\mathbf{p}) = \mathbf{F}_{an}(\mathbf{p}) + \mathbf{F}_{ab}(\mathbf{p}) = \nabla U_{res}(\mathbf{p}) = \nabla U_{an}(\mathbf{p}) + \sum_i \nabla U_{ab,i}(\mathbf{p}) \tag{13}$$

bestimmt werden. Auf diese Weise lässt sich mit rein mathematischen Grundlagen in jedem Punkt \mathbf{p} ein kollisionsfreier Richtungsvektor bestimmen. Die Länge des Weg-elements kann dabei von unterschiedlichen Kriterien abhängen, wie beispielsweise maximale Verzögerung des Roboters, Größe des betrachteten Bewegungsraumes etc.. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Schrittweite in Relation der Entfernung zum nächstgelegenen Hindernis zu variieren. Daraus resultiert in Verbindung mit dem Beschleunigungs- und Abbremsverhalten eine schnelle Bewegung, wenn die Hindernisse weit vom Roboter entfernt sind, wohingegen sich die Fahrt verlangsamt, sobald die Objekte näher kommen.

Verklemmungen durch das Auftreten eines lokalen Minimums

Bei der Anwendung der Potentialfeldmethode kann es allerdings zu Verklemmungen kommen, den so genannten dead-lock-Situationen, die auf lokale Minima zurückzuführen sind. Dabei herrscht an einem Punkt \mathbf{p} ein Kräftegleichgewicht zwischen anziehender und abstoßender Kraft, sodass deren Addition das Ergebnis Null liefert und demzufolge keine Roboterbewegung mehr initiiert wird (vgl. Bild 38). Insbesondere beim Einsatz von mobilen Fahrzeugen tritt diese Art der Verklemmung häufiger auf, weswegen in [67] geeignete Strategien entwickelt wurden, um derartige Situationen aufzulösen, damit die Bewegung fortgesetzt werden kann.

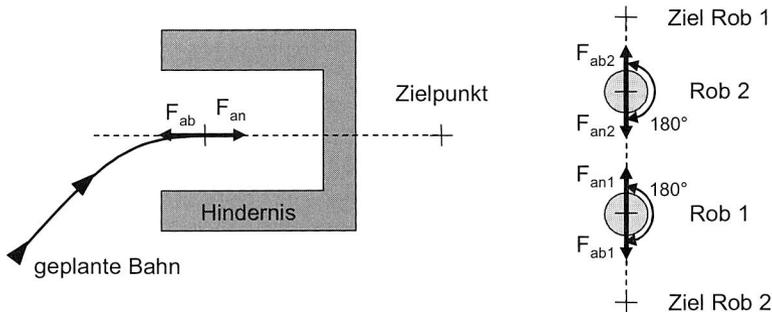


Bild 38: „Gefangennahme“ des Roboters durch die Entstehung lokaler Minima bei der Potentialfeldmethode

Die gleiche Situation tritt auf, wenn sich zwei Roboter direkt aufeinander zu bewegen und der dabei eingeschlossene Winkel zwischen den Bewegungsrichtungen exakt 180° beträgt. Auch in diesem Fall heben sich die anziehenden und abstoßenden Kräfte auf und die Einzelbewegungen terminieren, obwohl die jeweiligen Zielpositionen noch nicht erreicht worden sind. Eine mögliche Vorgehensweise, die in Bild 38 rechts dargestellte Situation zu lösen, besteht z. B. darin, das Skalarprodukt der berechneten an- und abstoßenden Richtungsvektoren zu bestimmen. Sobald der dabei eingeschlossene Winkel 180° beträgt, gilt es, die Position eines jeden Roboters in beliebigem Winkel, jedoch nicht in Richtung der geplanten, geringfügig zu verändern. Durch diese Positionsverschiebung werden andere Richtungsvektoren bestimmt und die Bewegung kann fortgesetzt werden.

5.2 Besonderheiten bei der Bewegungsplanung für Industrieroboter

Im vorangegangenen Kapitel 5.1 wurden grundlegende Bahnplanungsmethoden dargestellt und erläutert, mit deren Hilfe für ein im Raum frei bewegliches Objekt selbstständig eine kollisionsfreie Bahn von einem Start- zu einem Zielpunkt bestimmt werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit kommen allerdings reale Industrieroboter zum Einsatz, die nicht über die Eigenschaft der freien Beweglichkeit verfügen. Es ist demzufolge nicht ausreichend, lediglich den Mittelpunkt des Effektors bzw. den Tool Center Point (TCP) bei der Bewegungsplanung zu berücksichtigen, sondern vielmehr gilt es die gesamte kinematische Kette mit in die Berechnung einzubeziehen, da es ansonsten trotzdem zu Zusammenstößen kommen kann. Diese und weitere Besonderheiten, die bei der Bahnplanung für Industrieroboter und insbesondere bei kooperierenden Systemen zu beachten sind, werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

5.2.1 Anwendung der autonomen Bahnplanungsmechanismen bei Industrierobotern

Bei der Bewegungsplanung von Industrierobotern gilt es zunächst zu berücksichtigen, dass diese – im Gegensatz zu den oben behandelten Free Flying Objects – immer einen dreidimensionalen Arbeitsraum besitzen und demzufolge auch die Bahnplanung in 3D erfolgen muss. Die Landkartenmethode wurde im Zweidimensionalen vorgestellt, kann allerdings auch um eine Dimension erweitert werden, wobei sich dies als äußerst schwierig sowie zeit- und rechenintensiv erweist. Der Grund ist in der sehr großen Anzahl an möglichen Verbindungen zwischen den räumlichen Objekten zu sehen, weswegen dieses Verfahren kaum für die Bahnplanung im Dreidimensionalen angewandt wird. Analog gestaltet sich die Adaptierung der exakten Zellzerlegungsmethode an die räumliche Darstellung als schwer zu realisieren, weswegen sie bei der Wegplanung in 3D ebenfalls eine untergeordnete Rolle spielt.

Als eine praktikable Vorgehensweise hinsichtlich Aufwand und Handhabung bei der Erweiterung auf räumliche Problemstellungen kann die näherungsweise Zellzerlegung angesehen werden. Anstelle von Rechtecken kommen Quader bzw. Würfel zum

Einsatz, die eine Zelle repräsentieren, die wiederum die Zustände frei, belegt oder teilweise besetzt annehmen kann. Wie auch schon beim Quadtree-Verfahren wird jede teilbelegte Zelle bis zu einer vorher definierten minimalen Größe unterteilt, jedoch diesmal in 8 Tochterzellen, weswegen auch vom Octree-Verfahren die Rede ist (vgl. Bild 33). Die Struktur lässt sich mit Hilfe eines 2^3 -Baumes darstellen, der mit den bekannten Suchalgorithmen nach einem freien Kanal vom Start- zum Zielpunkt durchsucht wird. Existiert eine Lösung, bestehend aus freien Zellen, so kann der TCP in ihnen kollisionsfrei den Zielpunkt erreichen. Dabei ist allerdings noch nicht sichergestellt, dass die gesamte Bewegung – insbesondere die der restlichen kinematischen Kette – kollisionsfrei die Endposition erreicht. Anschaulich dargestellt ist dieser Sachverhalt in Bild 39, in dem die Bahnplanung nur für den Endpunkt des Effektors erfolgt, die restlichen Gelenke allerdings mit einem Hindernis zusammenstoßen können, sodass eine derartige Bewegung nicht zulässig ist.

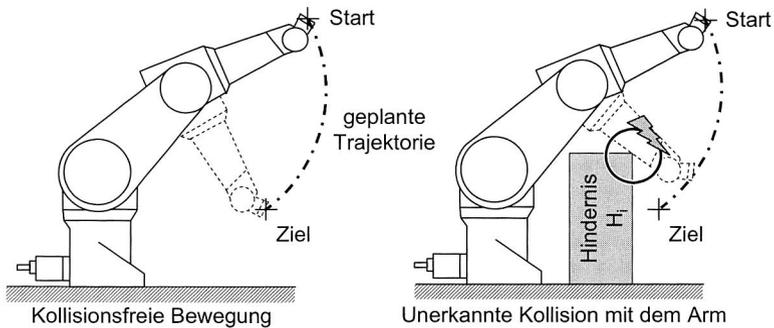


Bild 39: Bei Berücksichtigung lediglich des TCPs kann es zu Kollisionen mit der restlichen Kinematik kommen

Die einzige Möglichkeit, solche Situationen und Zusammenstöße zu vermeiden, besteht darin, nicht nur den TCP in die Bahnplanung mit einzubeziehen, sondern vielmehr die gesamte kinematische Kette zu berücksichtigen. Eine detaillierte Beschreibung dieser Vorgehensweise erfolgt im anschließenden Kapitel 5.2.2. Nichts desto trotz lässt sich festhalten, dass die näherungsweise Zellzerlegungsmethode grundsätzlich auf 3D Problemstellungen erweitert und für die Bahnplanung von realen Industrierobotern eingesetzt werden kann.

Ähnlich verhält es sich auch mit der in Kapitel 5.1.3 dargestellten Potentialfeldmethode, die auf dem Prinzip des steilsten Abstiegs, d. h. dem Gradientenverfahren, beruht. Sämtliche Formeln sind bereits in Vektorschreibweise aufgestellt, sodass nicht nur zwei-, sondern auch dreidimensionale Problemstellungen behandelt werden können. Eine Erweiterung auf Bewegungen mit Industrierobotern ist demzufolge nicht erforderlich, da die Algorithmen sowie die Mathematik unverändert bleiben. Auf Grund dieser Gegebenheit und der einfachen Handhabung der Potentialfeldmethode findet sie auch

in den am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen-Nürnberg aufgebauten Montagezellen für die Trajektorienplanung unterschiedlicher Roboterkinematiken Verwendung (vgl. Kapitel 6.3 und 7.3). Allerdings besteht bei diesem Planungsverfahren die Gefahr, dass zwar der TCP seinen Zielpunkt kollisionsfrei erreicht, jedoch die restlichen Segmente des Effektors mit anderen in der Zelle befindlichen Objekten zusammenstoßen können. Deswegen wird im folgenden Kapitel darauf eingegangen, wie die gesamte Armkinematik ebenfalls bei der Bahnplanung mit berücksichtigt werden kann.

5.2.2 Kollisionsvermeidung durch Objektmodellierung mittels Hüllkörper

Wie bereits in Kapitel 3 angesprochen, soll die Bewegungsplanung im Interpolationstakt der Robotersteuerungen erfolgen, d. h. dynamisch zur Laufzeit, sodass hierfür lediglich wenige Millisekunden zur Verfügung stehen. Hinzu kommt noch, wie im vorhergehenden Abschnitt erläutert, dass nicht nur der TCP bei der Bahnplanung berücksichtigt werden darf, sondern vielmehr die gesamte kinematische Kette, da es ansonsten zu Zusammenstößen kommen kann. Die Implementierung des Bewegungsplaners erfolgt auf einem Personal Computer, deren Leistungsfähigkeit zwar kontinuierlich wächst, aber auch an die Grenze stößt, sobald ein exaktes Robotermodell als Berechnungsgrundlage verwendet wird. Aus diesem Grund muss ein Kompromiss zwischen Detaillierungsgrad und Rechengeschwindigkeit eingegangen werden, denn je feiner die Modellierung, desto rechenintensiver erweist sich die Bahnplanung. Eine Möglichkeit, den Berechnungsaufwand in Grenzen zu halten, besteht darin, den realen Roboter durch geometrisch einfache Hüllkörper abzubilden, so genannte Bounding Boxes, wobei meist Kugeln oder Quader Verwendung finden (siehe Bild 40). Durch die Wahl unterschiedlicher Diskretisierungsstufen, d. h. die minimale Größe der Hüllkörper, kann wiederum die Anzahl der zu berücksichtigenden Objekte unmittelbar beeinflusst werden.

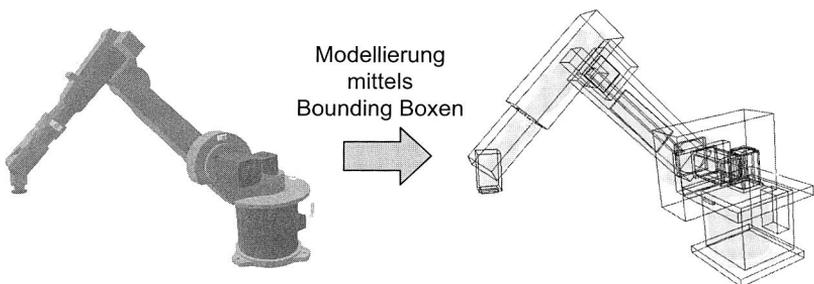


Bild 40: Modellierung eines Industrieroboters mit Hilfe von geometrisch einfachen Hüllkörpern, um den Rechenaufwand bei der Bahnplanung zu reduzieren

Im Gegensatz zum exakten CAD-Modell lässt sich auf diese Weise jedes Armsegment durch wenige Boxen abbilden. Wenn die verwendete Kinematik in Form eines mathematischen Modells (siehe Kapitel 5.2.3) sowie die aktuellen Gelenkwinkel bekannt sind, dann lassen sich die Hüllkörper mit Hilfe der entsprechenden Transformations-

beziehungen im Raum – gemäß dem Gelenk – orientieren. Demzufolge können sie als Grundlage für eine schnelle Kollisionsüberprüfung herangezogen werden, da nun lediglich einfache Objekte, wie z. B. Quader oder Kugeln auf ihre Überschneidung geprüft werden müssen, wofür eine Vielzahl an unterschiedlichen Verfahren existiert [21, 111].

Soll beispielsweise bei zwei Quadern überprüft werden, ob sie sich durchdringen, so besteht eine Möglichkeit darin, diese auf so genannte Trennungslinien zu projizieren. Hiervon existieren insgesamt 15 Stück – je eine in Richtung des Normalenvektors jeder Box (6 Stück) sowie in Richtung des Normalenvektors, gebildet aus dem paarweisen Kreuzprodukt der Normalenvektoren der beiden Boxen (9 Stück). Wenn sich die Projektionslinien in allen Fällen nicht überlagern, so ist Kollisionsfreiheit gewährleistet (Bild 41 links). Allerdings ist leicht einzusehen, dass der Berechnungsaufwand bei steigender Anzahl an Bounding Boxen schnell anwächst.

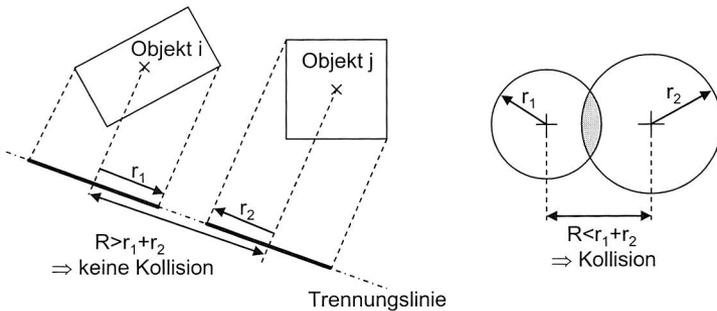


Bild 41: Kollisionsüberprüfung bei Quadern durch Projektion auf eine Trennungslinie (links) sowie bei Kugeln durch Betrachtung der Abstände und Radien (rechts)

Eine weitaus einfachere Methode zu überprüfen, ob eine Kollision vorliegt oder nicht, ergibt sich, wenn als Hüllkörper Kugeln Verwendung finden. Diese werden lediglich durch ihren Mittelpunkt sowie Radius geometrisch vollständig beschrieben. Eine Berechnung des Abstandes der Mittelpunkte von zwei betrachteten Objekten sowie der Vergleich mit der Summe der Radien gibt Aufschluss über einen Zusammenstoß (Bild 41 rechts). Demzufolge ist der Rechenaufwand im Vergleich zu den Quadern wesentlich geringer.

Aus diesem Grund werden zur effektiven Kollisionsvermeidung bei den im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Bahnplanern zunächst die einzelnen Armsegmente mittels rechteckiger Hüllkörper nachmodelliert und in die aktuell vorliegende räumliche Orientierung des Effektors transformiert. Anschließend werden die gedrehten Bounding Boxen mit Kugeln gefüllt, deren Mittelpunkte jeweils die Entfernung des Radius haben, sodass für eine Kollisionsüberprüfung lediglich die Abstände der einzelnen Kugeln unterschiedlicher Objekte miteinander verglichen werden müssen. Auf diese Weise lässt sich eine universelle Kollisionsüberwachung implementieren, die auf beliebige Kinematiken übertragen werden kann. Durch die Wahl der Diskretisierungsstufe, d. h.

die Variation des Radius und demzufolge die Anzahl an Objekten, lässt sie sich sehr gut an die zur Verfügung stehende Rechenleistung adaptieren.

5.2.3 Nachbildung des mathematischen Modells mittels Denavit-Hartenberg-Parameter

Neben der Berechnung einer Trajektorie vom Start- zum Zielpunkt besteht die Hauptaufgabe eines Bahnplaners für Industrieroboter in der Vermeidung von Kollisionen mit der Umgebung. Hierzu wurde im vorangegangenen Kapitel gezeigt, dass eine exakte Modellierung des Roboters auf Grund der erforderlichen Rechenleistung nicht umsetzbar ist und er demzufolge mittels Hüllkörper approximiert werden muss. Des Weiteren sind die aktuellen Gelenkstellungen des Roboterarms erforderlich, um anschließend das rechnerinterne Modell zu aktualisieren sowie die jeweiligen Hüllkörper gemäß dem mathematischen Modell zu transformieren. Dabei wird die Denavit-Hartenberg-Transformation angewendet, die auf Basis von homogenen Matrizen und der so genannten Denavit-Hartenberg-Konvention die Überführung von Ortskoordinatensystemen innerhalb von kinematischen Ketten beschreibt [50, 130, 153]. Sie erleichtert damit vor allem die Berechnung der direkten Kinematik (Vorwärtskinematik) und gilt hierbei mittlerweile als Standardverfahren. Zur Beschreibung der Koordinaten von einem System in das nachfolgende sind so genannte Denavit-Hartenberg-Parameter erforderlich, die wie folgt festgelegt sind:

- d_i beschreibt die Entfernung in Richtung der z_{i-1} -Achse,
- α_i die Drehung der Koordinatensysteme um die x_i -Achse,
- a_i die senkrechte Entfernung der beiden Ursprünge in Richtung x_i und
- θ_i die Drehung um die z_{i-1} -Achse, die mit dem Roboterwinkel gleichzusetzen ist.

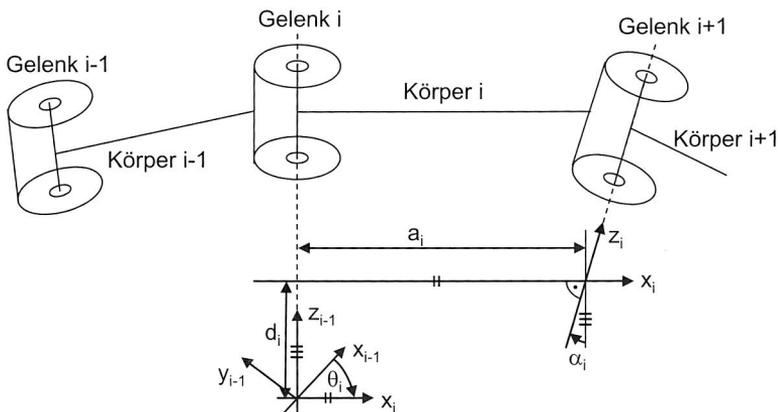


Bild 42: Beschreibung eines Koordinatensystemübergangs mit Hilfe der Denavit-Hartenberg-Parameter (nach [50])

Die Transformationsmatrix $T_{i-1,i}$, die den Koordinatenübergang vom i-1-ten in das i-te System beschreibt, setzt sich demzufolge aus der Multiplikation der einzelnen Rotations- bzw. Translationsmatrizen zusammen und ergibt sich zu:

$$\begin{aligned}
 T_{i-1,i} &= R_{z_{i-1}} \cdot T_{z_{i-1}} \cdot T_{x_i} \cdot R_{x_i} = \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cdot \cos \alpha_i & \sin \theta_i \cdot \sin \alpha_i & a_i \cdot \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cdot \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \cdot \sin \alpha_i & a_i \cdot \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)
 \end{aligned}$$

Die Ermittlung der Tool Center Point-Koordinaten (Vorwärtskinematik) im Ursprungssystem des Roboters bei gegebenen Winkeln θ_i erfolgt durch die Matrixmultiplikation der einzelnen Matrizen, wobei N die Anzahl der Gelenke angibt:

$$\begin{aligned}
 T_{0,N} &= \prod_{i=1}^N T_{i-1,i} \quad (15) \\
 T_{06} &= T_{01} \cdot T_{12} \cdot T_{23} \cdot T_{34} \cdot T_{45} \cdot T_{56} \quad ,\text{für Sechssachsroboter}
 \end{aligned}$$

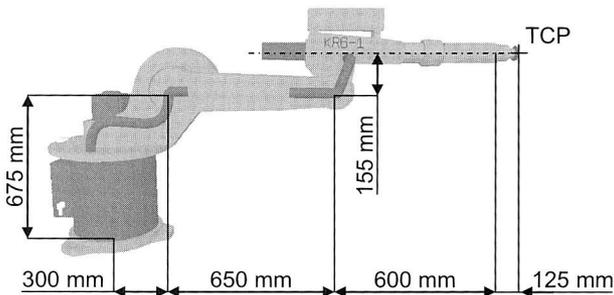


Bild 43: Geometrische Abmessungen des verwendeten Roboters KR 6/2 von Kuka, dessen genaue DH-Parameter in Bild 52 sowie Tabelle 2 angegeben sind

Für die Bestimmung der Endlagenorientierung des Zielpunktes dienen die drei Winkel A, B und C. Diese beschreiben die Rotation eines Objektes nach dem festen Schema, wie es bei der Berechnung der Firma Kuka Verwendung findet (nach [80]):

1. Drehung um die z-Achse, um den Winkel A,
2. Drehung um die neue y-Achse, um den Winkel B und
3. Drehung um die neue x-Achse, um den Winkel C.

Diese Reihenfolge ist strikt einzuhalten, da eine davon abweichende Abfolge der Drehbewegungen, ein anderes Ergebnis der Endlagenorientierung des Körpers zur Folge hat. Mathematisch kann eine Drehbewegung durch eine Rotationsmatrix \mathbf{R} beschrieben werden. Für die einzelnen Achsen lautet diese jeweils:

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Die Gesamtrrotationsmatrix $\mathbf{R}_{zy'x''}$ mit den Drehwinkeln A , B und C ergibt sich dann zu

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{zy'x''} &= \mathbf{R}_z(A) \cdot \mathbf{R}_y(B) \cdot \mathbf{R}_x(C) = \\ &= \begin{bmatrix} \cos A & -\sin A & 0 \\ \sin A & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos B & 0 & \sin B \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin B & 0 & \cos B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos C & -\sin C \\ 0 & \sin C & \cos C \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos A \cos B & -\sin A \cos C + \cos A \sin B \sin C & \sin A \sin C + \cos A \sin B \cos C \\ \sin A \cos B & \cos A \cos C + \sin A \sin B \sin C & -\cos A \sin C + \sin A \sin B \cos C \\ -\sin B & \cos B \sin C & \cos B \cos C \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

Durch Koeffizientenvergleich von \mathbf{T}_{06} mit $\mathbf{R}_{zy'x''}$ lassen sich so die Rotationswinkel A , B und C wie folgt berechnen:

$$\begin{aligned} B &= -\arcsin\left(\frac{T_{06(2,0)}}{T_{06(2,2)}}\right) \\ C &= \arctan\left(\frac{T_{06(2,1)}}{T_{06(2,2)}}\right) = \arctan\left(\frac{\cos B \cdot \sin C}{\cos B \cdot \cos C}\right) \\ A &= \arctan\left(\frac{T_{06(1,0)}}{T_{06(0,0)}}\right) = \arctan\left(\frac{\sin A \cdot \cos B}{\cos A \cdot \cos B}\right) \end{aligned} \quad (18)$$

Rückwärtstransformation

Für die Ermittlung der einzelnen Gelenkwinkel bei gegebener Position in kartesischen Koordinaten ist die inverse Kinematik oder auch Rückwärtstransformation erforderlich. Mit ihr lässt sich überprüfen, ob ein vom autonomen Bahnplaner berechneter Zielpunkt überhaupt mit der eingesetzten Kinematik erreichbar ist oder es dabei zu einer Überschreitung der zulässigen Gelenkwinkel kommt.

Allerdings gilt es zu berücksichtigen, dass viele kinematische Ketten einen Punkt in mehreren Armorientierungen, auch Konfigurationen genannt, anfahren können. Bei einem Knickarmroboter muss daher zwischen lefty/righty, above/below und flip/no-flip unterschieden werden (vgl. Bild 8). Im Rahmen dieser Arbeit kommt eine Kinematik der Firma Kuka zum Einsatz, weswegen im folgenden Verlauf deren Notation mit dem dreiwertigen S - Bit zur Klassifizierung der Armstellung verwendet wird:

Tabelle 1: Beschreibung der Konfiguration mit Hilfe des dreiwertigen S - Bit (nach [80])

S - Bit	2	1	0
Wert 0	$\theta_5 \geq 0$	$(T_{23} \cdot T_{34})_{(2,4)} < 0$	$(P'_x + 300 \text{ mm}) \geq 0$
Wert 1	$\theta_5 < 0$	$(T_{23} \cdot T_{34})_{(2,4)} \geq 0$	$(P'_x + 300 \text{ mm}) < 0$

Auf Grund der Konstruktion des Roboterhandgelenks, bei der sich die drei Koordinatensysteme 4, 5 und 6 im Ursprung des vierten Koordinatensystems schneiden, lässt sich die Berechnung der einzelnen Gelenkwinkel in zwei Teilprobleme aufspalten:

- Bestimmung der ersten drei Gelenkwinkel $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ und anschließende
- Berechnung von $\theta_4, \theta_5, \theta_6$, sodass der TCP die gewünschte Orientierung besitzt.

Berechnung von θ_1

Das erste Teilproblem lässt sich allein mit Hilfe von geometrischen Beziehungen lösen, wenn die Position des 4. Koordinatensystems im Roboterfußkoordinatensystem bekannt ist. Der Ursprung von O_4 , im Folgenden mit P_4 bezeichnet, lässt sich in Abhängigkeit des TCPs wie folgt berechnen:

$$P_4 = P_{TCP} - d_6 \cdot a, \tag{19}$$

wobei P_{TCP} den Tool Center Point in kartesischen Koordinaten angibt, d_6 die Entfernung zwischen TCP und Ursprung von O_4 ($d_6 = 125 \text{ mm}$) und der Vektor a , der dem dritten Spaltenvektor von T_{06} entspricht und als z-Richtungsvektor des 6. Koordinatensystems interpretiert werden kann. Wird nun P_4 in die x_0 - y_0 -Ebene projiziert (vgl. Bild 44), so lässt sich mit Hilfe von P_4' der Winkel θ_1 bestimmen:

$$\theta_1 = \begin{cases} -\arctan 2(P'_{y4}, P'_{x4}) = -\arctan\left(\frac{P'_{y4}}{P'_{x4}}\right) & \text{falls S - Bit 0 = 0} \\ \pi - \arctan 2(P'_{y4}, P'_{x4}) = \pi - \arctan\left(\frac{P'_{y4}}{P'_{x4}}\right) & \text{falls S - Bit 0 = 1} \end{cases} \tag{20}$$

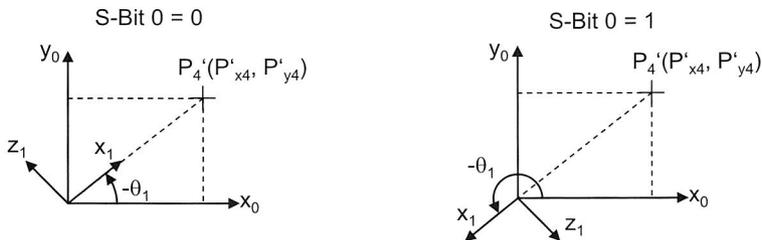


Bild 44: Projektion des Punktes P_4 in die x_0 - y_0 -Ebene sowie die Angabe des Drehwinkels θ_1 in Abhängigkeit der Armkonfiguration

Berechnung von θ_2

Dazu wird die Lage der Koordinatensysteme in der x_1 - y_1 -Ebene betrachtet (vgl. Bild 45). Mit den Abständen $a_1 = 300 \text{ mm}$, $d_1 = 675 \text{ mm}$, $a_3 = 155 \text{ mm}$, $d_4 = 600 \text{ mm}$, $a_2 = 650 \text{ mm}$ sowie den Additionstheoremen für Sinus und Kosinus

$$\begin{aligned}\cos(\alpha \pm \beta) &= \cos \alpha \cdot \cos \beta \mp \sin \alpha \cdot \sin \beta \\ \sin(\alpha \pm \beta) &= \sin \alpha \cdot \cos \beta \mp \cos \alpha \cdot \sin \beta\end{aligned}\quad (21)$$

lässt sich θ_2 unter Zuhilfenahme von

$$\begin{aligned}h_x &= \begin{cases} P_{x4} \cdot \cos(-\theta_1) + P_{x4} \cdot \sin(-\theta_1) - a_1 & \text{wenn S- Bit 0} = 0 \\ P_{x4} \cdot \cos(-\theta_1 - \pi) + P_{x4} \cdot \sin(-\theta_1 - \pi) + a_1 & \text{wenn S- Bit 0} = 1 \end{cases} \\ h_z &= P_{z4} - d_1 = P_{z4} - 675 \text{ mm} \\ R &= \sqrt{h_x^2 + h_z^2} \\ L &= \sqrt{a_3^2 + d_4^2} = \sqrt{(155 \text{ mm})^2 + (600 \text{ mm})^2} \approx 619,7 \text{ mm} \\ \cos \alpha &= \frac{h_x}{R}, \quad \sin \alpha = \frac{h_z}{R}\end{aligned}\quad (22)$$

sowie der Verwendung des Kosinussatzes für schiefwinklige Dreiecke

$$\cos \beta = \frac{(a_2^2 + R^2 - L^2)}{2 \cdot R \cdot a_2} = \frac{[R^2 - 24025 \text{ mm}^2]}{R \cdot 650 \text{ mm}} \quad \text{sowie} \quad \sin \beta = \sqrt{1 - \cos^2 \beta}, \quad (23)$$

berechnen:

$$\begin{aligned}\sin \theta_2 &= \begin{cases} \sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta & \text{für (S- Bit 0} = 0 \wedge \text{S- Bit 1} = 1) \vee (\text{S- Bit 0} = 1 \wedge \text{S- Bit 1} = 0) \\ \sin \alpha \cdot \cos \beta - \cos \alpha \cdot \sin \beta & \text{für (S- Bit 0} = 0 \wedge \text{S- Bit 1} = 0) \vee (\text{S- Bit 0} = 1 \wedge \text{S- Bit 1} = 1) \end{cases} \\ \cos \theta_2 &= \begin{cases} \cos \alpha \cdot \cos \beta - \sin \alpha \cdot \sin \beta & \text{für (S- Bit 0} = 0 \wedge \text{S- Bit 1} = 1) \vee (\text{S- Bit 0} = 1 \wedge \text{S- Bit 1} = 0) \\ \cos \alpha \cdot \cos \beta + \sin \alpha \cdot \sin \beta & \text{für (S- Bit 0} = 0 \wedge \text{S- Bit 1} = 0) \vee (\text{S- Bit 0} = 1 \wedge \text{S- Bit 1} = 1) \end{cases}\end{aligned}$$

$$\Rightarrow \theta_2 = \begin{cases} -\arctan\left(\frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2}\right) & \text{wenn S- Bit 0} = 0 \\ -\left[\pi - \arctan\left(\frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2}\right)\right] & \text{wenn S- Bit 0} = 1 \end{cases}\quad (24)$$

Berechnung von θ_3

Auch die Berechnung des Gelenkwinkels θ_3 kann in der x_1 - y_1 -Ebene erfolgen. Wie in Bild 45 dargestellt, ergibt sich:

$$\begin{aligned}\cos \varepsilon &= \frac{a_3}{L} = \frac{155 \text{ mm}}{\sqrt{(155 \text{ mm})^2 + (600 \text{ mm})^2}} \Rightarrow \varepsilon = 75,51^\circ \\ \sin \varepsilon &= \frac{e_3}{L} = \frac{600 \text{ mm}}{\sqrt{(155 \text{ mm})^2 + (600 \text{ mm})^2}} \Rightarrow \varepsilon = 75,51^\circ\end{aligned}\quad (25)$$

$$\cos \delta = \frac{(a_2^2 + L^2 - R^2)}{2 \cdot L \cdot a_2} \quad \text{sowie} \quad \sin \delta = \sqrt{1 - \cos^2 \delta} \quad (26)$$

$$\sin \theta_3 = \begin{cases} \sin \varepsilon \cdot \cos \delta + \cos \varepsilon \cdot \sin \delta & \text{für S - Bit 1 = 1} \\ \sin \varepsilon \cdot \cos \delta - \cos \varepsilon \cdot \sin \delta & \text{für S - Bit 1 = 0} \end{cases}$$

$$\cos \theta_3 = \begin{cases} \cos \varepsilon \cdot \cos \delta - \sin \varepsilon \cdot \sin \delta & \text{für S - Bit 1 = 1} \\ \cos \varepsilon \cdot \cos \delta + \sin \varepsilon \cdot \sin \delta & \text{für S - Bit 1 = 0} \end{cases} \quad (27)$$

$$\Rightarrow \theta_3 = -\frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{\sin \theta_3}{\cos \theta_3}\right)$$

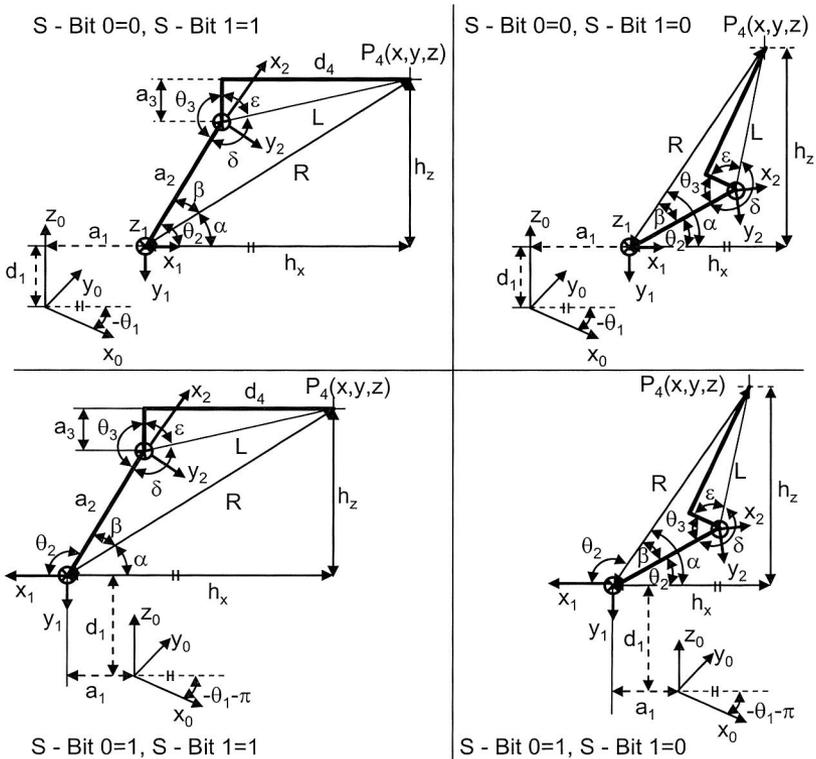


Bild 45: Berechnung von θ_2 und θ_3 in der x_1 - y_1 -Ebene unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Armkonfigurationen

Berechnung von θ_4 , θ_5 und θ_6

Während die ersten drei Gelenkwinkel lediglich auf Grund von trigonometrischen Beziehungen bestimmt werden konnten, müssen für die Berechnung der Handgelenkwinkel θ_4 , θ_5 und θ_6 die Transformationsmatrizen gebildet und über einen anschließenden Koeffizientenvergleich gelöst werden. Mit Hilfe der Winkel θ_1 , θ_2 und θ_3 lassen sich die Matrizen \mathbf{T}_{01} , \mathbf{T}_{12} und \mathbf{T}_{23} sowie \mathbf{T}_{03} bestimmen. Des Weiteren ist die vollständige Transformationsmatrix \mathbf{T}_{06} bekannt, sodass sich \mathbf{T}_{36} zu

$$\mathbf{T}_{36} = \mathbf{T}_{03}^{-1} \cdot \mathbf{T}_{06} \quad \text{mit } \mathbf{T}_{36} = \mathbf{T}_{34} \cdot \mathbf{T}_{45} \cdot \mathbf{T}_{56} \quad (28)$$

berechnen lässt. Durch anschließenden Koeffizientenvergleich folgt

$$\theta_4 = \begin{cases} -\arctan\left(\frac{-T_{36(1,2)}}{-T_{36(0,2)}}\right) & \text{für S - Bit 2 = 1} \\ -\arctan\left(\frac{T_{36(1,2)}}{T_{36(0,2)}}\right) & \text{für S - Bit 2 = 0} \end{cases} \quad (29)$$

Analoge Vorgehensweise führt mit $\mathbf{T}_{46} = \mathbf{T}_{04}^{-1} \cdot \mathbf{T}_{06}$ zu

$$\theta_5 = -\arctan\left(\frac{T_{46(0,2)}}{-T_{46(1,2)}}\right) \quad (30)$$

und

$$\theta_6 = -\arctan\left(\frac{T_{46(2,0)}}{T_{46(2,1)}}\right) \quad (31)$$

Berechnung des dreiwertigen S - Bits bei gegebener Winkelstellung

Für die Berechnung der Armkonfiguration dient das S - Bit, dessen Wert bei gegebenen Achswinkeln eindeutig definiert ist. Für die Bestimmung von Bit 0 wird der Punkt \mathbf{P}_4 in das erste Koordinatensystem zurück transformiert, d. h.

$$\begin{aligned} \mathbf{P}'_4 &= \mathbf{T}_{01}^{-1} \cdot \mathbf{P}_4 \\ \text{S - Bit 0} &= \begin{cases} 0 & \text{falls } \mathbf{P}'_x + 300 \text{ mm} \geq 0 \\ 1 & \text{falls } \mathbf{P}'_x + 300 \text{ mm} < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (32)$$

Für die Bestimmung des Bit 1 erfolgt eine Transformation von \mathbf{P}_4 in das zweite Koordinatensystem, sodass folgt:

$$\text{S - Bit 1} = \begin{cases} 0 & \text{falls } (\mathbf{T}_{23} \cdot \mathbf{T}_{34})_{(2,4)} < 0 \\ 1 & \text{falls } (\mathbf{T}_{23} \cdot \mathbf{T}_{34})_{(2,4)} \geq 0 \end{cases} \quad (33)$$

Zur Angabe von Bit 2 genügt lediglich die Berücksichtigung des Gelenkwinkels θ_5

$$S\text{-Bit } 2 = \begin{cases} 0 & \text{für } \theta_5 \geq 0 \\ 1 & \text{für } \theta_5 < 0 \end{cases} \quad (34)$$

Somit sind die Grundlagen vorhanden, um einen autonomen Bahnplaner für Industrieroboter in Verbindung mit einer effektiven Kollisionsüberwachung zu implementieren. Im folgenden Abschnitt werden die oben dargelegten Mechanismen auf kooperierende Industrierobotersysteme erweitert und insbesondere dabei auftretende Besonderheiten näher erläutert.

5.3 Autonome Bahnplanung für kooperierende Industrieroboter

Wie in den Kapiteln 2.3 und 3 dargestellt, kommen heutzutage vereinzelt Multirobotersysteme zum Einsatz, die auf dem Master-Slave-Prinzip beruhen. Allerdings gestaltet sich deren Programmierung und Inbetriebnahme sehr zeitintensiv und fehleranfällig. Ebenso erweist sich auch der Betrieb als störungsanfällig, da die einprogrammierten Sequenzen einfach starr abgearbeitet werden. Eine Kollisionsüberwachung und -vermeidung, wie in Kapitel 5.2.2 vorgestellt, ist nicht vorgesehen, sodass es jederzeit zu Zusammenstößen der Effektoren untereinander oder mit der Zellenperipherie kommen kann. Im Folgenden wird dargelegt, wie sich die vorgestellten Bahnplanungsmechanismen und Kollisionsvermeidungsstrategien auf kooperierende Industrieroboter übertragen und anwenden lassen.

Berücksichtigung von dynamischen Hindernissen

Im obigen Verlauf wurde bislang immer nur ein Industrieroboter in einer Montagezelle betrachtet, der sich in einer abgeschlossenen und unveränderlichen Umgebung bewegt. Daher können die vorhandenen Objekte – der Roboterarm ausgenommen – als unbeweglich angesehen werden. Demzufolge ist es vor Beginn der Bewegungsplanung ausreichend, ein einziges Mal ein Modell der Realität zu erstellen und dieses als Berechnungsgrundlage zu verwenden, da sich im Verlauf der Zeit nichts verändern wird (\Rightarrow statischer Fall).

Allerdings kann diese Vorgehensweise bereits dann nicht mehr angewendet werden, wenn bewegliche Objekte vorhanden sind. Würde hierbei lediglich die Anfangssituation als Bahnplanungsgrundlage dienen, so könnte nicht über den gesamten zeitlichen Verlauf gewährleistet werden, dass die Trajektorie ebenfalls kollisionsfrei ist. Um dennoch eine Bewegung ohne Zusammenstöße sicher zu stellen, gilt es in kurzen Zeitintervallen Δt die sich ständig verändernde räumliche Situation mit Hilfe eines geeigneten Sensorsystems erneut zu detektieren und das Berechnungsmodell für die Bahnplanung anzupassen (\Rightarrow dynamischer Fall). Änderungen bzw. Abweichungen hinsichtlich der vorausbestimmten Trajektorie müssen dann umgehend an die Robotersteuerung übermittelt werden, um Zusammenstöße und folglich einen Stillstand der Anlage zu vermeiden.

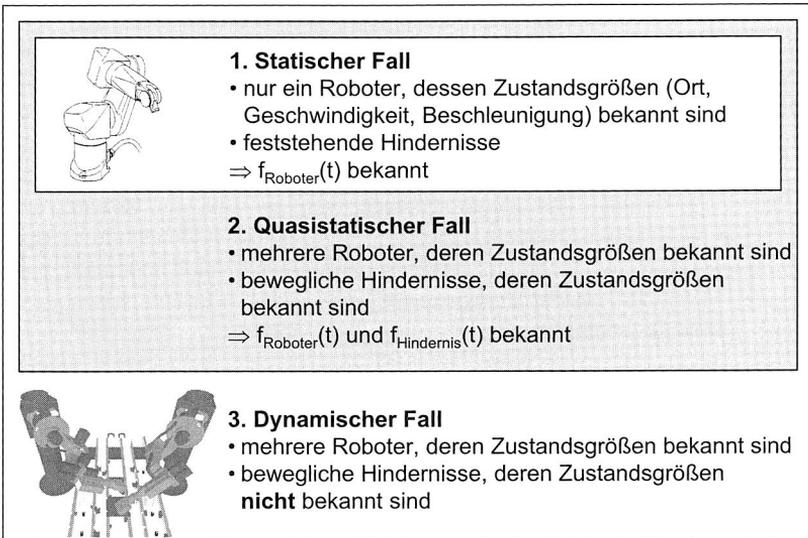


Bild 46: Differenzierung der Bahnplanungsmöglichkeiten vom statischen bis hin zum dynamischen Fall

Eine analoge Vorgehensweise bietet sich an, wenn kooperierende Industrieroboter mit autonomer Bahnplanung zum Einsatz kommen sollen. Dies bedeutet, dass nicht mehr komplette Bewegungen im Voraus bestimmt werden, sondern vielmehr im Zeitintervall Δt neue Zielpunkte an die Robotersteuerung übergeben werden, die sodann vom Roboter anzufahren sind. Dadurch ergeben sich kleine Wegsegmente, die aneinandergereiht eine Bewegung vom Start- zum Zielpunkt ergeben und überdies während der gesamten Zykluszeit kollisionsfrei sind. Unter der Voraussetzung, dass die Montagezelle von der Umgebung durch entsprechende Sicherheitseinrichtungen abgetrennt ist, kann angenommen werden, dass lediglich die Handhabungsgeräte als bewegliche Objekte angesehen werden müssen und demzufolge auf eine zusätzliche externe Sensorik zur Positionserfassung von Gegenständen verzichtet werden kann. Daher gilt es auszunützen, dass die Zustandsgrößen der Roboter, wie beispielsweise aktuelle Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung, zu jedem Zeitpunkt während der Bewegungsausführung bekannt sind, sodass der quasistatische Fall bei den kooperierenden Industrierobotern anwendbar ist.

Durch die Bahnplanung in Form von Wegsegmenten wird auch der Forderung einer flexiblen Trajektorienplanung nachgekommen, da die Bewegung jederzeit dynamisch angepasst und somit neben statischen nun auch beweglichen Hindernissen ausgewichen werden kann. Dies ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn mehrere Handhabungsgeräte sich gleichberechtigt einen gemeinsamen Arbeitsraum teilen. Damit nun eine Bahnplanung für kooperierende Roboter realisiert werden konnte, galt

es von allen in der Zelle befindlichen Effektoren deren Tool Center Point bzw. die einzelnen Gelenkwinkel der jeweiligen Segmente der kinematischen Kette über den Controller des Roboters zyklisch abzufragen. Somit ließ sich immer wieder die Berechnungsgrundlage, d. h. das rechnerinterne Modell erneuern und die Bahnplanung konnte von neuem beginnen. Als Zeitintervall Δt wurde dabei der Interpolationstakt (IPO) der Robotersteuerung zu Grunde gelegt, der typischerweise im Bereich von 10-15 msec liegt. Dieser Systemtakt gibt steuerungsseitig vor, in welchem Zeitintervall vom Controller ein neuer Bahnstützpunkt angefordert wird, um eine kontinuierliche Roboterbewegung realisieren zu können. Im Umkehrschluss bedeutet dies aber auch, dass der Bahnplaner innerhalb dieses Zeitabschnitts eine neue Position berechnen und anschließend wieder an die Robotersteuerung senden muss.

5.4 Zusammenfassung

Die autonome Bahnplanung lässt sich in drei Grundprinzipien unterteilen: Landkarten-, Zellerlegungs- und Potentialfeldmethode. Dabei zählen die beiden erstgenannten zu den globalen Verfahren, da für die Bewegungsplanung der gesamte Arbeitsraum des Roboters betrachtet werden muss. Die letztgenannte gehört zu den lokalen Methoden, weil hierbei lediglich die aktuelle Ist-Position sowie deren nähere Umgebung und der Zielpunkt mit in die Berechnung einfließen. Die Landkartenmethode findet hauptsächlich bei der Bewegungsplanung von frei navigierenden Fahrzeugen Verwendung und lässt sich nur schwer auf das hier betrachtete dreidimensionale Bahnplanungsproblem der Industrieroboter erweitern, weswegen diese Methode im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter verfolgt wird.

Besser geeignet ist die Anwendung der Zellerlegung und insbesondere das näherungsweise Verfahren, bei dem der gesamte Arbeitsraum mit Hilfe von geometrisch einfachen Zellen, wie beispielsweise Rechtecken oder Quadern, approximiert wird. Dabei gilt es in Abhängigkeit des Zelleninhaltes von Freiraum und Hindernissen zwischen den unterschiedlichen Zuständen „frei“, „belegt“ und „teilweise besetzt“ zu differenzieren. Mittels lokaler Verfeinerung der teilbelegten Zellen bis zu einer vordefinierten Größe bzw. Diskretisierungsstufe lässt sich die räumliche Situation sehr genau nachbilden. Mit dem Approximationsverfahren kann einerseits der Rechenaufwand begrenzt und andererseits durch die Wahl des Detaillierungsgrades die zur Verfügung stehende Rechenleistung bestmöglich ausgenutzt werden. Alle bei dieser Methode neu gebildeten Zellen können in einem 2^m -Baum dargestellt werden, der anschließend mit Suchalgorithmen der Grafentheorie nach einem Kanal, bestehend aus freien Zellen, vom Start- zum Zielpunkt durchsucht wird. Eine Erweiterung auf dreidimensionale Problemstellungen, wie sie in der Robotik die Regel sind, lässt sich mit Hilfe des Octree-Verfahrens bewerkstelligen.

Im Gegensatz zu den beiden anderen Möglichkeiten zählt die Potentialfeldmethode zu den lokalen Verfahren. Des Weiteren wird hierbei nicht die komplette Bahn im Voraus berechnet, sondern es werden vielmehr zur Laufzeit kleine Wegsegmente generiert.

Das Grundprinzip dieses Verfahrens beruht darauf, dass der Roboter von seinem Ziel angezogen und von allen Hindernissen abgestoßen wird. Dieses Verhalten kann mit Potentialen sowie dem Gradientenverfahren auf rein mathematischem Weg umgesetzt werden, sodass in jedem Punkt des betrachteten zwei- oder dreidimensionalen Arbeitsraumes ein resultierender Bewegungsvektor berechnet werden kann. Dieser hat die Eigenschaft, dass er in Richtung des Zielpunktes, aber gleichzeitig auch von Hindernissen weg zeigt. Folgt der Roboter dieser Richtung ein kurzes Stück, so ist gewährleistet, dass diese Bewegung kollisionsfrei ist. Aus der zyklischen Anpassung des Berechnungsmodells und der Wiederholung der Bewegungsplanung resultiert eine Vielzahl an kurzen Bahnsegmenten, die aneinandergereiht eine kollisionsfreie Gesamtbewegung vom Start- zum Zielpunkt ergeben, wobei die Berechnung während der Ausführungszeit erfolgt.

Für die Bewegungsplanung von realen und insbesondere kooperierenden Industrierobotern eignet sich besonders die Potentialfeldmethode. Dies lässt sich damit begründen, dass nur kleine Wegsegmente zyklisch im Interpolationstakt der Robotersteuerung geplant werden und somit die Möglichkeit gegeben ist, jederzeit die Bahn an die aktuell vorliegende räumliche Situation anzupassen. Gleichzeitig lassen sich bewegliche Hindernisse bei der Bahngenerierung berücksichtigen, wie beispielsweise ein anderer Roboterarm o. ä., und die Trajektorie dementsprechend adaptieren, sodass eine Kollision vermieden wird.

Allerdings kann es beim Einsatz der Potentialfeldmethode als autonomen Bahnplaner zu so genannten lokalen Minima kommen, die den Roboter „gefangen“ nehmen. Demzufolge terminiert die Bewegung, obwohl der Zielpunkt noch nicht erreicht wurde. Dies ist darauf zurückzuführen, dass an manchen Stellen die anziehende und abstoßende Kraft betragsmäßig gleich groß und entgegengesetzt gerichtet sind, sodass sie sich gegenseitig aufheben. Die gleiche Situation tritt theoretisch insbesondere bei zwei kooperierenden Robotern auf, wenn deren Ziele auf einer Verbindungsgeraden liegen und die Bewegungsrichtungen entgegengesetzt sind. Jedoch tritt dieser Fall in der Realität äußerst selten auf, da aus der Positioniergenauigkeit des Effektors immer kleine Winkelabweichungen resultieren und somit das lokale Minimum niemals exakt erreicht wird. Darüber hinaus kann es auf Grund der Berücksichtigung der gesamten kinematischen Ketten zu einer gegenseitigen Verklemmung kommen, sodass sich keine kollisionsfreie Bewegungsrichtung mehr ergibt. Die einfachste Lösung besteht darin, beim Erkennen einer derartigen Situation der ursprünglichen Bewegung einen Korrekturvektor zu überlagern, sodass sich der betroffene Arm in Richtung seines Ursprungs bewegt. Demzufolge zieht er sich aus dem gemeinsamen Arbeitsraum zurück und die Bahnplanung kann erneut gestartet werden.

Somit konnte mit Hilfe der Potentialfeldmethode ein Bahnplaner für dreidimensionale Problemstellungen entwickelt werden, der eine autonome Trajektorienberechnung zur Laufzeit des Gesamtsystems ermöglicht und demzufolge auf beliebige Kinematiken von Industrieroboter angewendet werden kann. Daher lassen sich alle Bewegungen des

Effektors überwachen, sodass drohende Kollisionen sicher erkannt und vermieden werden. Insbesondere bei kooperierenden Systemen, bei denen sich mehrere Handhabungsgeräte in einem gemeinsamen Arbeitsraum bewegen, bietet diese Vorgehensweise ein Höchstmaß an Sicherheit. Auf Grund der dynamischen Bahnplanung zur Laufzeit, d. h. kein starres Abfahren von vorausberechneten Trajektorien, können auch Objekte bzw. Hindernisse mit berücksichtigt werden, die sich innerhalb der Montagezelle bewegen. Durch den Einsatz des autonomen Bahnplaners steht demzufolge ein Gesamtsystem zur Verfügung, das sich selbstständig jederzeit an die aktuell vorliegende räumliche Situation anpasst, woraus eine nachhaltige Verkürzung der Programmierzeit bei gleichzeitiger Entlastung des Anwenders folgt.

6 Umsetzung des Montagekonzepts für kooperierende Knickarmroboter

In den vorangegangenen Kapiteln wurden mit der CAD-gestützten Montageplanung (vgl. Kapitel 4) sowie der autonomen Bewegungsplanung für Industrieroboter (vgl. Kapitel 5) Möglichkeiten vorgestellt und eingehend erläutert, durch deren Anwendung eine nachhaltige Verkürzung des Produktentstehungsprozesses – mit dem Hauptaugenmerk auf die Montage – erzielt werden kann. Diese beiden Punkte dienen im Rahmen der folgenden Kapitel als Grundlage für die Umsetzung des in Kapitel 3 vorgestellten Gesamtkonzepts, sodass daraus ein verkürzter, robuster und fehlertoleranter Montageprozess resultiert. Dabei kommen so genannte kooperierende Industrieroboter zum Einsatz, die durch zeitlich und räumlich koordinierte Bewegungen in der Lage sind, eine ihnen gestellte Aufgabe in Zusammenarbeit zu erfüllen. Infolgedessen kann wegen einer Parallelisierung von Arbeitsschritten eine weitere Reduzierung der reinen Taktzeit bei der Montagedurchführung erzielt werden.

Von Seiten der Roboterhersteller sind in Richtung Mehrrobotersysteme Entwicklungstendenzen erkennbar und auch bereits erste Lösungen kommerziell verfügbar. Der zu Grunde liegende Gedanke ist eine Verbesserung von Bearbeitungs- und Qualitätsergebnissen sowie die Möglichkeit der vorrichtungslosen Bauteilbearbeitung (vgl. Kapitel 2.3) [63, 64]. Hinsichtlich der technischen Umsetzung verfolgen verschiedene Hersteller dabei unterschiedliche Konzepte, bei denen einerseits mehrere Handhabungsgeräte an einer Steuerung angeschlossen sind. Andererseits existieren Varianten, bei denen jeder Roboter über seinen eigenen Controller verfügt und die anschließend mittels eines Feldbusses miteinander gekoppelt sind. Völlig unabhängig von der angebotenen Steuerungslösung basieren alle Ansätze auf dem Master-Slave-Prinzip, d. h. der Beginn einer gemeinsamen Bewegung wird von einem Handhabungsgerät, dem Master, initiiert. Die Slaves können ihm entweder durch eine geometrische Zwangskopplung folgen, was beim gemeinsamen Handhaben schwerer Lasten ausgenutzt wird, oder arbeiten eine ihnen fest vorgegebene Bewegungssequenz ab. Infolgedessen besteht keine Möglichkeit einer dynamischen Aufgabenabarbeitung sowie Hindernissen bzw. den anderen Effektoren selbstständig auszuweichen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen-Nürnberg zwei Montagezellen aufgebaut, in denen unterschiedliche Roboterkinematiken zum Einsatz kommen. Gemeinsames Ziel ist es – wie bereits erläutert – den Montageprozess zu verkürzen und robust zu gestalten. Gemäß der Definition eines kooperierenden Systems besitzen die Industrieroboter einen gemeinsamen Arbeitsraum, in dem ein Montageprozess in Kooperation durchgeführt werden kann. In den folgenden Kapiteln ist gezeigt, wie die erarbeiteten Grundlagen in ein funktionierendes reales Gesamtsystem überführt wurden.

6.1 Realisierte Montagezelle mit Knickarmrobotern der Firma Kuka

In der ersten hier vorgestellten Montagezelle kommen zwei Knickarmroboter vom Typ KR 6/2 der Firma Kuka Roboter GmbH zum Einsatz. Jeder von ihnen verfügt über sechs Freiheitsgrade und ist demzufolge in der Lage, einen Punkt p in seinem torusförmigen Arbeitsraum in unterschiedlichen Orientierungen anzufahren. Das mit dieser Montagezelle verfolgte Ziel ist die nachhaltige Verkürzung der Anlagenprogrammierung durch die Verwendung eines autonomen Bahnplaners. Des Weiteren sollen unter Benutzung beider Arme komplexe Montageoperationen möglich sein. Dazu zählen Prozesse, wie z. B. Umgreifen und Übergeben von Objekten oder gemeinsames Fügen von zwei Teilbaugruppen, die normalerweise gar nicht bzw. nur durch die Integration von zusätzlichen Hilfsachsen realisierbar sind.

Damit eine möglichst große Überlappung der beiden Arbeitsräume erzielt wird, erfolgte zunächst unter Zuhilfenahme der Kinematiksimulation Igrid der Firma Delmia eine Untersuchung hinsichtlich verschiedener Anordnungsformen der Effektoren. Veränderliche Parameter waren hierbei die Orientierung der Roboter selber, d. h. Boden- oder Wandanbringung, der Abstand zwischen den Handhabungsgeräten sowie deren Drehung zueinander. Zusätzlich wurden noch drei parallel angeordnete Doppelgurtbänder mit in die Zelle integriert, mit denen Bauteile auf Werkstückträgern zugeführt und abtransportiert werden können. Im Hinblick auf Erreichbarkeit der Spannstationen sowie der Größe des gemeinsamen Arbeitsbereiches hat sich die Wandmontage in einer Höhe von 1700 mm mit einer Drehung der Effektoren um je 30° zueinander im Rahmen einer Simulationsuntersuchung als eine sehr gute Lösung herausgestellt. Daraus resultiert ein linsenförmiger Arbeitsraum, in dem die zwei Roboter gemeinsam Montageoperationen durchführen und demzufolge kooperieren können.

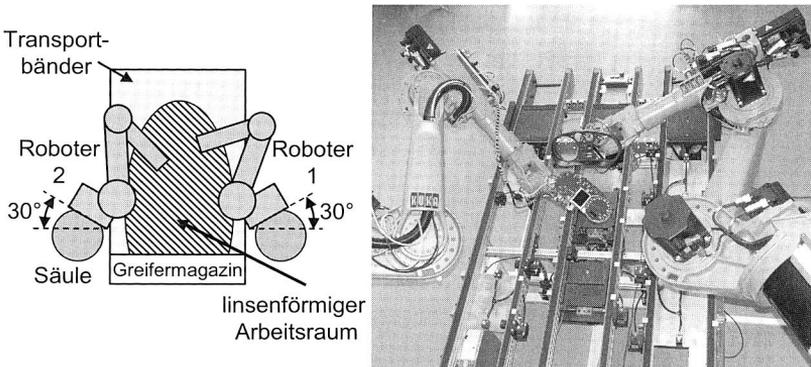


Bild 47: Die Montagezelle enthält zwei Knickarmroboter, woraus ein gemeinsamer linsenförmiger Arbeitsraum resultiert

Die drei Doppelgurtbänder können Werkstückträger der Maße 320 mm x 320 mm transportieren und beinhalten insgesamt sechs Spannstationen – je zwei pro Band – von denen die äußeren der Teilebereitstellung und die mittleren für das Aufbauen bzw. Ablegen der Baugruppe dienen. Die Steuerung erfolgt mittels einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) der Firma Beckhoff, die über Ethernet vom Leitrechner aus angesprochen werden kann. Des Weiteren befindet sich innerhalb des gemeinsamen Arbeitsraumes ein so genanntes Greifermagazin, das von beiden Robotern erreicht wird. Darin können unterschiedliche Greifer zwischengespeichert werden, sodass die Anzahl an Werkzeugen innerhalb der Zelle reduziert werden kann. Die Handhabungsgeräte sind mit einem Greiferwechselsystem GWS 64 der Firma Schunk ausgestattet, das einen Werkzeugwechsel auch während des laufenden Betriebs erlaubt.

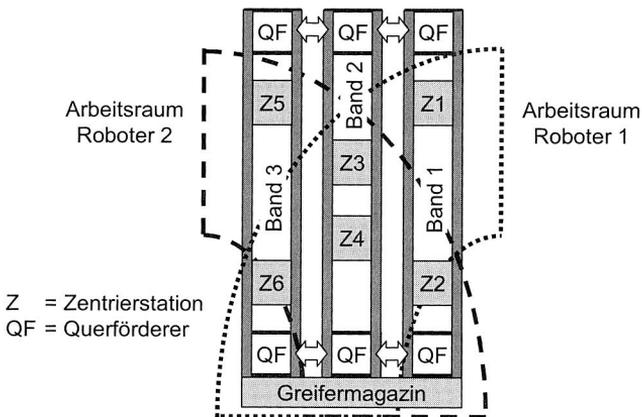


Bild 48: Anordnung der Zentrier- und Spannstationen innerhalb der Doppelgurtbänder sowie des gemeinsamen Arbeitsraumes der Roboter

6.2 Steuerungskonzept für kooperierende Industrieroboter

Für die Realisierung der gestellten Ziele, d. h. die Möglichkeit einer Kooperation zwischen zwei oder mehreren Industrierobotern sowie einer autonomen Bahnplanung, ist ein entsprechend leistungsfähiges Steuerungskonzept erforderlich. Dabei soll allerdings zu Grunde liegen, dass die zu entwickelnde Lösung nicht nur auf einen speziellen Hersteller und einen Typ von Steuerungsgeneration zugeschnitten, sondern universell einsetzbar ist. Dies hat zur Folge, dass keinerlei hard- oder softwaretechnische Eingriffe bzw. Veränderungen an den Controllern vorgenommen werden dürfen. Vielmehr gilt es die von Seiten des Herstellers angebotenen Schnittstellen zu verwenden, um den gestellten Forderungen Rechnung zu tragen. Somit kann der hier entwickelte Lösungsansatz einerseits auf unterschiedliche Hersteller übertragen und andererseits ein Mix verschiedener Kinematiken realisiert werden. Dies bedeutet bei der Umsetzung eine Herstellerneutralität sowie die Möglichkeit von heterogenen Systemstrukturen.

6.2.1 Allgemeiner Steuerungsansatz mit einem Leitreechner

Zwischen den in einer Montagezelle befindlichen Steuerungen, primär die der Roboter, Transportbänder, Zusatzachsen etc., müssen Informationen über deren aktuelle Position und Betriebszustand ausgetauscht werden. Darüber hinaus gilt es zusätzliche technologische Daten, wie beispielsweise den Befehl für das Öffnen oder Schließen eines Greifer etc. zu übermitteln. Für die Kommunikation können Feldbussysteme, wie beispielsweise Profi-, CAN-Bus oder Devicenet eingesetzt werden [23, 37, 69, 109, 128]. In letzter Zeit hat sich das Ethernet neben der Büro- auch in der Feldebene etabliert, weswegen diese Technologie hier zum Einsatz kommt [7, 60, 131]. Nahezu alle modernen Robotersteuerungen verfügen ebenfalls über eine Ethernetschnittstelle, sodass bei der Kommunikation mit dem Leitreechner eine Datentransformation mittels Schnittstellen über verschiedene Übertragungsmedien hinweg vermieden wird. Daraus resultiert im Gegensatz zur klassischen Kommunikationspyramide [60] eine sehr flache Kommunikationshierarchie innerhalb der Montagezelle zwischen den angeschlossenen Robotercontrollern und dem Leitreechner, der für die Auftragsverwaltung sowie Bahnplanung verantwortlich ist (vgl. Bild 49) [116].

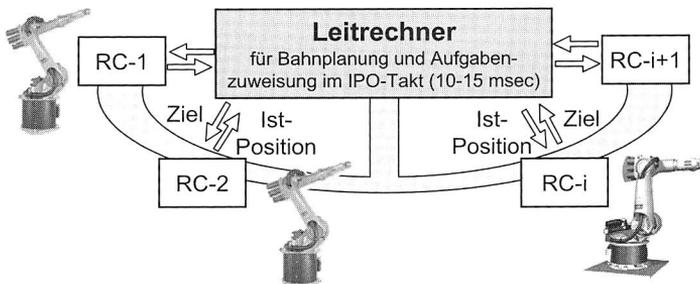


Bild 49: Verknüpfung der Steuerungen mittels Ethernet für einen zyklischen Informationsaustausch

Bei der autonomen Bahnplanung für kooperierende Industrieroboter gilt es, wie bereits in Kapitel 5.3 angesprochen, dynamische Hindernisse zu berücksichtigen. Im vorliegenden Fall müssen die beiden Effektoren als solche angesehen werden, wenn weiterhin vorausgesetzt wird, dass die Zelle ansonsten abgeschlossen ist. Demzufolge kann zu jedem beliebigen Zeitpunkt t_i die exakte räumliche Lage der Effektoren über die Controller bestimmt werden, um im Anschluss daran auf Grundlage des neuen rechnerinternen Modells einen weiteren Stützpunkt der kollisionsfreien Trajektorie zu berechnen.

Hierzu gilt es die Ist-Position bzw. Gelenkwinkel der einzelnen Segmente der kinematischen Kette eines jeden Roboters an den Leitreechner zu senden. Dieser ist sodann in der Lage, unter Berücksichtigung der anzufahrenden Zielposition sowie eines autonomen Bahnplaners (vgl. Kapitel 5) die neue Stützposition zu berechnen und diese wiederum an die Steuerung zu übermitteln. Dieser Zyklus wird solange wiederholt, bis

der Zielpunkt erreicht wurde. Für einen Durchlauf, der sich aus Empfangen der Ist-Position, Berechnen des Stützpunktes und Senden dieser Position zusammen setzt, steht ein Interpolationstakt (IPO) der Robotersteuerung zur Verfügung, der typischerweise im Bereich von 10-15 msec liegt. Erst durch diese wiederholte Vorgehensweise wird die Möglichkeit eröffnet, die automatisch generierte Montagesequenz (vgl. Kapitel 4) selbstständig abzuarbeiten, ohne dass der Anwender noch einen großen manuellen Programmieraufwand vornehmen muss. Vielmehr organisieren sich die Handhabungsgeräte von alleine und führen die ihnen gestellte Aufgabe in Kooperation ohne Kollision aus. Daraus resultiert ein robuster, verkürzter und fehlertoleranter Montageprozess.

Erst die Vernetzung der einzelnen Controller untereinander bzw. mit dem Leitreechner durch einen geeigneten Feldbus erlaubt einen Austausch von steuerungsinternen Informationen, wie beispielsweise TCP oder einzelne Gelenkwinkel, Schaltzustände der Ein- und Ausgänge, Betriebsmodus etc.. Um eine Portierung des hier entwickelten Lösungsansatzes auch auf andere Systeme ohne großen Adaptierungsaufwand zu ermöglichen, kommen ausschließlich Standardschnittstellen zum Einsatz, die von Seiten des Herstellers angeboten werden. Es ließe sich unter Umständen eine einfachere Umsetzung des Konzepts erzielen, wenn eine hard- bzw. softwaretechnische Veränderung der Controller vorgenommen würde. Dies hätte allerdings einen massiven Eingriff in das Sicherheitssystem des Herstellers zur Folge und somit wäre die Möglichkeit des industriellen Einsatzes nicht mehr ohne weiteres gewährleistet.

Darüber hinaus würde sich die vorgestellte Lösung auf einen speziellen Hersteller beschränken und wäre bei Veränderung der Steuerung bzw. dem Einsatz eines anderen Fabrikats nicht oder ggf. lediglich unter einem großen Änderungsaufwand anwendbar. Demzufolge wurden keinerlei Eingriffe an den Controllern vorgenommen, sondern ausschließlich die Kommunikationswege verwendet, die vom Hersteller zur Verfügung gestellt werden. Die Funktionsweise des Datenaustausches sowie die Kommunikation am Beispiel des Roboterherstellers Kuka Roboter GmbH werden im folgenden Kapitel detaillierter betrachtet und das realisierte Steuerungskonzept eingehend erläutert.

6.2.2 Kommunikation mit den Knickarmrobotern KR 6/2

Für den Datenaustausch zwischen dem Leitreechner und den Controllern der Firma Kuka wird das Real Time Communication Interface (RTCI) angewandt. Es erlaubt den Austausch von Positionen bzw. Korrekturwerten zwischen einem externen Computer und einer Robotersteuerung in Echtzeit [97]. Hierfür wird in der Programmiersprache C++ sowohl eine Datenstruktur `RTCI_ROB_DATA` für das Auslesen der aktuellen Position, als auch `RTCI_EXT_DATA` für die Vorgabe von Korrekturwerten in Bezug auf den Effektor, zur Verfügung gestellt. Über Variablen der Struktur `RTCI_ROB_DATA` lassen sich die Ist-Position des Roboters in kartesischen oder achsspezifischen Angaben sowie der Wert bzw. Status weiterer Systemvariablen abfragen.

Damit die vom Bahnplaner berechnete neue Position angefahren werden kann, werden mittels der Struktur `RTCI_EXT_DATA` entweder kartesische Korrekturwerte, d. h. Δx , Δy , Δz und ΔA , ΔB , ΔC , oder aber Winkeländerungen $\Delta \theta_i$ für einzelne Gelenkachsen vorgegeben. Wichtig bei der Implementierung des Bewegungsplaners ist, dass das Senden und Empfangen von Nachrichten immer paarweise erfolgen muss. Wird dies nicht beachtet, so kommt kein Verbindungsaufbau zustande.

Die Initialisierung der Kommunikation zwischen Leitreechner und den beiden Robotersteuerungen erfolgt durch die Angabe einer jeweils eindeutigen IP-Adresse, sodass anschließend mittels der RTCI-Verbindung im Wesentlichen ein Datenkanal auf Grundlage von so genannten Sockets aufgebaut wird. Nach erfolgreicher Initialisierung gilt es im Interpolationstakt der Controller, der typischerweise im Bereich von 10-15 msec liegt, Daten zwischen ihnen und dem Leitreechner, auf dem der in Kapitel 5.3 vorgestellte autonome Bahnplaner implementiert ist, auszutauschen. Wenn demzufolge kontinuierlich ein Korrekturwert übermittelt wird, bedeutet dies, dass der Effektor ständig verfahren wird. Im Umkehrschluss muss entsprechend ein Null-Vektor übermittelt werden, um die Bewegung anzuhalten, aber dennoch die Kommunikation aufrecht zu erhalten.

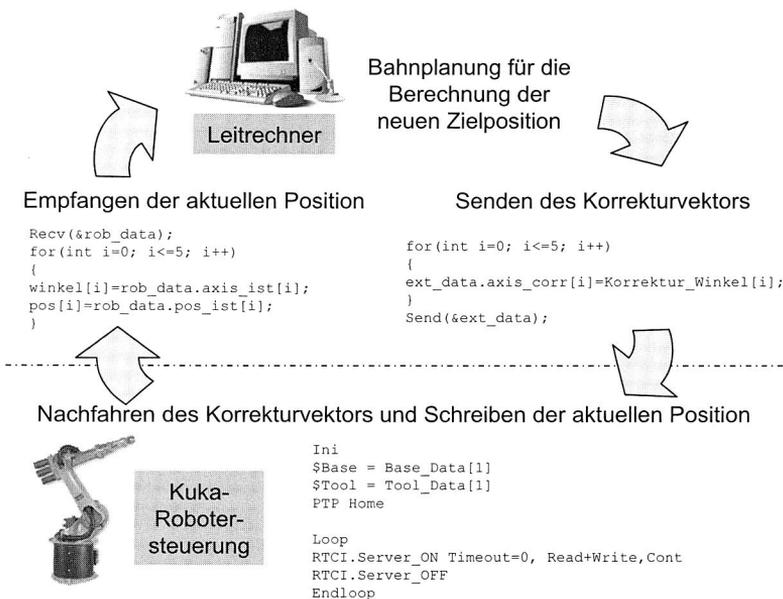


Bild 50: Datenaustausch in Echtzeit zwischen dem Leitreechner und einer Robotersteuerung von Kuka mit Hilfe des Real Time Communication Interface (RTCI)

Im Gegensatz zu der herkömmlichen Programmierung von Industrierobotern, bei der steuerungsseitig vollständige Ablauf- und Bewegungssequenzen abgearbeitet werden, ist bei der hier beschriebenen Vorgehensweise lediglich ein kleines Programm erforderlich (siehe Bild 50 unten). Es initialisiert in einer Endlosschleife immer wieder den RTCI-Server, übermittelt auf diese Weise zyklisch die aktuelle Ist-Position des Roboterarms und empfängt die übertragenen Korrekturwerte. Sobald dies geschehen ist, verfährt der Effektor um diese Werte und der oben dargestellte Kommunikationszyklus beginnt von neuem.

6.2.3 Überführung des Steuerungskonzepts in ein dezentrales System

Das oben beschriebene Steuerungskonzept basiert auf einem zentralen Ansatz mit einem Leitreechner, der wiederum mit allen in der Montagezelle befindlichen Controllern über einen Feldbus – im vorliegenden Fall Ethernet – verbunden ist. Dadurch ist es möglich, die für die Bahnplanung erforderlichen Daten, wie Ist-Position bzw. Gelenkwinkel, dynamisch auszutauschen, um anschließend eine kollisionsfreie Trajektorie zu berechnen. Wie in Kapitel 5.2.3 gezeigt, wird hierfür ein mathematisches Modell der verwendeten Kinematik benötigt. Auch die Bewegungsplanung auf der Robotersteuerung basiert auf einem derartigen Modell mittels Denavit-Hartenberg-Parameter. Demzufolge ist es nahe liegend, dass auf der Robotersteuerung selbst die autonome Bahnplanung stattfindet. Hierzu müssten die erforderlichen Abschnitte der Trajektorienberechnung sowie der Kommunikation jeweils mit in den Controller integriert werden, sodass der Leitreechner in ein dezentrales System überführt werden kann (vgl. Bild 51).

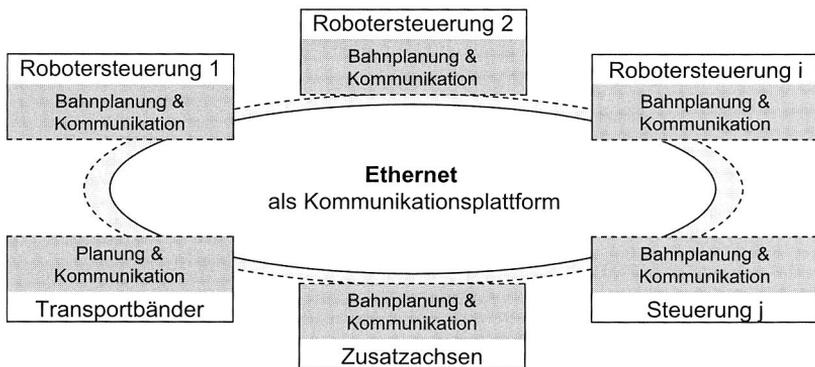


Bild 51: Überführung des entwickelten Steuerungskonzepts in ein dezentrales System, bei dem jeweils der Bahnplaner sowie Kommunikationsmechanismen mit in die Steuerung integriert sind

Die Robotersteuerungen haben ihre Stärke in der Koordinatentransformation sowie der Bewegungsregelung des Effektors. Somit könnte ihr Leistungspotential bei dem dezentralen Lösungsansatz voll zur Geltung kommen. Ferner ließe sich der

Kommunikationsaufwand reduzieren, da lediglich noch die Positionen bzw. Gelenkwinkel der anderen Roboterarme empfangen werden müssten. Die eigentliche Bahnplanung und demzufolge die Berechnung des neuen Zielpunktes würde dann auf dem jeweiligen Controller erfolgen und die anschließende Bewegung unmittelbar ausgeführt. Infolgedessen sinkt die Rechenlast pro Maschine, da jede Steuerung nur noch einen einzigen Stützpunkt berechnen muss und nicht mehr alle Zielpositionen auf einem Leitrechner. Somit stellt nicht mehr die Rechenleistung den limitierenden Faktor dar, sondern die Übertragungsrate der Ist-Positionen.

Ein weiterer Vorteil des dezentralen Steuerungssystems besteht darin, dass der zeitliche Aufwand für die Inbetriebnahme einer Montagezelle mit kooperierenden Industrierobotern nachhaltig vereinfacht und verkürzt wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Struktur der Anlage sowie deren Aufbau automatisch erkannt werden kann. Hierfür ist es erforderlich, dass sich jeder Controller gegenüber den anderen identifiziert und über ein eigenes mathematisches Modell der zu steuernden Kinematik verfügt. Demzufolge müsste der Anwender lediglich zu Beginn einmalig die räumlichen Beziehungen untereinander durch die Vorgabe eines gemeinsamen Koordinatensystems sowie zu starren Hindernissen definieren. In Verbindung mit dem entwickelten autonomen Bahnplaner mit integrierter Kollisionsvermeidung sind bereits die Roboter in der Lage, eine ihnen vorgegebene Bewegung kollisionsfrei durchzuführen.

Die Umsetzung eines derartigen dezentralen Steuerungssystems erfordert allerdings Änderungen und Eingriffe an der Architektur der Robotercontroller. Dies kann zwar bewerkstelligt werden, würde jedoch mit der Neuentwicklung einer Steuerung gleichzusetzen sein. Demzufolge blieben sämtliche Sicherheitsvorkehrungen des Herstellers außen vor, was zur Folge hätte, dass entweder die Akzeptanz von Seiten des Produzenten und der Anwender fehlt, oder aber die Sicherheitsvorkehrungen erneut überprüft werden müssen. Daher empfiehlt es sich, die Portierung des hier vorgestellten Lösungsansatzes in ein dezentrales System in Kooperation mit den Roboterherstellern durchzuführen, um von gegenseitigen Synergieeffekten profitieren zu können.

6.3 Autonome Bahnplanung auf Grundlage der Potentialfeldmethode für die Knickarmroboter KR 6/2

Im vorangegangenen Kapitel 5 wurden die drei grundlegenden Möglichkeiten für die Realisierung eines autonomen Bahnplaners erläutert. Dabei wurde herausgearbeitet, dass sich mit dem Octree-Verfahren zwar Trajektorien in 3D planen lassen, dafür allerdings ein hoher Implementierungs- sowie Rechenaufwand in Kauf genommen werden muss. Im Gegensatz dazu eignet sich die Potentialfeldmethode sehr gut für die Bahnplanung, da es sich um ein lokales Verfahren handelt und die Berechnung einer kollisionsfreien Bewegungsrichtung auf rein mathematischen Grundlagen basiert. Als Kinematik kommen im Rahmen der aufgebauten Montagezelle zwei Knickarmroboter KR 6/2 der Firma Kuka Roboter GmbH zum Einsatz, die einen Punkt p in unterschiedlichen Armkonfigurationen anfahren können (vgl. Bild 8). Infolgedessen darf nicht mehr

nur der TCP des Effektors bei der Bahnplanung betrachtet werden, sondern es gilt vielmehr den gesamten Roboterarm zu berücksichtigen, da es ansonsten zu Kollisionen mit Hindernissen kommen kann (vgl. Bild 39). Deswegen ist ein mathematisches Modell auf Grundlage von Denavit-Hartenberg-Parametern erforderlich, das im Folgenden näher beschrieben wird.

6.3.1 Mathematisches Modell mittels Denavit-Hartenberg-Parameter

Wie bereits in Kapitel 5.2.3 ausführlich dargelegt, lassen sich Ortskoordinaten mittels der Denavit-Hartenberg (DH)-Transformation ineinander überführen. In Bild 52 sind der Arbeitsraum, alle Abmessungen der Armsegmente sowie die Orientierung der einzelnen Gelenkkoordinatensysteme der verwendeten Knickarmroboter KR 6/2 der Firma Kuka Roboter GmbH ersichtlich. Unter Berücksichtigung der vereinbarten Transformationsbeziehungen für die Translation und Rotation ergeben sich sodann die in Tabelle 2 aufgeführten DH-Parameter, mit denen das mathematische Modell des Roboters nachgebildet werden kann. Somit lassen sich durch Vorgabe des TCPs in kartesischen Koordinaten die Gelenkwinkel berechnen oder umgekehrt. Die mathematischen Grundlagen der Vorwärts- bzw. Rückwärtstransformation sind ausführlich in Kapitel 5.2.3 dargestellt.

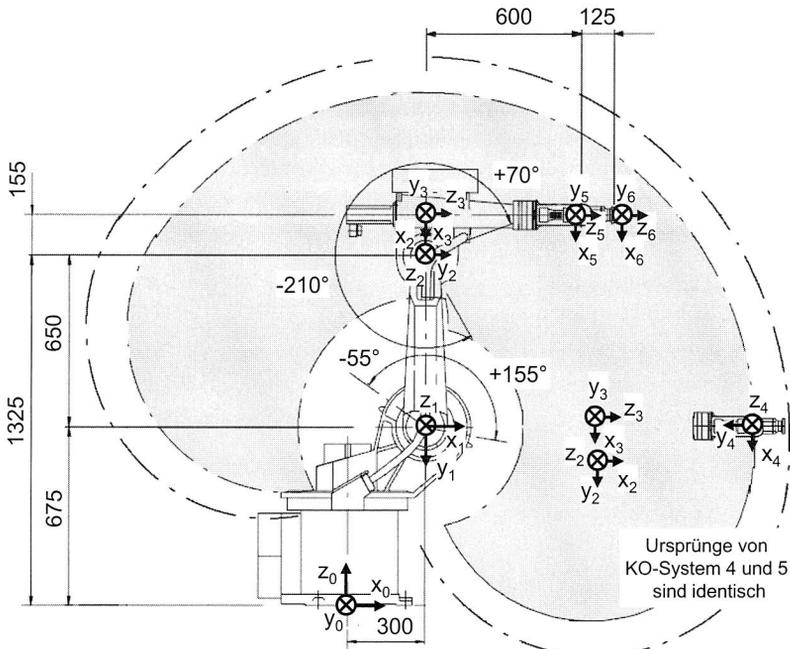


Bild 52: Koordinatensysteme in den Gelenkachsen des KR 6/2 für die Bestimmung der Denavit-Hartenberg-Parameter [Bildquelle: Kuka Roboter GmbH]

Auf Grund der in Bild 52 definierten Koordinatensysteme ergeben sich die DH-Parameter zu:

Tabelle 2: Denavit-Hartenberg-Parameter für den Kuka KR 6/2

System	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	-90°	300 mm	675 mm	$(-1) \cdot \theta_1$
2	0	650 mm	0	θ_2
3	90°	-155 mm	0	$\theta_3 + 90^\circ$
4	-90°	0	600 mm	$(-1) \cdot \theta_4$
5	90°	0	0	θ_5
6	0	0	125 mm	$(-1) \cdot \theta_6$

6.3.2 Realisierung des Bewegungsplaners

Zu den wichtigsten Aufgaben eines autonomen Bahnplaners zählt das Generieren einer Trajektorie zum vorgegebenen Zielpunkt und der Kollisionsüberwachung bzw. -vermeidung, damit es zu keinen Zusammenstößen zwischen dem Effektor und anderen Objekten innerhalb der Zelle kommt. Das Finden eines Weges zum Endpunkt erfolgt mit Hilfe der Potentialfeldmethode, die einen Richtungsvektor für den TCP berechnet (vgl. Kapitel 5.1.3). Somit bewegt sich der Tool Center Point zwar kollisionsfrei, doch der restliche Arm bleibt unberücksichtigt. Deswegen wird der Effektor des KR 6/2 mittels Hüllkörper nachgebildet, um ein geometrisch sehr einfaches Ersatzmodell zu erhalten, das für eine schnelle und effektive Kollisionsüberwachung zu Grunde gelegt werden kann.

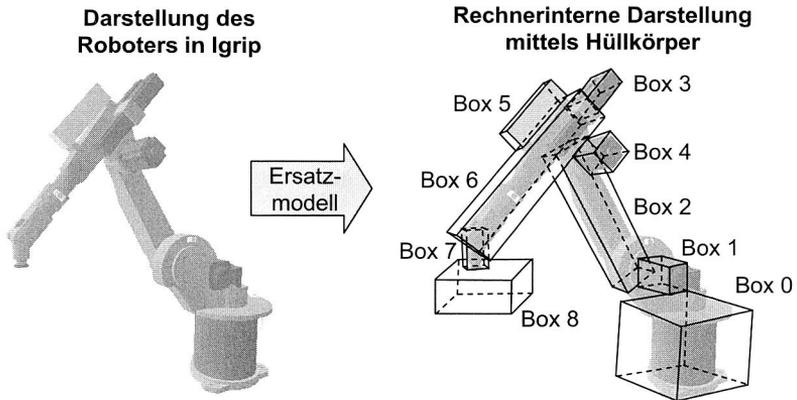


Bild 53: Reale und rechnerinterne Darstellung des Roboters KR 6/2

Dabei finden pro Roboter je neun Bounding Boxen (BBox) Verwendung, von denen die ersten acht den Manipulator umhüllen und mit der neunten der Greifer sowie das gegriffene Werkstück umschlossen wird. Insbesondere bei der Handhabung von Bauteilen, die weit über den Greifer hinausragen, kommt dem letzten Hüllkörper eine wichtige Bedeutung zu, da das Werkstück ebenfalls nicht mit anderen Hindernissen kollidieren darf. Für die Definition einer BBox sind lediglich zwei Punkte erforderlich, die sich diagonal gegenüberliegen. In Bezug auf das jeweilige kartesische Koordinatensystem lässt sich daraus ein Quader bilden, der je nach Armstellung des Roboters auch im Raum gedreht sein kann. Dies erfolgt wiederum mit Hilfe der in Kapitel 5.2.3 bereitgestellten Transformationsmatrizen $T_{i-1,i}$, sodass eine bestmögliche Approximation der Armkonfiguration erzielt wird.

Die Kollisionsüberwachung prüft nun zyklisch ab, ob zwei Hüllkörper bzw. deren Eckpunkte einen vordefinierten Mindestabstand einhalten. Wenn dies der Fall ist, so kann die Bewegung rechtzeitig terminieren, denn bei Bewegungsführung würde eine Kollision verursacht. Allerdings ist es nicht ausreichend, lediglich die Eckpunkte zu kontrollieren, da auf Grund der Hüllkörperabmessungen der Fall auftreten kann, dass sich bereits zwei Objekte durchdringen, d. h. kollidieren, obwohl der Mindestabstand von $2 \cdot r_{min}$ nicht unterschritten ist (vgl. Bild 54 links).

Aus diesem Grund werden automatisch Hilfspunkte auf der Oberfläche des jeweiligen Hüllkörpers erzeugt, deren Mittelpunkte einen Abstand von $2 \cdot r_{min}$ voneinander aufweisen. Wenn nun die Eck- sowie alle Hilfspunkte mit in die Überwachung einbezogen werden, so lässt sich unter allen Umständen eine Kollision vermeiden bzw. frühzeitig erkennen und die entsprechenden Ausweichbewegungen können eingeleitet werden.

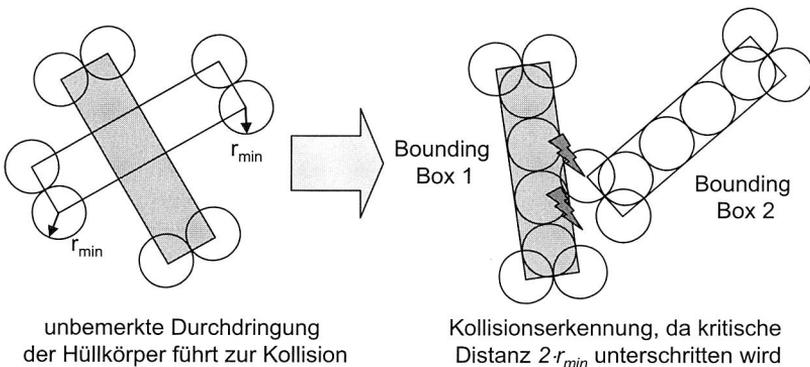


Bild 54: Dienen lediglich die Eckpunkte einer Bounding Box zur Kollisionsüberwachung, so besteht die Gefahr, dass sich zwei Objekte unbemerkt durchdringen können (links), weshalb zusätzliche Hilfspunkte auf der Oberfläche erzeugt werden (rechts)

Eine weitere Problematik bei der Bewegungsplanung auf Grundlage der Potentialfeldmethode besteht im Auftreten von lokalen Minima (vgl. Kapitel 5.1.3). Darunter sind Punkte im Arbeitsraum zu verstehen, in denen die Beträge der anziehenden und abstoßenden Kraft gleich groß, aber genau entgegengesetzt sind. Somit nimmt die Resultierende den Wert Null an, woraufhin die Roboterbewegung terminiert, obwohl der Zielpunkt noch nicht erreicht ist. Eine derartige Situation kann auch in der Realität auftreten, weswegen im Rahmen der vorliegenden Arbeit entsprechende Lösungsstrategien entwickelt wurden, um die Bahn vollständig abzufahren.

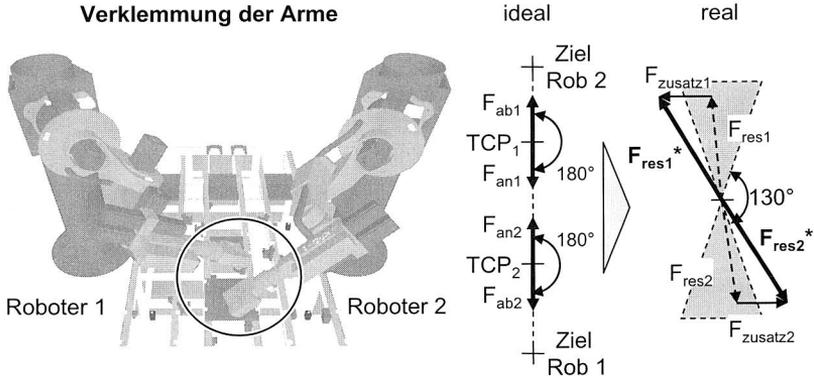


Bild 55: Auflösen einer Verklemmungssituation beim Einsatz eines autonomen Bahnplaners bei kooperierenden Industrierobotern durch Addition eines gerichteten Korrekturvektors

Der Fall von zwei exakt entgegengesetzten Bewegungsbahnen für beide Handhabungsgeräte, wie in Bild 55 dargestellt, tritt auf Grund der Positioniergenauigkeit, die typischerweise im Bereich von wenigen zehntel Millimetern liegt, praktisch nicht auf. Jedoch kann der eingeschlossene Winkel zwischen den beiden resultierenden Bewegungsrichtungen nahezu 180° betragen, was dazu führt, dass sich die Roboterbewegungen sehr oft abstoßen und anschließend wieder anziehen würden, sodass die Entwirrbewegung viel Zeit in Anspruch nimmt. Aus diesem Grund wird in jedem Berechnungsschritt das Skalarprodukt der resultierenden Bewegungsrichtungen gebildet und beim Überschreiten eines Schwellwertes, der im Rahmen der Implementierung einem eingeschlossenen Winkel von 130° entspricht, ein zusätzlicher Korrekturvektor zur ursprünglichen Bewegungsrichtung addiert (siehe Bild 55 rechts). Dieser hat die Eigenschaft, dass er in Richtung des jeweiligen Roboterursprungs orientiert ist und eine Länge von lediglich 1 mm aufweist. Diese geringfügige Positionskorrektur ist allerdings bereits ausreichend, um die Verklemmung zu lösen, sodass im Anschluss mit der Potentialfeldmethode die restliche Bewegung geplant werden kann.

Normalerweise genügt es, mit Hilfe der Potentialfeldmethode für den TCP die entsprechenden Bewegungsrichtungen zu planen und die oben beschriebene Kollisionsüberwachung einzusetzen. Allerdings hat sich bei der praktischen Anwendung herausgestellt, dass sich oftmals die Arme der beiden kooperierenden Roboter verklemmen können und demzufolge eine Bewegungsplanung wegen bevorstehender Kollisionen nicht mehr praktikabel ist. Diese Situation lässt sich nicht mit einem Korrekturvektor beheben, der lediglich die Position des Tool Center Points verändert, sondern vielmehr gilt es das Segment des Effektors zu bewegen, das dem Zusammenstoß am nächsten ist. Aus diesem Grund muss nicht nur für den TCP ein Ausweichvektor bestimmt werden, sondern für jedes Armsegmentkoordinatensystem.

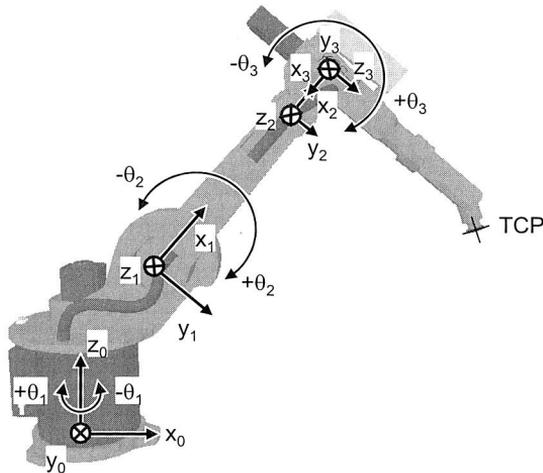


Bild 56: Bewegung der einzelnen Segmente bei drohender Kollision zwischen den Roboterarmen

Hierfür wird der resultierende Bewegungsvektor mit Hilfe der entsprechenden Transformationsbeziehungen in das jeweilige Koordinatensystem des Gelenks überführt. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass allerdings nicht alle Freiheitsgrade in den jeweiligen Segmenten vorhanden sind, weswegen der berechnete Korrekturvektor in die zur Verfügung stehenden Einzelbewegungen mittels Gelenkwinkeln aufgeteilt wird. Die sich daraus ergebenden Winkelkorrekturen können der folgenden Tabelle 3 entnommen werden:

Tabelle 3: Gelenkkorrekturbewegung bei Transformation des Ausweichvektors in die verschiedenen Armkoordinatensysteme

Korrektur in Koordinatensystem	Basisrichtung	durchzuführende Winkelkorrektur
KOS 2	$\pm X_2$	Realisierung nicht möglich
	$\pm Y_2$	$\pm \theta_2$
	$\pm Z_2$	$\mp \theta_1$ falls X_1 -Koordinate+300 mm > 0 $\pm \theta_1$ falls X_1 -Koordinate+300 mm < 0
KOS 3	$\pm X_3$	$\pm \theta_3$ falls Z_3 -Koordinate > 0 $\mp \theta_3$ falls Z_3 -Koordinate < 0
	$\pm Y_3$	$\mp \theta_1$ falls X_1 -Koordinate+300 mm > 0 $\pm \theta_1$ falls X_1 -Koordinate+300 mm < 0
	$\pm Z_3$	$\pm \theta_2$ falls $0^\circ \leq \theta_3 \bmod 360^\circ \leq 180^\circ$ $\mp \theta_2$ falls $180^\circ < \theta_3 \bmod 360^\circ < 160^\circ$

Generell lässt sich festhalten, dass eine Verklemmungssituation zum einen durch geringfügige Veränderung der aktuellen Ist-Position mit Hilfe eines Korrekturvektors beseitigt werden kann. Dieser ist im Allgemeinen in Richtung des Roboterursprungs gerichtet, da sich somit der Effektor aus dem gemeinsamen Arbeitsraum zurückzieht und für die anschließende Bahnplanung mehr Freiraum zur Verfügung steht. Zum anderen darf beim Ausweichen nicht nur der TCP berücksichtigt werden, sondern vielmehr gilt es den resultierenden Bewegungsvektor in die entsprechenden Armsegmente zu transformieren und dadurch den Effektor „elastisch“ zu gestalten.

6.3.3 Anbindung des Bahnplaners an die Kinematiksimulation Igrip

Neben der realen Montageanlage mit den kooperierenden Robotern wurde der Bahnplaner ebenfalls an die Kinematiksimulation Igrip der Firma Delmia angebunden, um dem Anwender bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt innerhalb des Produktentstehungszyklusses den zu erwartenden Montageprozess visualisieren zu können. Hierzu werden die vom Bewegungsplaner errechneten Gelenkwinkel oder kartesische Positionen pro Roboter über einen eigenen Socket an Igrip gesendet. Diese Vorgehensweise ist analog zur Übertragung an die reale Robotersteuerung, sodass infolgedessen der identische Bahnplaner verwendet werden kann.

Innerhalb der Simulation wurde ein Server eingerichtet, der die neu berechneten Stützpunkte empfängt und weiterverarbeitet. Allerdings kann hierbei immer nur eine Socket-Verbindung aufgebaut werden, weswegen ein zyklisches Umschalten zwischen den

verschiedenen Kinematiken erforderlich ist. Dies bedeutet, dass zunächst für den ersten Roboter die Socketkommunikation initialisiert wird, die berechnete Position übermittelt und in Igrip empfangen wird. Anschließend verfährt der Effektor und die neuen Gelenkwinkel bzw. die Position des TCP werden an den Bewegungsplaner zurückgesendet. Danach wird die Verbindung zum ersten Roboter unterbrochen woraufhin die Schnittstelle zum zweiten Handhabungsgerät geöffnet wird und die beschriebene Prozedur erneut abläuft.

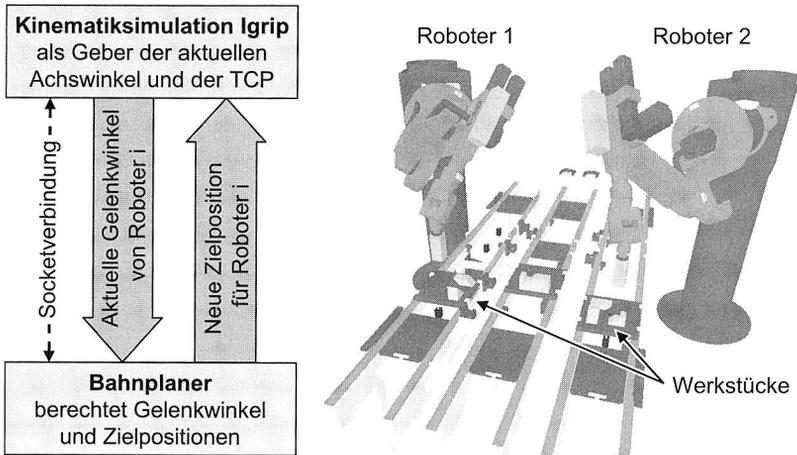


Bild 57: Kommunikation zwischen dem Bahnplaner und der Kinematiksimation Igrip mit anschließender Visualisierung der autonom geplanten Bewegungen

Auf Grund der Verwendung des identischen Bewegungsplaners sowohl für die Kinematiksimation als auch die reale Roboterzelle besteht folglich die Möglichkeit, dem Anwender mit sehr geringem Aufwand, der in der Modellierung der Montagezelle besteht, die verschiedenen Sequenzen zu veranschaulichen. Eine manuelle Programmierung der einzelnen Handhabungsgeräte in der Simulation ist demzufolge nicht mehr erforderlich. Somit lassen sich Schwachstellen oder Fehler innerhalb des Montageprozesses bereits unmittelbar nach Fertigstellung des CAD-Modells erkennen und die erforderlichen Änderungsmaßnahmen einleiten.

6.4 Entwicklung einer Ablaufsteuerung für die automatische Durchführung einer Montagesequenz

Anhand der obigen Ausführungen wurde die Funktionsweise des autonomen Bahnplaners sowie des eingesetzten Steuerungskonzepts näher erläutert, sodass damit die Grundlagen für die automatische Montagedurchführung gelegt sind. Allerdings war bislang jeweils nur ein einziger Zielpunkt der Bewegung Gegenstand der Betrachtung, wohingegen sich eine vollständige Montagesequenz aus der Aneinanderreihung

mehrerer Einzelschritte zusammensetzt. Unter Verwendung der in Kapitel 4 dargestellten CAD-gestützten Planungsmethodik erfolgt die Montage immer zwischen einem aktiven und passiven Fügepartner gemäß „Montiere Bauteil A mit B“. Zusätzlich werden noch montagerelevante Informationen, wie z. B. verwendeter Greifer, Abhol- und Fügeposition sowie die Prozessart etc., anhand der im CAD-Modell hinterlegten Informationen bereitgestellt. Ein Montageschritt lässt sich demzufolge in Elementaranweisungen zerlegen, wie beispielsweise „Hole Greifer X“, „Lege Greifer X ab“, „Fahre auf die Position Y“, „Greife Bauteil Z“ und „Lege Bauteil Z ab“. Somit ist es möglich, durch Kombination der Elementaranweisungen die unterschiedlichsten Montagesequenzen zusammensetzen und auszuführen. Dabei werden Stützpunkte, wie beispielsweise beim Ablegen bzw. Aufnehmen eines Greifers oder Bauteils in Bezug auf dessen Endposition automatisch ermittelt, sodass lediglich eine Pick- und Place-Position ausreichend ist, um damit eine komplexere Bewegungsfolge zu beschreiben. Die Hilfspunkte liegen immer in negativer z-Richtung des Roboter-Tool-Koordinatensystems, d. h. in Richtung des Normalenvektors der Fügefläche. Die Ablaufsteuerung muss demzufolge in der Lage sein, die mit Hilfe der CAD-gestützten Montageplanung erzeugten Anweisungen zu analysieren und zu interpretieren sowie anschließend die Einzelbefehle an den Bahnplaner weiterzuleiten, sodass dieser die entsprechenden Verfahrensanweisungen an die Roboter übermitteln und ggf. am Zielpunkt spezifische Technologieanweisungen ausführt, wie beispielsweise „Greifer öffnen/schließen“ oder „Greiferwechsel öffnen/schließen“.

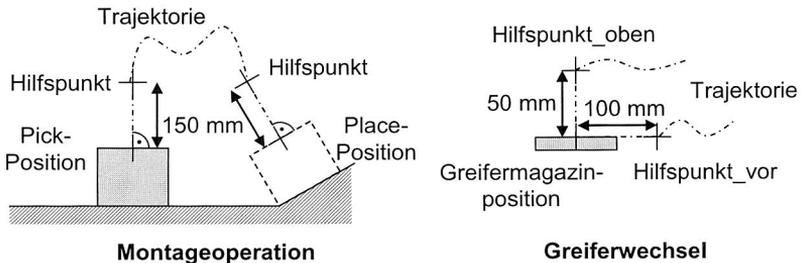


Bild 58: In Abhängigkeit der Pick-/Place- (links) oder Greifermagazinposition (rechts) lassen sich Stützpunkte berechnen und so zusammengesetzte Bewegungsfolgen durch Elementarschritte beschreiben

Mit Hilfe der Knickarmroboter sind bei einem Montageprozess vielfältige Formen der Kooperation geboten, die durch die Definition einer Prozessnummer in der Sequenzdatei eindeutig beschrieben werden (vgl. Tabelle 4). Anhand dieser Identifikation lassen sich die beiden Roboter zeitlich und mit den Positionsangaben räumlich steuern, sodass z. B. einer ein Bauteil präsentiert, der andere es entgegen nimmt und somit die Orientierung des Objektes geändert wird (vgl. Bild 61 bzw. Kapitel 6.5). Weitere Elementarprozesse lassen sich auf diese Weise sehr einfach ergänzen und mit in den Bahnplaner integrieren.

Tabelle 4: Klassifizierung der verschiedenen Prozessarten für die Realisierung einer Kooperation zwischen den beiden Knickarmrobotern

Prozessnummer	Beschreibung
0	Positionieroperation
1	Pick&Place
2, 3	Übergabe eines Bauteils: 2 bietet das Werkstück an, 3 übernimmt das Bauteil
4, 5, 6	Vorrichtungsloses Fügen: 4 bietet das Bauteil an, 5 einmaliger Fügevorgang, 6 gesamte Baugruppe absetzen
4, 5, 6, 7	Mehrfaches vorrichtungsloses Fügen: 4, 5, und 6 wie oben, 7 beliebige Wiederholung des Fügevorgangs

6.5 Verifikation der Leistungsfähigkeit anhand einer Beispielbaugruppe

Anhand einer Beispielbaugruppe, bestehend aus insgesamt 9 verschiedenen Bauteilen, soll die Leistungsfähigkeit des entwickelten autonomen Bahnplaners sowie der dynamischen Ablaufsteuerung unter Beweis gestellt werden, um damit die unterschiedlichen Kooperationsmöglichkeiten der beiden Knickarmroboter aufzuzeigen. Die Werkstücke werden dafür auf zwei Paletten über die Doppelgurtbänder in die Arbeitsräume der Handhabungsgeräte transportiert und dort mittels der Zentrierstationen 1 und 5 fixiert (vgl. auch Bild 48). Auf Grund der Reichweite der Effektoren, können diese jeweils nur eine Palette erreichen und von dort Bauteile greifen. Wegen der Aufteilung der Teile auf die beiden Werkstückträger sowie der Zusammensetzung der Demonstrationsbaugruppe ist zwar bereits eine chronologische Montagereihenfolge implizit vorgegeben und somit auch die Verteilung der Arbeitsanweisungen auf die beiden Roboter. Allerdings lassen sich die Ablaufsequenzen, und demzufolge auch die Prozesse der zwei Effektoren, durch eine andere Verteilung der Bauteile einfach variieren. Unabhängig davon werden die Werkstücke in dem Bereich des mittleren Transportbandes abgelegt, der für beide Roboter zugänglich ist. Somit wird sichergestellt, dass beide Handhabungsgeräte Einzelteile fügen und auch miteinander kooperieren können. Im Rahmen dieser Montagezelle steht demzufolge nicht so sehr die vollautomatische CAD-gestützte Planung im Vordergrund, sondern vielmehr die autonome Bahnplanung und die Möglichkeit der Zusammenarbeit.

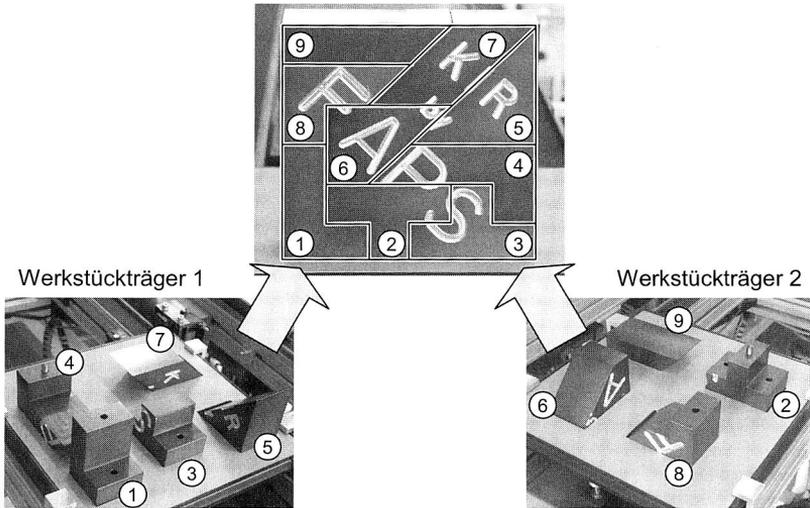


Bild 59: Beispielbaugruppe, mit der die verschiedenen Kooperationsmöglichkeiten der beiden Knickarmroboter aufgezeigt werden

Bei näherer Betrachtung der Baugruppe fällt auf, dass diverse Bauteile eine andere Orientierung hinsichtlich der Bereitstellung auf der Palette und dem verbauten Zustand aufweisen (Werkstücke 2, 4, 6 und 8). Die erfolgreiche Montage lässt sich infolgedessen lediglich durch eine Übergabe des Werkstücks und einer damit einhergehenden Umorientierung sowie die Zusammenarbeit der beiden Roboter erzielen. Im Folgenden wird dieser Mechanismus anhand des Bauteils 8 näher erläutert.

Wie aus Bild 60 ersichtlich, besitzt dieses Bauteil eine L-förmige Kontur und wird folglich mit der längeren Seite nach unten auf der Palette in die Zelle eingebracht. Allerdings lässt es sich nur mit der kurzen Seite nach unten in die Baugruppe fügen, sodass an dieser Stelle die Montage mit nur einem Roboter beendet wäre. Durch den Einsatz der beiden Effektoren ist es jedoch möglich, das Bauteil zu übergeben und es somit auch in der richtigen Orientierung zu montieren. Für diesen Schritt sind lediglich die folgenden beiden Zeilen erforderlich, die in der Datei mit den Montagedetails abgespeichert sind:

```
Bauteilnr./Greifer/Prozessnr./Roboter/Abholpos (x/y/z/A/B/C)/
  Ablageposition (x/y/z/A/B/C)/BBox P1/ BBox P2
```

...

```
8/1/2/Rob2/370.0/626.7/149.9/90/0.4/-180/
  136.9/278.7/356.5/179.6/-0.1/-89.3/-30/30/-30/30/0/-30
```

```
8/2/3/Rob1/98.3/-19.3/361.3/90/1.5/1.3/
  -90.8/194.6/80.7/279.1/89.3/2.1/180/-30/30/-30/30/0/-30
```

...

Durch die Kennzeichnung der Montageanweisung mittels der Prozessnummern 2 und 3 wird definiert, dass es sich um eine Bauteilübergabe von Roboter 2 auf 1 handelt (vgl. Tabelle 4). Demzufolge beinhaltet der Schritt von Rob 2 die Abhol- und Übergabe-position, die Montageanweisung für Rob 1 entsprechend die Übernahme- und Fügeposition.

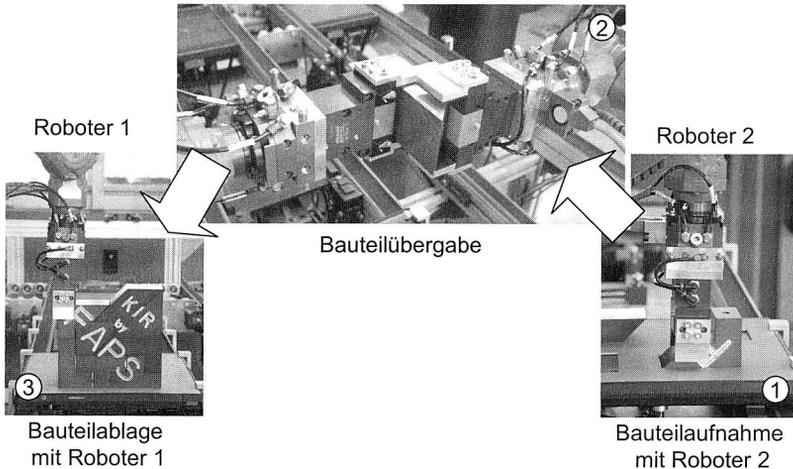


Bild 60: Bauteilübergabe zwischen den beiden kooperierenden Robotern, wobei lediglich die Abhol-, Übergabe- und Endposition definiert sind

Wenn nun lediglich ein einziger Roboter diese Montageaufgabe durchführen sollte, so wäre dies nicht ohne weiteres zu bewerkstelligen, da eine Änderung der Bauteilorientierung erforderlich ist. Nur durch die Integration einer zusätzlichen Drehvorrichtung wäre dies zu bewerkstelligen. Bei der Verwendung von lediglich einem Handhabungsgerät könnten des Weiteren keine Aufgaben parallel abgearbeitet werden, wie beispielsweise das Holen und Fügen von zwei verschiedenen Bauteilen. Diese Tätigkeiten können gleichzeitig und vollkommen unabhängig voneinander ausgeführt werden, da hierbei keine zeitliche und räumliche Kopplung gegeben ist. Somit besteht durch die Verwendung der beiden Roboter die Möglichkeit, komplexe Zusammenarbeiten sehr einfach zu definieren und darüber hinaus die Taktzeit wegen der parallelen Aufgabenabarbeitung zu verkürzen.

Insbesondere die Verteilung der 9 Bauteile auf die beiden Werkstückträger spielt eine wichtige Rolle hinsichtlich der zu erzielenden Taktzeit. Mit Hilfe der Kinematiksimulation Igrip wurden verschiedene Konstellationen untersucht und deren Zykluszeit verifiziert, wobei die Ergebnisse um bis zu 16 % variierten. Zusätzlich wurde auch die Einzelroboterlösung in Verbindung mit einer Dreheinrichtung untersucht. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass die Doppelroboterlösung um bis zu 10 % schneller sein kann. Einen signifikanten Einfluss auf die Taktzeit hat allerdings die Verteilung der Aufträge auf die

beiden Roboter, denn daraus resultiert, wie häufig die Kollisionsvermeidungsstrategien angewendet werden müssen. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass durch eine ausgewogene Auftragsverteilung und demzufolge parallele Abarbeitung der Einzelmontageschritte, die Taktzeit reduziert werden kann. Des Weiteren dient die Beispielmontagebaugruppe lediglich als Demonstrator und kann jederzeit durch reale Bauteile, wie in Bild 61 dargestellt, substituiert werden.

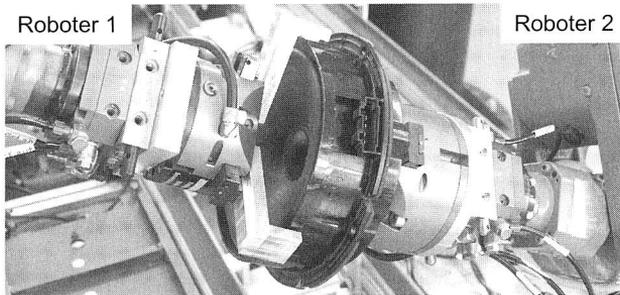


Bild 61: Bauteilübergabe eines Lautsprechers als möglicher Prozessschritt unter Verwendung von kooperierenden Industrierobotern

6.6 Zusammenfassung

Am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen-Nürnberg wurde eine Montagezelle mit zwei Knickarmrobotern aufgebaut, die wegen ihrer Wandanbringung sowie der Drehung um je 30° zueinander einen großen gemeinsamen, linsenförmigen Arbeitsraum aufweisen. In diesem besteht die Möglichkeit, eine Montageaufgabe in Zusammenarbeit durchzuführen, wie beispielsweise das Übergeben und Umorientieren von Bauteilen oder aber das Präsentieren und Komplettieren einer Baugruppe, was normalerweise gar nicht oder nur unter Zuhilfenahme einer externen Kinematik möglich wäre. Um mit den kommerziell verfügbaren Robotersteuerungen überhaupt erst die Möglichkeit der Kooperation zu realisieren, sind diese mittels Ethernet untereinander sowie mit dem Leitreechner verbunden. Als Nachrichtenschnittstelle wird das Real Time Communication Interface (RTCI) verwendet, das einen Austausch von Nachrichten in Echtzeit erlaubt. Hervorzuheben ist, dass es sich dabei um eine Standardlösung handelt, die vom Hersteller angeboten wird. Demzufolge sind keinerlei hard- oder softwaretechnische Eingriffe an der Robotersteuerung erforderlich. Dies ist die Grundvoraussetzung des entwickelten und hier vorgestellten Steuerungskonzepts, um es ohne große Änderungen auf beliebige Systeme übertragen zu können.

Die Bewegungsplanung für die beiden kooperierenden Industrieroboter erfolgt mit Hilfe der Potentialfeldmethode. Dabei darf nicht nur der TCP in die Betrachtung einbezogen werden, sondern es gilt vielmehr den gesamten Arm zu berücksichtigen. Um eine

effektive und schnelle Kollisionsüberwachung zu erhalten, wird jedes Segment der kinematischen Kette mittels geometrisch einfacher Hüllkörper nachmodelliert. Somit kann der Rechenaufwand für die Bestimmung des minimalen Abstandes zwischen zwei Objekten reduziert und eine drohende Kollision früh- und damit rechtzeitig erkannt werden. Mit Hilfe der Kenntnis, welche Bounding Boxen sich am nächsten sind sowie deren räumlicher Lage zueinander, lassen sich entsprechende Ausweich- und Entwirrstrategien, die für die Auflösung einer Verklemmung entwickelt wurden, planen, einleiten und durchführen. Die Grundlage hierfür bildet ein mathematisches Modell der kinematischen Kette des Roboterarms. Die eindeutige Beschreibung erfolgt mittels Denavit-Hartenberg-Parameter, sodass unter Zuhilfenahme der aktuellen Gelenkwinkel ebenfalls die Hüllkörper im Raum transformiert werden können. Anhand dieses Modells lassen sich mit Hilfe der Potentialfeldmethode ebenfalls die neuen Stützpunkte bzw. die dazugehörigen Gelenkwinkel berechnen, die anschließend an den jeweiligen Controller gesendet werden. Dabei erfolgt jeweils die Berechnung eines neuen Bahnpunktes zyklisch im Interpolationstakt der Robotersteuerungen. Dieses Ziel wird sodann an den jeweiligen Controller übermittelt und anschließend der Effektor verfahren sowie dessen aktuelle Ist-Position wieder an den Leitrechner übermittelt. Somit besteht die Möglichkeit, die Trajektorie zur Laufzeit zu planen, auf sich im Arbeitsraum bewegende Hindernisse zu reagieren und somit permanente Kollisionsfreiheit zu gewährleisten.

Damit nun allerdings die beiden Handhabungsgeräte in der Lage sind, komplette Montagesequenzen abzuarbeiten, gilt es daraus Einzelprozesse zu extrahieren, die ihrerseits wiederum in Elementarschritte aufgeteilt werden können. Dazu zählt z. B. „Hole Greifer X“, „Lege Greifer X ab“, „Fahre auf die Position Y“, „Greife Bauteil Z“ und „Lege Bauteil Z ab“. Durch die automatische Berechnung von zusätzlichen Hilfspunkten, die beispielsweise beim Aufnehmen oder Ablegen von Werkstücken oder Greifern erforderlich sind, ist die Programmierung wesentlich vereinfacht worden, da lediglich die Pick- oder Place-Position angegeben werden muss, die sich wiederum automatisch aus dem CAD-Modell bestimmen lässt.

Abschließend wurde die Leistungsfähigkeit des entwickelten autonomen Bahnplaners sowie der Ablaufsteuerung anhand einer Beispielbaugruppe demonstriert. Für deren vollständige Montage ist eine Umorientierung verschiedener Bauteile im Raum erforderlich. Lediglich durch die Vorgabe der Abhol-, Übergabe- und Fügeposition sowie der entsprechenden Prozessart, kann dies mit den kooperierenden Industrierobotern erfolgen, was auf eine zeitliche und geometrische Kopplung der beiden Handhabungsgeräte zurückzuführen ist. Dadurch wird der Anwender bei der Inbetriebnahme und dem Programmieren einer hoch flexiblen Montageanlage nachhaltig entlastet. Darüber hinaus lässt sich mit Hilfe der beiden Roboter, im Vergleich zu nur einem Effektor, die Taktzeit um bis zu 16 % reduzieren, was auf eine parallele Abarbeitung einzelner Prozessschritte zurückzuführen ist. Somit konnte der Nachweis erbracht werden, dass das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Montagekonzept eine signifikante Verkürzung des Montageprozesses bewirkt.

7 Vollautomatischer Montageprozess mit kooperierenden Linearrobotern

Neben der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Montagezelle mit Knickarmrobotern wurde am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen-Nürnberg eine weitere Anlage mit kooperierenden Linearrobotern der Firma Reis GmbH&Co Maschinenfabrik aufgebaut. Auf Grund der kartesischen Achsanordnung sowie der großen Reichweite und dem daraus resultierenden rechteckigen Arbeitsraum eignet sich diese Art von Kinematik besonders gut für die Montage von flächenhaften Strukturen, wie beispielsweise Kfz-Türmodulen [70]. Mit dieser Zelle wird das in Kapitel 3 vorgestellte durchgängige Montagekonzept vollständig umgesetzt. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf der automatischen Generierung aller möglichen Montagesequenzen mit den dazugehörigen Informationen, wie zu verwendender Greifer, die Pick- und Place-Positionen etc.. Anschließend wird die am besten geeignete Sequenz hinsichtlich der kürzesten Taktzeit mit Hilfe einer Simulationsumgebung bestimmt und sodann von den kooperierenden Linearrobotern abgearbeitet. Hierbei kommt wiederum ein autonomer Bahnplaner zum Einsatz, der die Trajektorien dynamisch zur Laufzeit berechnet und den Handhabungsgeräten zuweist.

Wie im Rahmen des Kapitels 4.3 beschrieben, wurde zusätzlich ein Laserscanner mit integriert, der die zu verbauenden Werkstücke dreidimensional detektiert. Über eine Bilderkennung lassen sich die Teile anhand ihrer charakteristischen Merkmale eindeutig identifizieren und anschließend deren Position in Bezug auf ein Referenzkoordinatensystem automatisch bestimmen. Somit können sämtliche Greif- und Ablagepositionen selbstständig ermittelt werden, sodass der ansonsten sehr zeitintensive Teach-In-Vorgang vollständig vermieden wird. Darüber hinaus ist es nicht mehr erforderlich, die Bauteile in speziellen Werkstückträgern oder Formnestern zuzuführen, sondern es ist ausreichend, diese lediglich auf eine Palette zu legen, denn die Position und Orientierung der Werkstücke wird unmittelbar vor dem Montageprozess bestimmt und an die Roboter übermittelt. Auf Grund der nachhaltigen Entlastung des Anwenders bei der Anlagenprogrammierung resultiert ein verkürzter und robuster Montageprozess.

7.1 Realisierte Montagezelle mit Linearrobotern der Firma Reis

In der zweiten aufgebauten Montagezelle kommen zwei Linearroboter vom Typ RL 16 der Firma Reis GmbH&Co Maschinenfabrik zum Einsatz, die insbesondere für die Montage von flächenhaften Strukturen geeignet sind (siehe Bild 62). Darunter sind Bauteile zu verstehen, die sich durch große Abmessungen in der x- und y-Ebene im Verhältnis zur z-Richtung auszeichnen, wie z. B. Türmodule oder Schiebedächer. Anhand unterschiedlicher Simulationsstudien und Bewertungskriterien, wie beispielsweise Größe des Arbeitsraumes, Genauigkeit, Geschwindigkeit und Traglast, haben sich die Linearroboter gegenüber Scara- oder Knickarmgeräten für diesen Anwendungsfall als besser geeignet herausgestellt [70]. Dies lässt sich u. a. darauf

zurückführen, dass die Roboter in Längen von bis zu 30 m x 5 m x 3 m standardmäßig verfügbar sind. Durch eine entsprechende räumliche Anordnung der Handhabungsgeräte lassen sich sehr große gemeinsame Arbeitsräume erzielen, in denen die Effektoren kooperieren können.

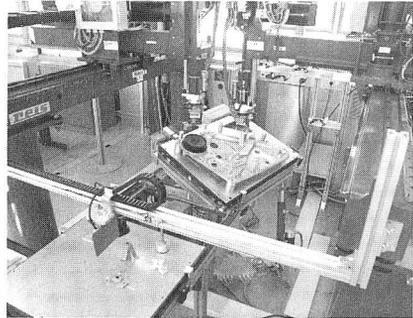
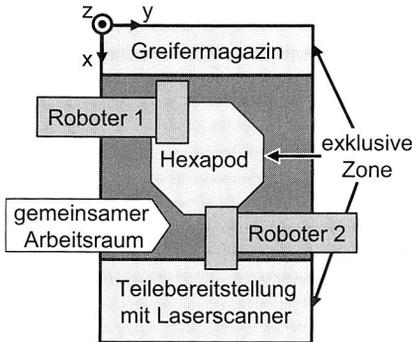


Bild 62: Montagezelle mit zwei kooperierenden Linearrobotern der Firma Reis und integriertem Hexapod für die räumliche Manipulation der Bauteile

Charakteristisch für diese Art von Roboterkinematik sind die senkrecht aufeinander stehenden drei Hauptbewegungsachsen in x-, y- und z-Richtung, sodass daraus ein rechteckiger Arbeitsraum resultiert. Zusätzlich verfügt die kinematische Kette über einen rotatorischen Freiheitsgrad um die z-Achse. Insgesamt sind demzufolge vier Freiheitsgrade vorhanden, drei translatorische und ein rotatorischer. Die beiden Handhabungsgeräte sind punktsymmetrisch zueinander angeordnet, sodass ein gemeinsamer Arbeitsraum von ca. $2 \times 1,5 \times 1 \text{ m}^3$ für die Kooperation zur Verfügung steht. Im hinteren Teil der Zelle befindet sich eine Greiferbereitstellungszone, in der die zur Montage erforderlichen unterschiedlichen Greifer angebracht sind. Dieser Bereich kann von beiden Robotern erreicht werden und infolgedessen können sie sich die verfügbaren Werkzeuge teilen. Dadurch lässt sich deren Anzahl reduzieren, was zu einer erheblichen Platzeinsparung führt. Darüber hinaus besteht somit die Möglichkeit, dass die durchzuführenden Montagetätigkeiten entweder gemeinsam oder aber auch alleine erledigt werden können, was zu einer Robustheitssteigerung des Prozesses führt.

Auf Grund der verwendeten Kinematik der Linearroboter und der damit verbundenen Anordnung der vier Freiheitsgrade, ist eine Bauteilmontage auf schrägen Flächen nicht möglich. Um jedoch ein hohes Maß an Flexibilität zur Verfügung zu stellen, gilt es, die fehlenden beiden Freiheitsgrade mit in die kinematische Kette zu integrieren. Dies lässt sich zum Beispiel durch das Hinzufügen von Dreh- und Schwenkeinheiten am Ende des Roboterarms bewerkstelligen, die jedoch eine Reduzierung der Traglast des Roboters zur Folge haben.

Die andere Möglichkeit besteht darin, die Roboterkinematik unverändert zu lassen und dafür die Lage des flächigen Basisteils im Raum zu verändern. Deswegen wurde ein Hexapod aus sechs Elektrohubbzylindern entwickelt und mit in die Zelle eingebunden, der bis zu 70 kg Last aufnehmen und Bauteile um maximal 20° in alle Raumrichtungen neigen kann (siehe Bild 63) [28, 29]. Damit lassen sich schräge Flächen derart im Raum orientieren, dass deren Flächennormale parallel zur Hauptfügerichtung des Roboters ausgerichtet ist. Demzufolge können nun auch Bauteile auf schrägen Flächen positioniert werden, ohne die Traglast des Roboters unnötig zu reduzieren.

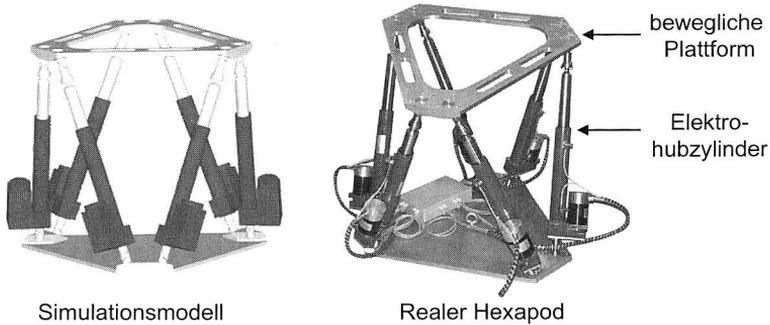


Bild 63: Hexapod zur räumlichen Orientierung von Bauteilen

Der Teiletransport innerhalb der Zelle wird mit einem Doppelgurtbandsystem bewerkstelligt, wobei auf Grund der großen Bauteilabmessungen Werkstückträger mit einer Breite von 640 mm und einer Länge von 640 mm bzw. 800 mm Verwendung finden. Um Rüstzeiten und -kosten zu reduzieren, werden die Einzelbauteile nicht mehr in speziellen Formnestern in die Zelle eingebracht, sondern einfach auf die Palette gelegt. Damit der sehr zeitintensive Teach-In-Prozess vermieden werden kann, erfolgt die Lageerfassung aller Teile mit Hilfe eines Laserscanners, um daraus automatisch deren Positionen zu bestimmen. Für den Detektionsprozess ist ein 2D-Laserscanner verschiebbar an einer Traverse befestigt, die das Transportband überspannt. In Verbindung mit der Translation der Palette lässt sich auf diese Weise ein Höhenprofil des gesamten Werkstückträgers aufzeichnen und rechnergestützt vollautomatisch auswerten. Eine detaillierte Beschreibung der Objekterkennung und Positionsbestimmung ist in Kapitel 4.3.3 dargestellt.

Von Bedeutung ist hierbei zunächst die Identifikation der Bauteile, um ihnen anschließend aus dem Rechnermodell die jeweilige automatisch berechnete Greifposition zuzuordnen zu können. Dazu dienen charakteristische Merkmale, wie beispielsweise Bohrungen oder Außenkonturen etc., die eine eindeutige Unterscheidung erlauben. Die Pick-Positionen werden in Bezug zu einem auf dem Werkstückträger festgelegten Koordinatensystem bestimmt, da die Palette mit den Bauteilen immer an der gleichen Stelle innerhalb der Montagezelle fixiert wird. Somit können die aktuellen Positionen in der abzuarbeitenden Bauteildatei gespeichert werden, die sodann von der

Ablaufsteuerung verwendet wird, um daraus die entsprechenden Teilaufträge für die beiden kooperierenden Industrieroboter zu generieren (vgl. Kapitel 6.4).

Auf Grund der einfachen Bauteilzuführung, die lediglich darin besteht, Werkstücke auf eine Palette aufzulegen, und der anschließenden automatischen Bauteilidentifikation sowie der Greifpositionsbestimmung resultiert ein robuster und verkürzter Montageprozess. Dies ist insbesondere auf den Wegfall des sehr zeitintensiven Teach-In-Vorgangs zurückzuführen, weswegen nun mehr wertschöpfende Montagezeit zur Verfügung steht.

7.2 Kommunikation mit den Linearrobotern RL 16

Auch in dieser Montagezelle gilt es – wie ebenfalls schon bei den Knickarmrobotern – eine intensive Kommunikation zwischen den beiden Controllern der Handhabungsgeräte und dem Hexapoden sowie dem Leitreechner, auf dem sich der Bahnplaner und die Ablaufsteuerung befinden, zu realisieren. Aus diesem Grund wird wieder der ethernetbasierte Lösungsansatz unter Verwendung der vom Hersteller angebotenen Standardschnittstelle gewählt, um eine allgemeingültige Lösung zu realisieren, die auf andere Systeme übertragbar ist (vgl. auch Kapitel 6.2).

Der Datenaustausch zwischen dem Leitreechner und den Robotersteuerungen der Firma Reis erfolgt unter Verwendung einer Schnittstelle, basierend auf der Extensible Markup Language (XML) [11]. Diese Sprache ist für eine gute Funktionsfähigkeit auch über verschiedene Plattformen hinweg ausgelegt, wie z. B. für den Datenaustausch zwischen verschiedensten Anwendungen. Charakteristisch für sie sind die so genannten Erstellungsblöcke, in denen Elemente, Attribute und Werte zu logischen Einheiten zusammengefasst werden [12, 102]. Zur Entschlüsselung der übertragenen Informationen wird auf beiden Seiten ein XML-Parser verwendet, der auf die genaue Einhaltung der vorgeschriebenen Syntax achtet und aus diesem Grund nur korrekte Nachrichten akzeptiert sowie diese dann weiterverarbeitet. Somit ist sichergestellt, dass es – insbesondere bei der Übertragung von anzufahrenden Stützpunkten – zu keinen Fehlern auf Grund korrupter Nachrichtenfragmente kommt.

Mit Hilfe der XML-Kommandos können alle Systemvariablen der Robotersteuerung manipuliert, d. h. beschrieben, gesetzt oder gelöscht werden. Für die Realisierung des oben beschriebenen Steuerungskonzepts sind das Empfangen einer Zielposition sowie das Senden der aktuellen Istposition von besonderer Bedeutung. Nur durch deren zyklische Ausführung kann eine dynamisch zur Laufzeit generierte Trajektorie vom Roboter abgefahren werden. Da die Controller über je eine eindeutige IP-Adresse verfügen, lassen sich die beim Leitreechner ein- und ausgehenden Nachrichten jedem Handhabungsgerät zuweisen, sodass Nachrichtenübertragungsfehler ausgeschlossen sind.

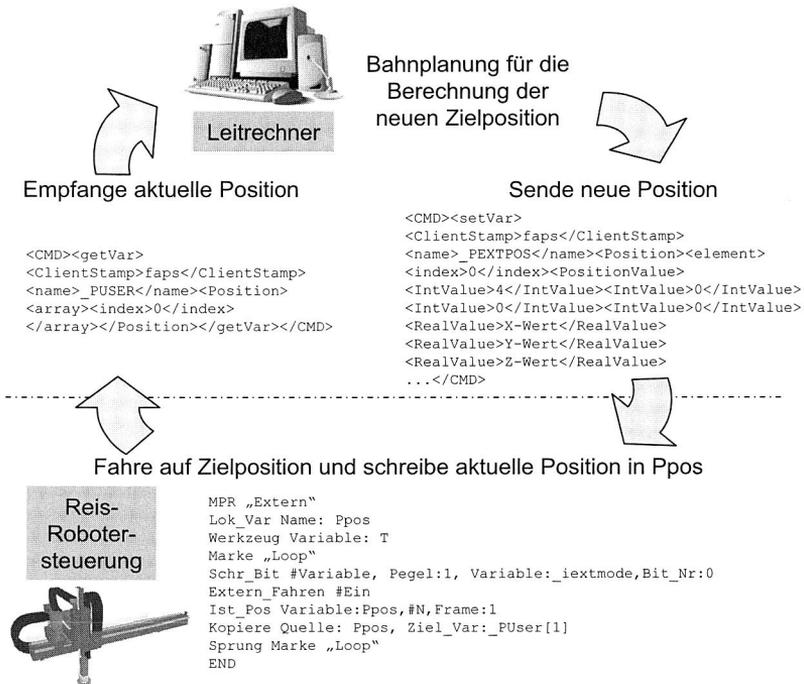


Bild 64: *Zyklischer Informationsaustausch zwischen dem Leitreechner mit dem Bahnplaner und der Reis-Robotersteuerung mittels XML-Kommandos*

Für die Bewegung auf eine vom Bahnplaner bzw. dem Leitreechner vorgegebenen Position wird der so genannte externe Verfahrenmodus benutzt, der den Roboter veranlasst, unmittelbar einen Punkt anzufahren, der mittels XML-Kommando in die Systemvariable `_PEXTPOS` geschrieben wurde [76]. Dazu stehen zwei unterschiedliche Verfahrenarten zur Verfügung:

- ohne Ringspeicher, d. h. jeweils nur der nächste Punkt wird angefahren, wobei kein Überschleifen möglich ist oder
- mit Ringspeicher, sodass zwischen Positionen überschleifen werden kann.

Der Punktespeicher lässt sich vor der eigentlichen Bewegungsausführung mit berechneten Stützpunkten beschreiben, die dann der Reihe nach abgefahren werden. Der Nachteil an dieser Vorgehensweise ist, dass erst nach Erreichen der letzten gepufferten Position die Roboterbewegung wieder angehalten bzw. der Ringspeicher beschrieben werden kann. Demzufolge ist dieser Lösungsansatz für kooperierende Roboter weniger gut geeignet, da diese selbst dann noch ihre Bewegung fortsetzen würden, wenn bereits eine drohende Kollision erkannt wurde.

Aus diesem Grund wird der Ringspeicher nicht benutzt, sondern die anzufahrende Position mittels XML-Kommando direkt an den Controller gesendet. Durch die Vorgabe eines neuen Zielpunktes kann die Bewegungsrichtung unmittelbar geändert bzw. der Roboter gestoppt werden. Somit besteht die Möglichkeit, die Trajektorien zur Laufzeit zu generieren, die aktuelle räumliche Situation innerhalb der Montagezelle zu berücksichtigen und demzufolge Kollisionsfreiheit zu gewährleisten, sodass die gestellten Anforderungen einer dynamischen Bahnplanung vollständig erfüllt werden.

7.3 Bewegungsplanung für kooperierende Linearroboter

Die eingesetzte Kinematik besteht aus drei Hauptachsen, die translatorische Bewegungen in den Raumrichtungen x , y und z zulassen, wobei kein Konfigurationswechsel des Effektors möglich ist. Dies führt dazu, dass das mathematische Modell wesentlich einfacher nachgebildet werden kann, als dies bei einem Knickarmroboter der Fall ist. Infolgedessen lassen sich die Armsegmente mit Hilfe von Hüllkörpern modellieren, die lediglich durch feste Abstände in Relation des TCPs beschrieben werden können.

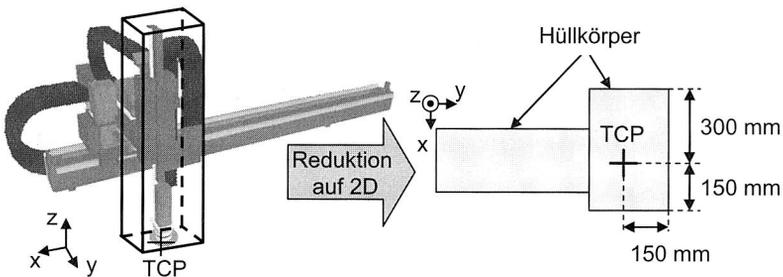


Bild 65: Reduzierung der Bahnplanungsproblematik auf zwei Dimensionen und Modellierung der Bounding Boxen in Abhängigkeit des Tool Center Point

Des Weiteren besteht die Möglichkeit, das dreidimensionale Bahnplanungsproblem um eine Dimension zu reduzieren, indem die Montagezelle aus der Vogelperspektive in z -Richtung betrachtet wird. Dies ist aber nur dann zulässig, wenn sichergestellt ist, dass eine Verfahrbewegung in einer sicheren z -Höhe durchgeführt wird, d. h. alle Hindernisse mit dem Roboter überfahren werden können. Dies hat zur Folge, dass das Bahnplanungsproblem nicht mehr in 3D gelöst werden muss. Infolgedessen vereinfacht sich die Lösungsfindung und die Rechenzeit kann nachhaltig gesenkt werden.

7.3.1 Bahnplanung mit der näherungsweise Zellzerlegung

Bei der Entwicklung eines Bewegungsplaners auf Grundlage der näherungsweise Zellzerlegungsmethode bringt die Dimensionsreduktion eine wesentliche Vereinfachung mit sich, sodass dieser Ansatz im Folgenden dargestellt ist. Eine ausführliche Beschreibung des Grundprinzips ist in Kapitel 5.1.2 gegeben. Die Idee des Planungsverfahrens besteht darin, den rechteckigen Arbeitsraum automatisch in Zellen zu unterteilen, bis

eine vom Anwender fest vorgegebene Diskretisierungsstufe, d. h. die minimale Zellengröße, erreicht worden ist. In dem aufgebauten 2^2 -Baum erfolgt sodann die Wegsuche nach einem freien Bewegungskanal zwischen aktueller TCP-Position und Zielpunkt mit Hilfe des A*-Algorithmus. Als Gewichtungsfunktion dient die noch zurückzulegende euklidische Entfernung bis zum Ziel.

Kollisionsvermeidung und Entwirrstrategie

Bewegen sich die beiden Roboter unabhängig voneinander innerhalb der Zelle, so gilt es zwischen drei verschiedenen Kollisionssituationen zu differenzieren, die in Bild 66 dargestellt sind. Zum Erkennen eines unmittelbar bevorstehenden Zusammenstoßes der beiden Effektoren muss eine minimale Distanz, die kritische Schwelle, zwischen den Hüllkörpern der Handhabungsgeräte unterschritten werden. Dabei können die zwei Roboter entweder mit ihren Stirnflächen, den Seiten oder aber mit je einer Ecke die Schwelle unterschreiten. Daraufhin erfolgt eine Analyse der räumlichen Ist-Situation, d. h. die Stellung der beiden Effektoren zueinander, um entsprechende Ausweichroutinen einzuleiten.

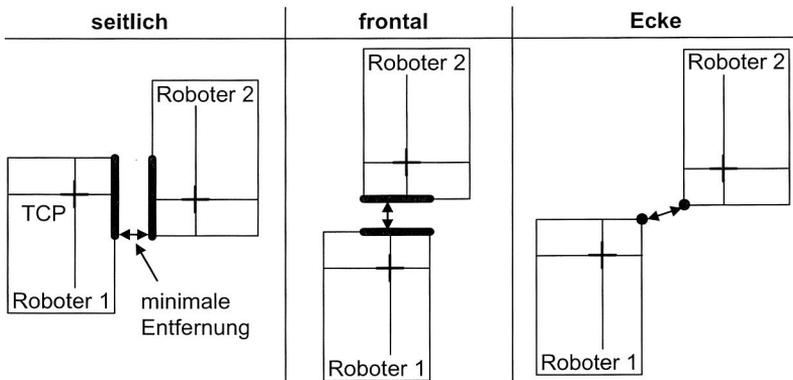


Bild 66: Differenzierung zwischen drei möglichen Kollisionfällen bei der Bewegungsplanung für zwei kooperierende Linearroboter

Bei seitlicher Annäherung der Handhabungsgeräte wird die initiierte Bewegung gestoppt und beide ziehen sich auf ihre Ursprungsseite zurück. Dadurch gleiten sie aneinander ab und es kommt zu einer Annäherung der Ecken. Diese Verklebungssituation sowie die frontale Annäherung können durch die Einführung von virtuellen, U-förmigen Hindernissen gelöst werden (vgl. Bild 67). Die anschließende neue Zellerlegung, das Aufstellen des 2^2 -Baumes sowie die Wegsuche führen dazu, dass sich die Roboter voneinander entfernen und halbkreisförmig umfahren, wobei sie wegen der vom virtuellen Hindernis abstoßenden Kräfte auf ihre Ursprungsseite zurückgedrängt werden. Sobald die kritische Schwelle nicht mehr unterschritten ist, werden die virtuellen Hindernisse wieder aus dem Berechnungsmodell entfernt.

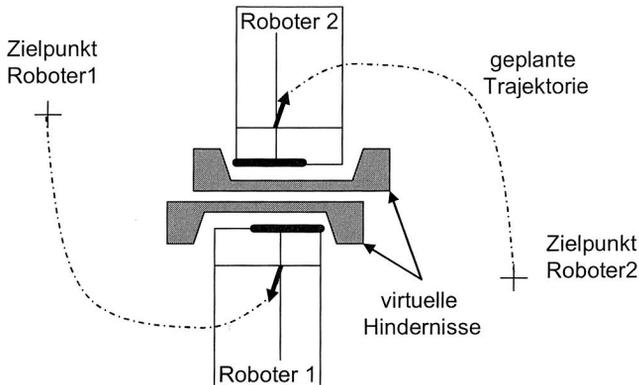


Bild 67: Einführung von U-förmigen virtuellen Hindernissen lässt die beiden Roboter halbkreisförmig aneinander vorbeifahren

Anhand der oben aufgezeigten Vorgehensweise wurde ein Bahnplaner auf Grundlage der näherungsweise Zellzerlegung für kooperierende Linearroboter implementiert. Allerdings gilt es je nach Stellung der Roboterkinematiken zwischen diversen Ausweich- und Entwirrstrategien zu differenzieren, was einen zusätzlichen Programmieraufwand nach sich zieht. Darüber hinaus erweist sich die Zerlegung mit anschließender Wegsuche als sehr zeit- und rechenintensiv, wobei allerdings bereits die Reduzierung auf lediglich zwei Raumdimensionen berücksichtigt ist. Eine dynamische dreidimensionale Bahnplanung im IPO-Takt der Steuerungen ist demzufolge nahezu nicht praktikabel. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Bahnplanung mit der Quadtree-Methode erfolgreich umgesetzt wurde. Allerdings kann sie hinsichtlich der Performance des Gesamtsystems nicht überzeugen.

7.3.2 Bahnplanung mittels Potentialfeldmethode

Die Leistungsfähigkeit eines Bewegungsplaners für kooperierende Roboter auf Grundlage der Potentialfeldmethode konnte bereits im vorangegangenen Kapitel 6 für Knickarmroboter unter Beweis gestellt werden. Auf Grund der dabei gewonnenen Erkenntnisse und der Tatsache, dass die näherungsweise Zellzerlegungsmethode für Echtzeitanwendungen weniger gut geeignet ist, wurde ebenfalls der Potentialfeldmechanismus bei den Linearrobotern angewendet. Der implementierte Bahnplaner für kooperierende Linearroboter wird im Folgenden näher beschrieben.

Die Trajektorienplanung erfolgt bei der Potentialfeldmethode wieder im Dreidimensionalen, sodass analog zu Kapitel 5.1.3 ein anziehendes und abstoßendes Potential für jeden Roboter berechnet wird. Bei der zum Einsatz kommenden Kinematik der Flächenausleger ist es allerdings ausreichend, die resultierenden Richtungsvektoren auf den TCP zu beziehen, da ein Konfigurationswechsel des Effektors nicht möglich ist. Damit Kollisionen frühzeitig erkannt und somit jederzeit vermieden werden

können, sind die Arme wiederum mit Hüllkörpern im rechnerinternen Modell nachmodelliert und mit Hilfspunkten versehen (vgl. Bild 54). Pro IPO-Takt wird zwischen je zwei Objekten unter Zuhilfenahme der Hilfspunkte der minimale Abstand berechnet. Sollte dieser weniger als 100 mm betragen, so wird der Hüllkörper, respektive der Roboter als Hindernis betrachtet und fließt in die Berechnung des abstoßenden Vektors mit ein.

Wegen der punktsymmetrischen Anordnung der beiden Handhabungsgeräte kann es zu der Konstellation kommen, dass sich die zwei Ausleger hinterschneiden, d. h. die y-Koordinate des Tool Center Points von Roboter 2 ist kleiner als die von Roboter 1. Diese Verklemmung kann nicht allein mit Hilfe der Potentialfeldmethode gelöst werden, da der resultierende Bewegungsvektor weiterhin in Richtung des Zielpunktes eines jeden Roboters zeigt (vgl. Bild 68 links). Aus diesem Grund muss bei Erkennen einer derartigen Situation eine Entwirrstrategie greifen, sodass sich die y-Ausleger soweit in Richtung ihres Ursprungs zurückziehen, bis die y-Koordinate des TCP von Roboter 1 wieder kleinere Werte annimmt als die von Roboter 2.

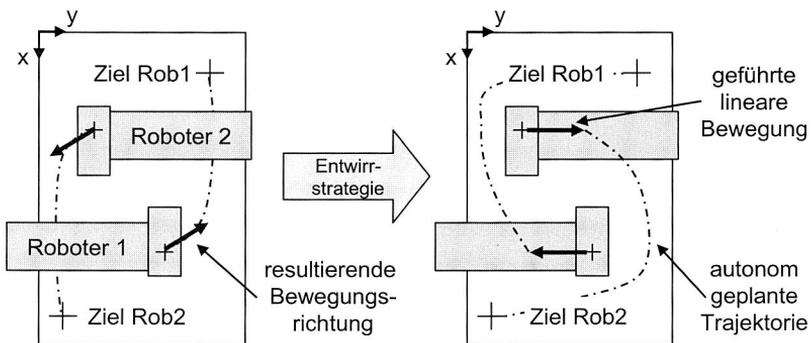


Bild 68: Auflösen der Hinterschneidung der Effektoren durch Rückzug der Ausleger in ihre Ursprungsrichtung und anschließende Planung mittels Potentialfeld

Demzufolge muss bei der Bewegungsplanung lediglich noch die eine oben beschriebene Verklemmungssituation in Form eines Sonderfalles erkannt und abgehandelt werden. Alle anderen Bewegungen können mit Hilfe der in Kapitel 5.1.3 beschriebenen Potentialfeldmethode durchgeführt werden, wobei gleichzeitig auch noch die z-Achse mit berücksichtigt wird. Infolgedessen ist die Potentialfeldmethode auch für kooperierende Linearroboter bestens geeignet, da der Implementierungsaufwand im Vergleich zur Zellzerlegung wesentlich geringer ausfällt. Somit wurde wiederum die Grundlage geschaffen, um das in Kapitel 3 beschriebene durchgängige Montagekonzept in die Realität umzusetzen, was im folgenden Kapitel näher erläutert ist.

7.4 Realisierung von durchgängigen Montageprozessen mittels dynamischer Ablaufsteuerung

Die vollautomatische Generierung sämtlicher potentieller Montagereihenfolgen unmittelbar aus einem 3D-CAD-Modell wurde bereits ausführlich in Kapitel 4 dargelegt. Daneben gilt es auch montagerelevante Informationen, wie beispielsweise benötigte Greifer, maximale Bauteilabmessungen, Abhol- und Fügepositionen etc., selbstständig zu ermitteln. Unmittelbar vor dem Montageprozess werden die zu fügenden Bauteile, die lose auf einem Werkstückträger liegen, von einem 2D-Laserscanner erfasst, sodass sich daraus ein dreidimensionales Rechnermodell erstellen lässt (vgl. Kapitel 4.3). Dieses wird automatisch analysiert sowie die aktuellen Greifpositionen der unterschiedlichen Bauteile in einer Datei gespeichert. Damit lässt sich der sehr zeitintensive Teach-In-Vorgang vollständig vermeiden (vgl. Bild 69).

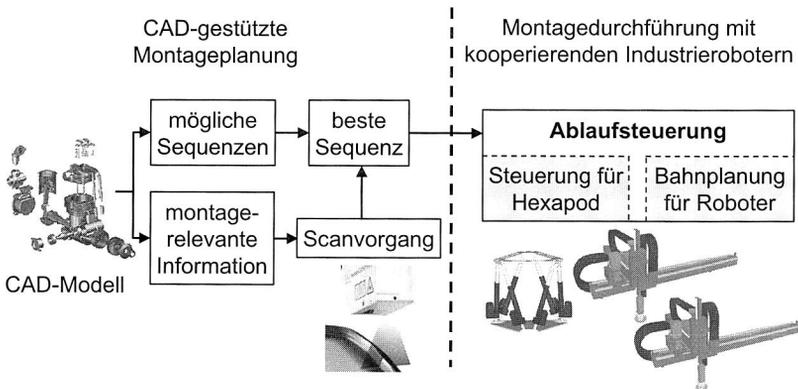


Bild 69: Darstellung des realisierten durchgängigen Montagekonzepts mit kooperierenden Linearrobotern, bei dem ausgehend vom CAD-Modell alle Informationen automatisch generiert werden

Unter Zuhilfenahme der chronologischen Montagesequenzen in Verbindung mit den Scandaten besteht die Möglichkeit, die am besten geeignete zu ermitteln (vgl. auch Kapitel 4.4). Sie wird anschließend an die Ablaufsteuerung für die kooperierenden Roboter übergeben und in die jeweiligen Elementarschritte zerlegt. Des Weiteren plant und koordiniert die Ablaufsteuerung die Bewegungen der verfügbaren Geräte. Dies bedeutet, dass sie die Bahnplanung auf Grundlage der Potentialfeldmethode übernimmt und die Positionen an die Controller übermittelt. Hervorzuheben ist hierbei, dass die Trajektorien wiederum dynamisch zur Laufzeit selbstständig generiert werden. Somit lassen sich komplette Montagesequenzen abarbeiten, ohne dass der Anwender weder von Hand die zeitliche Reihenfolge einzelner Montageschritte definieren, noch eine aufwändige Programmierung der Handhabungsgeräte vornehmen muss. Demzufolge wird der Benutzer nachhaltig entlastet und der gesamte Montageprozess in kürzerer Zeit bewerkstelligt.

Dynamische Ablaufsteuerung

In dem vorangegangenen Kapitel 4 wurde gezeigt, dass es möglich ist, ausgehend von einem CAD-Modell automatisch alle möglichen Montagesequenzen zu generieren. Insbesondere bei der Verwendung von kooperierenden Industrierobotern wurde bislang noch nicht erläutert, wie die Montageschritte auf die Handhabungsgeräte verteilt werden. Dazu sind diverse Kriterien erforderlich, wie z. B. Taktzeit, Anzahl an Greiferwechsel, Bahnlänge etc., anhand derer eine Bewertung der unterschiedlichen Sequenzen möglich ist. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Montageprozess zu verkürzen und aus diesem Grund gilt es die Montagereihenfolge mit der geringsten Taktzeit zu bestimmen und auszuführen.

Hierfür kann beispielsweise eine kommerzielle Kinematiksimulation, wie Igrip der Firma Delmia oder emSimulate von UGS, verwendet werden. Zusammen mit den oben entwickelten Bahnplanern sind so bereits in einer sehr frühen Phase des Produktentstehungsprozesses – genauer gesagt unmittelbar nach der Fertigstellung des CAD-Modells – Aussagen über die Machbarkeit der Montage sowie die zu erwartende Taktzeit möglich. Als Nachteil bei der kommerziellen Simulationssoftware in Verbindung mit den eigens entwickelten Bahnplanern erweist sich jedoch der erhöhte Zeitaufwand für die verschiedenen Simulationsläufe, sodass die beste Sequenz nicht zur Ausführungszeit berechnet werden kann. Aus diesem Grund wurde eine eigene Simulationsumgebung entwickelt, die in Abhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Anzahl an Robotern und Greifern, die kürzeste Sequenz bestimmt. Hierzu wird ein kompletter Ablauf in Elementarschritte unterteilt (vgl. Kapitel 6.4), denen wiederum Zeiten zugewiesen sind, die aus bereits erfolgreich durchgeführten Montagevorgängen gewonnen wurden.

Wegen des sehr großen gemeinsamen Arbeitsraumes bei den kooperierenden Linearrobotern sind nahezu alle Punkte von beiden Handhabungsgeräten erreichbar. Auf Grund ihres kinematischen Aufbaus kann allerdings immer nur einer von ihnen eine vorgegebene Position anfahren und der andere darf sich höchstens bis auf die kritische Distanz nähern. Dies führt jedoch dazu, dass z. B. während eines Greiferwechsels, das komplette Magazin von einem Roboter belegt wird. Selbiges geschieht beim Aufnehmen bzw. Ablegen eines Bauteils. Infolgedessen können die Zonen Greiferwechsel-, Pick- und Place-Bereich nur jeweils von einem Roboter befahren werden, d. h. das Gebiet ist exklusiv belegt bzw. vergeben. Ähnlich verhält es sich bei der Benutzung der zur Verfügung stehenden Greifer, die lediglich in limitierter Anzahl vorhanden sind. Die Zonen sowie die Greifer stellen demzufolge begrenzte Ressourcen innerhalb der Montagezelle dar, die jeweils nur von einem Roboter benutzt werden darf. Der andere muss entweder warten oder aber besser einen parallelen Montageschritt durchführen bzw. vorbereiten. Auf diesem Prinzip aufbauend sowie in Verbindung mit den im System hinterlegten Zeiten für jeden Elementarschritt werden die möglichen Sequenzen auf die beiden Handhabungsgeräte aufgeteilt und somit für jede Montagereihenfolge die jeweils resultierende Taktzeit ermittelt.

Im Detail betrachtet bedeutet dies, dass aus den automatisch erzeugten Montagesequenzen unter Zuhilfenahme der prozessspezifischen Greiferanforderungen eine Greifersequenz generiert werden kann. Der Grund liegt darin, dass sich nur mit dem richtigen Werkzeug ein Montageschritt durchführen lässt und die Werkzeuge darüber hinaus lediglich in begrenzter Anzahl innerhalb der Zelle vorhanden sind. Anschließend können die Einzelaufträge auf die zur Verfügung stehenden Handhabungsgeräte aufgeteilt werden.

Dabei erhält der erste Roboter immer den ersten Auftrag. Dem Nachfolgenden wird der Bearbeitungsschritt mit einem Greifer zugeordnet, der ungleich dem der Vorgänger ist. Wenn alle Roboter eine Montageaufgabe zugewiesen bekommen haben, kann mit der Abarbeitung begonnen werden (vgl. Bild 70). Sobald ein Handhabungsgerät seinen Auftrag abgearbeitet hat, wird in der Greifersequenz die zeitlich nächste noch zu vergebende Tätigkeit ermittelt. Wenn diese einen Greifer benötigt, der von allen im Einsatz befindlichen Werkzeugen abweicht, so wird der aktuelle Roboter diesen Auftrag übernehmen. Sobald allerdings ein anderes Handhabungsgerät das dafür benötigte Werkzeug bereits gegriffen hat, so wird in der Montage- bzw. Greifersequenz weiter fortgeschritten. Insbesondere durch die Reduzierung der Anzahl an Greiferwechseln lassen sich die Einzelaufträge auf die beteiligten Industrieroboter aufteilen und die unproduktiven Nebentätigkeiten reduzieren. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei einem Werkzeugwechsel auf Grund des Platzangebotes mit reduzierter Geschwindigkeit verfahren wird und demzufolge dieser Vorgang etwa drei mal so lange andauert, wie eine freie Fahrt auf einen Zielpunkt innerhalb des gemeinsamen Arbeitsraumes.

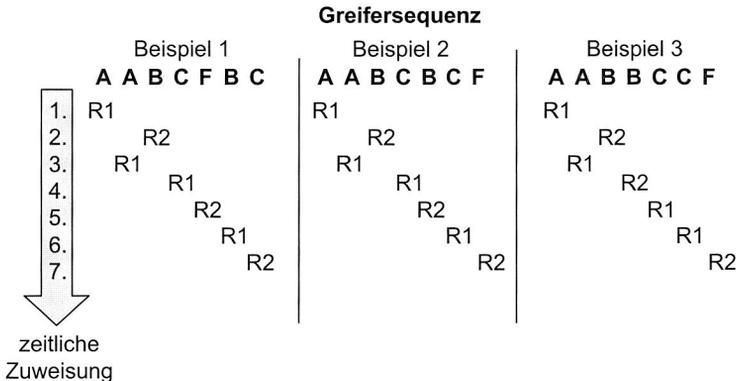


Bild 70: Verteilung einzelner Pick&Place-Montageschritte verschiedener Sequenzen unter Berücksichtigung der erforderlichen Greifer (A, B, C und F) auf zwei kooperierende Industrieroboter R1 und R2

Die Bestimmung der Taktzeit erfolgt dadurch, dass einzelne Montageaufträge in Verbindung mit der Verteilung auf die Handhabungsgeräte in die entsprechenden Elementarschritte zerlegt werden (vgl. Kapitel 6.4). Als Zeiten für einen Pick- bzw. Place-Vorgang sowie Greiferwechsel liegen die aus bereits abgeschlossenen Montagevorgängen real gemessenen und protokollierten Zeitspannen zu Grunde, die während jeder Programmausführung ergänzt und somit aktualisiert werden. Demzufolge können alle Montageschritte unter Berücksichtigung der Ressourcennutzung sowie ablaufbedingter Stillstandszeiten chronologisch aneinander gereiht werden. Die resultierende Gesamtzeit ergibt sich mit der Beendigung des letzten zu vergebenden Elementarschrittes.

Vorteilhaft an der eigens entwickelten Simulationsumgebung erweist sich die sehr kurze Berechnungszeit für die Ermittlung der kürzesten Montagesequenz. Aus diesem Grund besteht die Möglichkeit, selbst zur Laufzeit jeweils die noch verbleibenden Montageschritte, unter Berücksichtigung der limitierenden Ressourcen, auf die beiden zur Verfügung stehenden Roboter aufzuteilen, um die Taktzeit möglichst gering zu halten. Der Wechsel zu einer anderen als der zu Beginn des Montagevorgangs bestimmten Sequenz kann sich dann als sinnvoll erweisen, wenn z. B. zur Ausführungszeit der Prozess bei einem Handhabungsgerät gestört ist. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn ein Schraub- oder Nietvorgang nicht erfolgreich ausgeführt wird und wiederholt werden muss, was zur Folge hätte, dass der andere Roboter währenddessen still stehen würde. Durch einen Wechsel innerhalb der gültigen Montagesequenzen, unter Berücksichtigung der bereits erfolgreich abgeschlossenen Montageschritte, besteht eventuell die Möglichkeit, den fehlerbehafteten Prozessschritt zeitlich nach hinten zu verlagern und zwischenzeitlich mit dem anderen Handhabungsgerät mit der Montage fortzufahren. Währenddessen könnte der Maschinenbediener die aufgetretene Störung beseitigen und der noch fehlende Prozessschritt wird zu einem späteren, aber immer noch gültigen Zeitpunkt durchgeführt.

7.5 Darstellung der Versuchsergebnisse anhand diverser Montage-szenarien

In den obigen Kapiteln wurde das Konzept für eine durchgängige rechnergestützte Montage sowie deren Übertragung auf reale Anlagen mit kooperierenden Linearrobotern dargelegt. Im Folgenden soll nun die Leistungsfähigkeit der Lösung anhand von zwei Beispielen aufgezeigt werden.

7.5.1 Baugruppe Pin-Hülse

Als erstes Beispiel dient die bereits in Kapitel 4.1 vorgestellte Baugruppe mit der geringfügigen Modifikation, dass der Ring entfernt wurde (siehe Bild 71). Demzufolge besteht sie aus nunmehr vier Teilen: Boden, Pin, Hülse und Deckel. Das Modell wurde dabei mit dem CAD-Programm Pro/ENGINEER Wildfire 2.0 der Firma PTC erstellt.

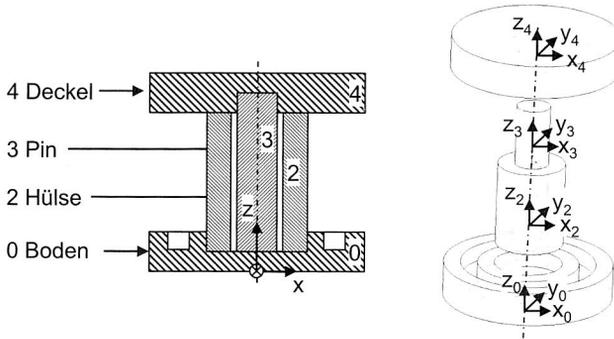


Bild 71: Modifizierte Beispielbaugruppe „Pin-Hülse“ bestehend aus vier Bauteilen

Für die Generierung der montagerelevanten Informationen wurde der in Kapitel 4.1 vorgestellte Algorithmus in Pro/TOOLKIT implementiert, sodass zunächst vollautomatisch alle möglichen Montager Reihenfolgen erzeugt werden. Unter der Voraussetzung, dass lediglich die Verbindung der Bauteile Deckel und Pin als stabil angesehen wird sowie dem Robotertupel [000001] als Fügerichtung, d. h. die negative z-Richtung ist zulässig, ergeben sich die in Tabelle 5 aufgeführten möglichen Sequenzen. Änderungen in der Verbindungsmatrix, in der die Stabilitätsbeziehungen zwischen zwei Bauteilen definiert sind, haben unmittelbare Auswirkungen auf die gültigen Montagesequenzen (vgl. Bild 72).

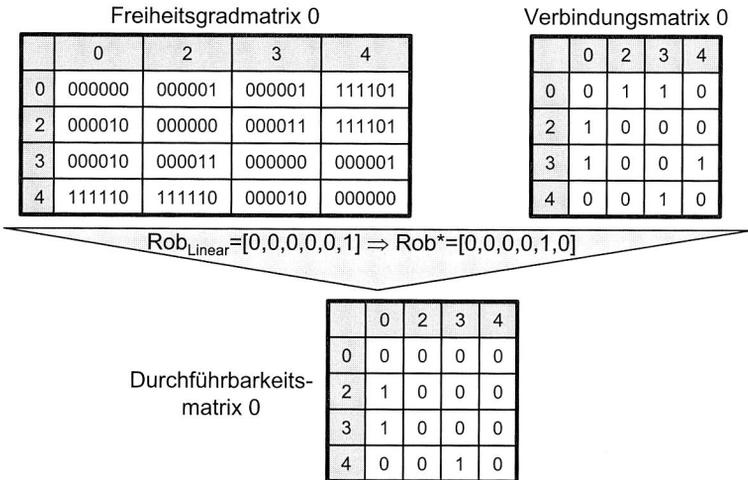


Bild 72: Zugrunde gelegte Freiheitsgrad- und Verbindungsmatrix für das obige Beispiel sowie die daraus resultierende Durchführbarkeitsmatrix der 0. Stufe

Alle möglichen Montagereihenfolgen sind in der Ausgabedatei „montageplanung_sequenzen.txt“ gespeichert. Darüber hinaus werden insbesondere die geometrischen Beziehungen automatisch extrahiert, wie beispielsweise Abhol- und Fügepositionen sowie räumliche Positionierung des Hexapoden bei der Pick- oder Place-Operation. Sie lassen sich auf die Orientierung der Bauteilkoordinatensysteme zurückführen und werden in der Datei „montageplanung_bauteile.txt“ bereitgestellt. Die dafür erforderlichen Berechnungen benötigen auf dem PC, der mit einem 3,2 GHz Prozessor und 1 GB Arbeitsspeicher ausgestattet ist, insgesamt 3 Minuten, wobei alle Raumrichtungen überprüft wurden. Die Zerlegung der Baugruppe in die drei Raumrichtungen beeinflusst maßgeblich die benötigte Zeitdauer. Wenn lediglich die z-Richtung als mögliche Fügerichtung zugelassen wird, so kann sie auf 1 Minute reduziert werden.

Tabelle 5: Mögliche Montagereihenfolgen der Beispielbaugruppe „Pin-Hülse“, die mit Hilfe des vollautomatischen Planungsalgorithmus erstellt wurden

Sequenz 1	0 – 2 – 3 – 4
Sequenz 2	0 – 3 – 2 – 4
Sequenz 3	3 – 4 und 0 – 2, dann 3&4 in 0&2

Für die Montage mit den kooperierenden Linearrobotern ist es ausreichend, die vier Einzelteile auf einen Werkstückträger an beliebigen Positionen abzulegen. Die Palette wird anschließend mit Hilfe des in Kapitel 4.3.2 bereits vorgestellten Laserscanners erfasst und ein dreidimensionales Abbild erzeugt. Die anschließende Analyse bzgl. der Identifikation der Bauteile sowie deren Greifpositionen erfolgt ebenfalls auf dem verwendeten Leitreechner und dauert ca. 10 Minuten. Die ursprünglichen aus dem 3D-CAD-Modell ermittelten Greifpositionen der Bauteile werden sodann in der Datei „montageplanung_bauteile.txt“ durch die ermittelten Koordinaten ersetzt. Mit dieser Vorgehensweise kann auf den ansonsten erforderlichen und sehr zeitintensiven Teach-In-Prozess vollständig verzichtet werden. Maßgeblicher Faktor in Bezug auf die benötigte Zeit ist der zu erfassende Bereich auf dem Werkstückträger, was wiederum auf die Anzahl an Scannstreifen sowie die damit verbundene Größe des rechnerinternen Abbildes zurückzuführen ist.

Abschließend dienen die beiden erzeugten Dateien als Grundlage für die Ermittlung der besten Montagereihenfolge. Hierzu gilt es alle möglichen Sequenzen in ihre Einzelschritte zu zerlegen und hinsichtlich der resultierenden Taktzeit zu untersuchen (vgl. Kapitel 7.4). Diejenige mit der geringsten Montagezeit wird sodann an die Ablaufsteuerung übergeben und die entsprechenden Anweisungen für die Roboter erzeugt. Die Planung, Berechnung und Zuweisung der Trajektorien erfolgt hierbei in Echtzeit, d. h. im Interpolationstakt der Controller, der im Bereich von 12 msec liegt.

Die Dauer für die gesamte Prozesskette „Montage“ setzt sich nun aus den Einzelzeiten für die Planung, den Scanvorgang und den eigentlichen Montageprozess zusammen

und beträgt bei diesem Beispiel weniger als 20 Minuten. Für eine Vorgehensweise nach dem konventionellen Planungsprozess, der durch eine Vielzahl an manuellen Tätigkeiten sowie dem zeitintensiven Teach-In-Prozess gekennzeichnet ist, muss mindestens eine Dauer von 1-2 Stunden eingeplant werden. Demzufolge fällt die im Rahmen des hier vorgestellten Lösungskonzepts erforderliche Zeitspanne wesentlich geringer aus, sodass die Zielsetzung – die Verkürzung des Montageprozesses – erfolgreich nachgewiesen werden konnte.

7.5.2 Beispielbaugruppe Kfz-Türmodul

Das Potential des entwickelten Montagekonzepts soll neben der idealisierten Baugruppe „Pin-Hülse“ auch noch an dem realen Produkt „Türmodul“ aufgezeigt werden. Dabei handelt es sich um eine Baugruppe, bestehend aus einem Basisträgerblech und verschiedenen Komponenten, wie beispielsweise Lautsprecher, Klipse für die Kabelbaumbefestigung, Fensterheber, Türschließmodul etc., die je nach Ausführungstyp variieren (vgl. Bild 73). Charakteristisch für diese Baugruppe sind die relativ großen Abmessungen des flächigen Blechteiles, sodass Linearroboter für die Montage mit ihrem großen Arbeitsraum besonders gut geeignet sind [70].

CAD-Modell

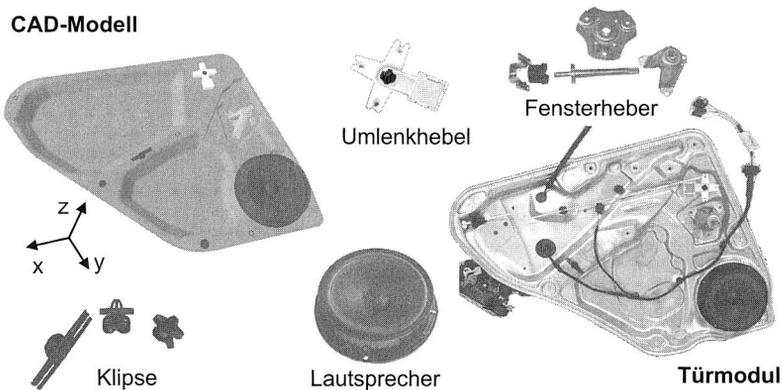


Bild 73: Beispielprodukt Türmodul mit den zu montierenden Komponenten als CAD-Modell (links) und in Realität (rechts) [Bildquelle: Brose]

Die Berechnung der gültigen Montagereihenfolgen erfolgt wiederum vollautomatisch. Dabei wurde auch die Anzahl an Bauteilen variiert, woraus sich sehr unterschiedliche Berechnungszeiten ergeben, was als unterschiedliche Modellvarianten interpretiert werden kann (vgl. Bild 74). Gleichzeitig resultieren daraus allerdings auch sehr viele verschiedene Montagemöglichkeiten, weil nur zwischen wenigen Bauteilen, wie z. B. dem Fensterheber, eine chronologische Abhängigkeit besteht. Demzufolge lassen sich die Klipse beispielsweise einfach auf dem Basisträger befestigen, wobei die zeitliche Montagereihenfolge dabei keine Rolle spielt, da sie voneinander räumlich getrennt sind.

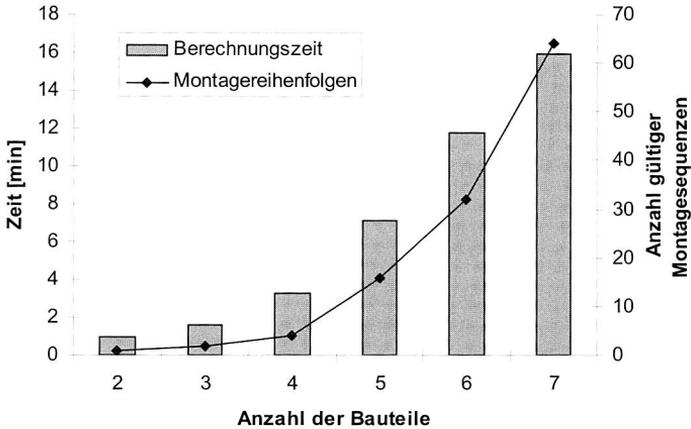


Bild 74: Die Berechnungszeit sowie die daraus resultierende Anzahl an gültigen Montagereihenfolgen hängt stark von der Anzahl der zu montierenden Bauteile ab

Aber auch in diesem Fall lassen sich alle möglichen Sequenzen vollautomatisch binnen Minuten berechnen. Eine maßgebliche Beschleunigung wird erzielt, sobald Fügerichtungen, die nicht mit dem Handhabungsgerät durchführbar sind, ausgeschlossen werden (vgl. Kapitel 4.1). Die Dauer des sich anschließenden Scanvorgangs ist wiederum von der zur Verfügung gestellten Fläche für die Positionierung der Einzelbauteile abhängig. Bei Verwendung des gesamten Werkstückträgers von $640 \times 640 \text{ mm}^2$ beträgt diese ca. 10 Minuten. Auf Grund der vielen verschiedenen Bauteilformen sind demzufolge auch eine große Anzahl an verschiedenen Greifern und infolgedessen ein häufiger Werkzeugwechsel erforderlich. Durch die Verteilung der Aufträge auf die zur Verfügung stehenden Handhabungsgeräte kann mit der entwickelten Simulationsumgebung die kürzeste Montagesequenz ermittelt und anschließend mit den realen Industrierobotern ausgeführt werden.

In Bild 75 sind die Montagezeiten für die 64 verschiedenen Sequenzen aufgetragen, die sich mit insgesamt 7 Bauteilen ergeben. Es wurde angenommen, dass für die Montage der Werkstücke insgesamt 4 unterschiedliche Greifer erforderlich sind. Zusätzlich wurde die Anzahl zur Verfügung stehender Roboter in der Zelle variiert. Wenn nur ein Handhabungsgerät die Aufgabe durchführt, so beträgt die durchschnittliche Taktzeit etwa 19 Minuten. Allein durch den Einsatz eines zweiten Industrieroboters lässt sie sich auf 12 bis 15 Minuten reduzieren. Dieser signifikante zeitliche Gewinn ist auf die Parallelisierung von Arbeitsschritten, insbesondere der Greiferwechsel, zurückzuführen. Eine Erhöhung der Roboteranzahl auf 3 bzw. 4 führt nochmals zu einer theoretischen Verkürzung der Prozesszeit, allerdings würde sich die praktische Umsetzung, wegen des gemeinsamen Arbeitsraumes, als schwer realisierbar darstellen.

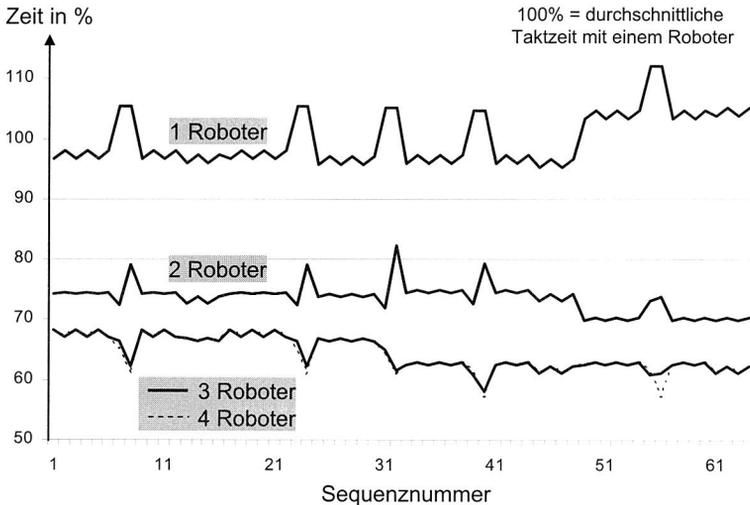


Bild 75: Verkürzung der Montagezeit um ca. 25 % durch den Einsatz von zwei kooperierenden Robotern

Die vorausberechneten Montagezeiten für zwei kooperierende Linearroboter stimmen mit den real gemessenen gut überein, die im Bereich von 16 bis 20 Minuten liegen. Die Abweichungen sind auf die Berechnung der zurückzulegenden Stecken innerhalb der Zelle und die sich daraus ergebende Dauer zurückzuführen. In der Simulation wird lediglich der euklidische Abstand zwischen zwei Punkten als Weg angesehen, wohingegen in Realität die Roboter sich gegenseitig sowie Hindernissen ausweichen müssen und demzufolge größere Wegstrecken zurücklegen.

Auch bei dieser Montageanlage konnte durch die konsequente Umsetzung des in Kapitel 3 vorgestellten durchgängigen und rechnergestützten Lösungsansatzes ein großes zeitliches Einsparpotential erschlossen werden. Insbesondere durch den Einsatz von zwei kooperierenden Linearrobotern konnte eine Taktzeitreduzierung der realen Montage um ca. 25 % erzielt werden, was auf die parallele Ausführung von verschiedenen Montageschritten zurückzuführen ist.

7.6 Zusammenfassung

Mit der zweiten Montagezelle, die sich aus zwei Linearrobotern der Firma Reis GmbH&Co Maschinenfabrik und einem am Lehrstuhl entwickelten Hexapoden zusammensetzt, wird neben der autonomen Bewegungsplanung für die kooperierenden Handhabungsgeräte das Ziel einer durchgängigen Prozesskette verfolgt, um dadurch eine nachhaltige Verkürzung der Montage herbei zu führen. Aus der verwendeten kinematischen Kette, deren Hauptbewegungsachsen in einem kartesischen Rechtssystem angeordnet sind sowie der punktsymmetrischen Anordnung der beiden Effektoren resultiert ein rechteckiger Arbeitsraum, in dem eine gestellte Aufgabe in Zusammenarbeit gelöst werden kann. Allerdings verfügen die eingesetzten Linearroboter lediglich über vier Freiheitsgrade, drei translatorische und einen rotatorischen, sodass eine Montage auf schrägen Flächen nicht möglich ist. Deshalb wurde ein Hexapod mit in die Zelle integriert, der die räumliche Orientierung des Basisteils um bis zu 20° in alle Richtungen verändern kann. Demzufolge lässt sich in den meisten Fällen die Flächennormale parallel zur Hauptfügerichtung der Roboter ausrichten, um eine Montage auch auf schrägen Flächen zu realisieren.

Bei dieser Montagezelle gestaltet sich die manuelle Programmierung für den Anwender wegen des gemeinsamen Arbeitsraumes der beiden Roboter ebenfalls als sehr schwierig und fehleranfällig. Deshalb wurden Bahnplaner auf Grundlage der näherungsweise Zellzerlegung sowie der Potentialfeldmethode implementiert. Auf Grund der Anordnung der einzelnen Achsen ist bei einem Linearroboter ein Konfigurationswechsel nicht möglich und infolgedessen kann eine Dimensionsreduzierung des Bahnplanungsproblems erfolgen. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die Suche nach einer Trajektorie lediglich in 2D, d. h. aus der Vogelperspektive betrachtet, durchgeführt werden kann, wenn vorausgesetzt wird, dass alle in der Zelle befindlichen Hindernisse in einer sicheren z-Höhe über- bzw. umfahren werden können. Demzufolge besteht die Möglichkeit, eine Wegplanung mit dem Quadtree-Verfahren zu realisieren. Nachteilig an diesem Bahnplaner ist die Tatsache, dass es sich dabei um ein globales Verfahren handelt, d. h. im Falle einer neuen Analyse der gesamte Arbeitsraum berücksichtigt werden muss und dementsprechend viel Rechenleistung und -zeit benötigt wird. Des Weiteren gilt es diverse räumliche Kollisionssituationen der beiden Flächenausleger zu erkennen und mit Hilfe entsprechender Entwirrstrategien aufzulösen, was einen erheblichen Mehraufwand hinsichtlich der Programmierung bedeutet.

Aus diesem Grund wurde, wie auch bereits bei den kooperierenden Knickarmrobotern, ein Bewegungsplaner auf Basis der Potentialfeldmethode entwickelt und implementiert. Die einzelnen Achsen werden wieder mit Hilfe von Hüllkörpern repräsentiert, die jedoch nicht mit Transformationsmatrizen umgerechnet werden müssen, sondern wegen der einfacheren Kinematik lediglich in Abhängigkeit des Tool Center Points definiert sind. Dadurch lässt sich wiederum eine effektive und dynamische Bahnplanung sowie Kollisionsvermeidung zur Laufzeit des Gesamtsystems erzielen.

Der Datenaustausch zwischen dem Leitrechner und den Robotern sowie dem Hexapoden basiert auf Grundlage des Ethernets unter Verwendung des TCP/IP-Protokolls. Die Kommunikation zu den Controllern der Firma Reis wird mittels XML-Kommandos sichergestellt, über die sämtliche Systemvariablen sowie die aktuellen Positionen der Roboter abgefragt, aber auch die neuen Zielpositionen der Bewegungsbahn vorgegeben werden können. Somit lassen sich in Verbindung mit der CAD-gestützten Montageplanung und einer entsprechenden Ablaufsteuerung wiederum komplette Montagesequenzen automatisch mit den kooperierenden Linearrobotern abarbeiten, sodass der Anwender bei der Programmierung wesentlich entlastet wird.

Darüber hinaus wurde ein Laserscanner mit in die Zelle integriert, der die unmittelbar vor dem Montageprozess eingebrachten Bauteile detektiert. Daraus ergibt sich, dass sie nun nicht mehr gezwungenermaßen in speziellen Formnestern zugeführt werden müssen, sondern auch lose auf dem Werkstückträger angeordnet sein können. Aus den gewonnenen Informationen lässt sich ein dreidimensionales Modell generieren, das anschließend vollautomatisch hinsichtlich der Identifikation der Werkstücke sowie deren aktueller Position analysiert wird. Unter Zuhilfenahme einer Bildverarbeitungssoftware werden mit den Referenzdaten aus dem 3D-CAD-Modell und geometrischen Charakteristika die Teile eindeutig zugeordnet und deren aktuelle Greifposition in Bezug auf ein Referenzkoordinatensystem bestimmt. Diese Punkte werden sodann an die Ablaufsteuerung übermittelt, um die Trajektorien von der Bahnplanung entsprechend zur Laufzeit dynamisch zu generieren. Demzufolge lässt sich mit dieser Vorgehensweise der sehr zeitaufwändige Teach-In-Prozess, bei dem die unterschiedlichen Greifpositionen der Werkstücke von Hand ermittelt werden, vollständig vermeiden, wodurch eine erhebliche Einsparung in Bezug auf die Prozesszeit erzielt wird.

Anhand von Beispielbaugruppen wurde abschließend die Leistungsfähigkeit des entwickelten und umgesetzten Lösungsansatzes verifiziert. Durch den Einsatz von zwei kooperierenden Linearrobotern, konnte die Montagedauer im Vergleich mit lediglich einem Handhabungsgerät nachhaltig reduziert werden, was eine signifikante Verkürzung des Montageprozesses zur Folge hat. Der Forderung nach einem durchgängigen Montagekonzept, um dadurch eine robuste und verkürzte Prozesskette zu erhalten, konnte somit vollständig Rechnung getragen werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Der Produktentstehungsprozess unterliegt im Zuge der Globalisierung und dem damit einhergehenden immer stärker werdenden Wettbewerb einem stetigen Wandel. Seit jeher gilt es Produkte im Spannungsfeld von Zeit, Kosten und Qualität zu entwickeln und zu produzieren. Den dabei gestiegenen Anforderungen begegnen die Unternehmen in den letzten Jahren mit einem zunehmenden Grad an Automatisierung, was allerdings gleichzeitig mit einem sehr hohen Investitionsaufwand für Sondermaschinen verbunden ist. Dem steht jedoch die Kurzlebigkeit heutiger Produkte gegenüber, d. h. der Produktlebenszyklus verkürzt sich immer mehr, sodass im gleichen Rhythmus auch die Montageanlagen adaptiert werden müssen. Der Umrüstvorgang kennzeichnet sich jedoch durch einen hohen Investitions- und Zeitbedarf aus. Deshalb wird insbesondere im Bereich der Montagetechnik versucht, die Anlagenflexibilität durch den Einsatz von Industrierobotern zu steigern. Sie lassen sich wegen ihrer freien Programmierbarkeit für die unterschiedlichsten Aufgaben einsetzen und infolgedessen sehr gut wieder verwenden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung von verkürzten Montageprozessen, die zum einen durch die CAD-gestützte Montageplanung und der damit verbundenen vollautomatischen Generierung von montagerelevanten Informationen erreicht wird. Zum anderen werden kooperierende Industrieroboter eingesetzt, die in der Lage sind, eine ihnen gestellte Montagesequenz selbstständig abzarbeiten. Dadurch kann nicht nur die reine Taktzeit des Montageprozesses reduziert werden, sondern es besteht vielmehr die Möglichkeit, die gesamte Prozesskette, von der Planung über Arbeitsvorbereitung bis zur Durchführung, mit Hilfe der durchgängigen Rechnerunterstützung nachhaltig zu verkürzen und gleichzeitig fehlertolerant und robust zu gestalten.

Dabei gilt es nicht nur den eigentlichen Montageprozess auf Verbesserungen zu überprüfen, sondern es ist vielmehr die gesamte Prozesskette mit in die Betrachtung einzubeziehen, um einen ganzheitlichen Lösungsansatz entwickeln zu können. Aus diesem Grund beginnt das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte und umgesetzte Montagekonzept bereits bei der sehr frühen Phase der Produktentwicklung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im 3D-CAD-Modell neben den für den Montageprozess essentiell wichtigen geometrischen Größen, wie beispielsweise Hauptabmessungen oder relative Lage der Bauteile zueinander, auch Informationen über die zeitliche Montageabfolge enthalten sind.

Auf der Grundlage des Ansatzes „Montage durch Demontage“ wurden Algorithmen entwickelt, mit denen, ausgehend vom 3D-Produktmodell, alle möglichen Fügereihenfolgen vollautomatisch ermittelt werden können. Dabei gilt es verschiedene Randbedingungen, wie z. B. verwendete Roboterkinematik, Verbindungsfestigkeit zwischen zwei Bauteilen oder -gruppen, Greifflächen etc. zu definieren und zu berücksichtigen. Daraus resultieren im Anschluss sämtliche durchführbaren chronologischen Montagesequenzen inklusive aller Greif- und Fügepositionen sowie technologischer Parameter.

Demzufolge wurde mit der CAD-gestützten Montageplanung die Möglichkeit geschaffen, alle Informationen, die für die Prozessdurchführung auf einer realen Montageanlage erforderlich sind, vollautomatisch zu generieren. Dadurch wird der Anwender während der Planungsphase nahezu vollständig entlastet und die Zeitdauer bis zur Fertigstellung einer potentiellen Montagesequenz nachhaltig verkürzt. Ein weiterer positiver Effekt der selbstständigen Planung ist in der Kontrolle der Machbarkeit einer Montageabfolge zu sehen. Das bedeutet, dass der Konstrukteur bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt der Produktentstehung überprüfen kann, ob das zu entwickelnde Produkt überhaupt montierbar ist, sodass eventuelle Fehler auf Grund des Frontloadings schnell erkannt und behoben werden können.

Anschließend besteht sodann die Möglichkeit, eine gültige Montagesequenz mit Hilfe von Industrierobotern abzuarbeiten. Um den Anwender bei der normalerweise erforderlichen Programmierung zu entlasten und den zeitlichen Aufwand erheblich zu reduzieren, wurden autonome Bewegungsplaner entwickelt, die eine kollisionsfreie Trajektorie zu einem vorgegebenen Zielpunkt berechnen. Dabei erweist sich die Potentialfeldmethode als der am besten geeignete Lösungsansatz. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es sich um ein rein mathematisches Verfahren handelt, das auf anziehenden und abstoßenden Kräften basiert, die auf den Roboter einwirken. Des Weiteren zählt es zu den lokalen Verfahren, d. h. für die Berechnung der Trajektorie ist nicht die Betrachtung des gesamten Arbeitsraumes erforderlich, sondern es sind lediglich die aktuelle Position des Effektors und der Zielpunkt sowie alle innerhalb eines festgelegten Einflussradius befindlichen Objekte um das Handhabungsgerät von Interesse.

Insbesondere die manuelle Programmierung von kooperierenden Industrierobotern, darunter sind Handhabungsgeräte zu verstehen, die in der Lage sind, zeitlich und/oder räumlich aufeinander abgestimmte Bewegungen durchzuführen, ist wegen des gemeinsamen Arbeitsraumes und der damit einhergehenden permanenten Gefahr eines Zusammenstoßes nahezu ausgeschlossen. Allerdings lässt sich durch den Einsatz des entwickelten autonomen Bahnplaners eine effektive Kollisionsüberwachung und -vermeidung realisieren, sodass die Trajektorien für die Roboter in Echtzeit selbstständig geplant werden können. Dies setzt jedoch voraus, dass die Bewegungen nicht einfach starr abgearbeitet, sondern dynamisch zur Laufzeit generiert und an die Steuerungen der Handhabungsgeräte übermittelt werden. Erst dadurch ist die Möglichkeit gegeben, flexibel auf bewegliche Objekte sowie unvorhergesehene Ereignisse zu reagieren und entsprechende Ausweichbewegungen durchzuführen, sodass ein fehlertoleranter und robuster Gesamtprozess resultiert.

Ein wichtiges Element des hier vorgestellten Lösungsansatzes stellt die Umsetzung der Kommunikation zwischen allen beteiligten Steuerungen sowie dem Leitrechner dar. Dabei wurde keine proprietäre Lösung erarbeitet, sondern darauf geachtet, dass das Konzept auf beliebig viele Steuerungen und verschiedene Hersteller übertragen werden kann. Aus diesem Grund wurden weder hard- noch softwaretechnische Eingriffe auf

Seiten der Robotercontroller vorgenommen, sondern lediglich die vom Hersteller angebotenen Standardschnittstellen für einen Datenaustausch mittels Ethernet eingesetzt.

In Verbindung mit der implementierten Ablaufsteuerung, die eine Montagesequenz in ihre Elementarschritte zerlegt und die dazugehörigen Verfahrensanweisungen generiert, kann mit Hilfe der entwickelten Mechanismen bereits eine gültige chronologische Reihenfolge selbstständig mit kooperierenden Industrierobotern abgearbeitet werden, ohne dass der Anwender die Handhabungsgeräte manuell programmieren muss. Stehen allerdings mehrere gültige Sequenzen zur Verfügung, so ist a priori nicht bekannt, welche von ihnen die kürzeste Taktzeit besitzt, was in Hinblick auf eine verkürzte Prozesskette jedoch von besonderem Interesse ist. Im Wesentlichen wird die Montagedauer durch die Aufteilung der Teilschritte auf die verschiedenen Handhabungsgeräte und die damit verbundene unterschiedliche Anzahl an Greiferwechseln sowie Stillstandzeiten beeinflusst. Um hier gesicherte Aussagen treffen zu können, wurde der Bahnplaner, der ebenfalls in der realen Montagezelle zum Einsatz kommt, an eine Kinematiksimulation gekoppelt. Somit lässt sich bereits unmittelbar nach der Fertigstellung des CAD-Modells sowie dem automatischen Extrahieren der montage-relevanten Informationen am Computer der Montageprozess visualisieren und die zu erwartende Taktzeit ermitteln. Wenn lediglich die Zeitdauer von Interesse ist, so bietet es sich an, auf die visuelle Darstellung zu verzichten, sodass die erforderliche Berechnungszeit wesentlich reduziert werden kann. Dafür wurde eine Simulationsumgebung entwickelt, die vorgegebene Montagesequenzen in ihre Elementarschritte unterteilt und mit Hilfe von hinterlegten Zeitspannen die Gesamtdauer für jede Sequenz bestimmt. Somit ist durch die Anbindung des Bahnplaners an die Simulation die Möglichkeit gegeben, alle möglichen Montagereihenfolgen bereits im Vorfeld zu analysieren und diejenige mit der kürzesten Taktzeit zu ermitteln.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit dem vorgestellten durchgängigen Montagekonzept ein grundlegender Ansatz entwickelt und umgesetzt wurde, mit dem die Prozesskette „Montage“ nachhaltig verkürzt und robust gestaltet werden kann. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass insbesondere in der Montageplanung sämtliche Teilvorgänge weitgehend automatisiert und damit die manuellen Eingriffe von Seiten des Anwenders erheblich reduziert wurden. Zum anderen kann durch den Einsatz von kooperierenden Industrierobotern in Verbindung mit autonomer Bahnplanung und Kollisionsvermeidung die Taktzeit weiter reduziert sowie der zeitintensive Programmieraufwand nahezu vollständig vermieden werden.

Die hier erarbeiteten Lösungsansätze sind allgemeingültig formuliert, sodass sie in Kooperation mit Roboterherstellern in zukünftige Steuerungsarchitekturen integriert werden können. Daraus würden sowohl eine vereinfachte und schnelle Inbetriebnahme von kooperierenden Industrierobotersystemen als auch zunehmend robuste, verkürzte und fehlertolerante Montageprozesse resultieren.

Summary

Nowadays the situation of business companies is affected by the increase of the world-wide severe competition. Thus means, that products have to be produced in high quality in shortened time and lower prices by regarding at the same time customer requirements and wishes. Therefore companies have to cope with very complex interrelations, which can only be solved by a holistic approach. They try to increase their productivity by continuous rationalization, but in highly engineered production and assembly systems unfortunately this means a huge effort also in terms of money.

In the departments before the production or assembly different computer aided tools (CAx) are used for design, calculation and simulation. They lead to a distinct improvement of the development efficiency but in future there won't be any great leaps forward. In a lot of cases the problem can be seen in the non-existence of continuous system integration to use data division overarching in the whole company. For this reason Product Data Management Systems (PDMS) are more and more used not only in big groups but also in small and medium sized enterprises. PDMS can merge the advantages of specialized software like CAD, FEM, CAQ, CAM and CAP etc. by gathering data files, storing the meta data and administrating them centrally. Due to a central data model there is the possibility to simulate the whole product creation process from the first product idea up to the salable commodity in very early phases on the computer (digital factory). Because of that statements regarding stiffness, manufacturing, assembly, cycle time etc. can be made very early. Furthermore errors can be detected and remedial action can be initiated. Only if all divisions of a company work together a robust and shortened process sequence can be built up.

Within the present thesis a continuous assembly concept is developed, which allows a lasting reduction of the cycle time due to CAD-oriented assembly planning and task execution with cooperating industrial robots. Especially the assembly of small lot sizes causes a higher effort of cell programming due to an increased retooling of the cell, which is very time consuming and fault-prone. But with the proposed solution these sources of error can be avoided due to a reuse of data from earlier stages of the product creation process as well as autonomous path planners for the used robots. To identify the whole time potential the whole sequence "assembly", thus means planning, programming, retooling, teach-in-process and the real assembly process, has to be considered.

The first step of the developed solution is the CAD-oriented assembly planning and the autonomous extraction of all assembly relevant data. This means on the one hand side the generation of chronological assembly sequences and on the second hand side the collection of geometric values like pick- and place-positions as well as used gripper etc. With developed algorithms based on the principle "assembly by disassembly" it is possible to create all feasible sequences to set up the product. This means that searching for collision free paths is done automatically which allows a following

combination for possible assembly orders. The necessary information to fulfill the task with industrial robots like positions for gripping and mounting can be extracted directly from the CAD-model. Further data e. g. used gripper, joining technology etc. can be taken from semantic information which was added once to the parts.

Afterwards it is possible to execute the assembly using industrial robots. To realize further shortening, cooperating robots are used. These are at least two robots, which have a common workspace and can interact on a given job due to the possibility of time and spatial or only one of them synchronized movements. Thus opens new opportunities but at the same time the collision potential rises up because of the manipulators motions and therefore the programming is very difficult, time consuming and fault-prone. To relieve the user, autonomous path planning algorithms, based on the potential field method, are used to calculate in real time collision free trajectories for the robots. By generating the path dynamically, thus means it is composed of short collision free segments, it is possible to adapt the movement to unexpected situations, like the rollback of a joining process. The resulting task execution is very stable and the necessary time for programming can be significantly reduced. In conjunction with a developed sequence control it is possible to implement an autonomous task scheduling for the cooperating robots. Therefore no more manual programming for the flexible assembly cells including several effectors is necessary.

Summarizing it is possible to shorten the whole process sequence “assembly” by using the proposed solution within the thesis. This can be traced back to the CAD-oriented assembly planning as well as the autonomous task execution with cooperating industrial robots. The special feature is that the user is relieved of manually carried out processes during the assembly task planning and the cell programming. Consequently a stable, shortened and fault-tolerant assembly process results.

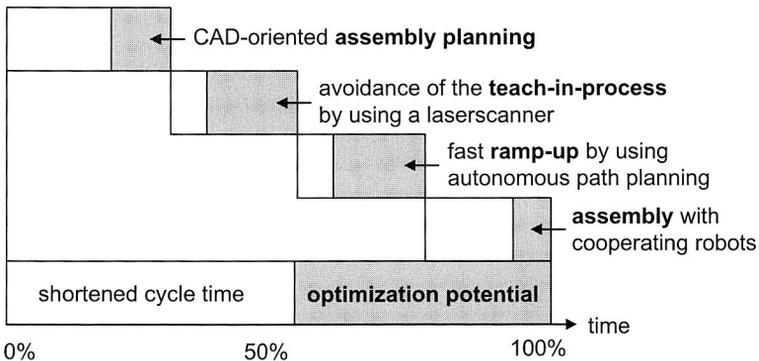


Figure 1: Optimization potential using a continuous assembly concept and autonomous programming for cooperating industrial robots

Literaturverzeichnis

- [1] Angerer, T.: Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten. Hrsg.: Reinhart, G.: Forschungsberichte iw. Herbert Utz, München, 2004
- [2] Arnold, V.; Dettmering, H.; Engel, T.; Karcher, A.: Product Lifecycle Management beherrschen – Ein Anwenderbuch für den Mittelstand. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005
- [3] Behnisch, S.: Digital Mockup mit Catia V5. Carl Hanser, München, Wien, 2003
- [4] Beitz, W.; Grote, K.-H.: Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1997
- [5] Bernardi, M.; Bley, H.; Schmitt, B.; Zenner, C.: Assembly Planning of Mini and Micro Products Enhanced by an Integrated Product and Process Model. In Tagungsband: International Precision Assembly Seminar, Bad Hofgastein, Österreich, 2003, S. 31-38
- [6] Bley, H.; Fritz, J.; Zenner, C.: Die zwei Seiten der Digitalen Fabrik – Softwarewerkzeug und Methode. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 101 (2006) Heft 1-2, S. 19-23
- [7] Börcsök, J.: Netzwerke im industriellen Einsatz. VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 2002
- [8] Bourjault, A.: Contribution a une approche methodologique de l'assemblage automatisé: élaboration automatique des séquences opératoires. Faculté des sciences et des techniques de l'université Franche-Comté, 1984
- [9] Brasch, M.; Schuppstuhl, T.; Kuhlenkötter, B.; Hoffmeier, G.: Cooperating Multi-Robot Systems in Manufacturing Processes. In Tagungsband: 37th International Symposium on Robotics (ISR) and 4th German Conference on Robotics, München, VDI Wissensforum IWB GmbH, 2006, S. 165.1-165.11
- [10] Brecher, C.; Possel-Dölken, F.: Modellierung flexibler Fertigungssysteme. wt Werkstattstechnik online, 95 (2005) Heft 7/8, S. 594-602
- [11] Brunn, A.: XML-Kommunikation – Dokumentation. Reis GmbH&Co Maschinenfabrik, Obernburg, 2004
- [12] Castro, E.: XML für's World Wide Web. Markt+Technik, Haar bei München, 2001
- [13] Chao, T.-H.; Sandersin, A.C.: Intelligent Task Planning Using Fuzzy Petri Nets. Computer Scientists and Engineers. World Scientific Publishing Company, New Jersey, London, Hongkong 1996
- [14] Cormen, T.H.; Leiserson, C.; Rivest, R.L.; Stein, C.: Introduction to Algorithms. MIT Press, 2001
- [15] Cuiper, R.: Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen. Hrsg.: Reinhart, G.: Forschungsberichte iw. Herbert Utz, München, 2000
- [16] DeFazio, T.L.; Whitney, D.E.: Simplified Generation of all Mechanical Assembly Sequences. IEEE Journal of Robotics and Automation, RA-3 (6) 1987, S. 640-658

- [17] Denkena, B.; Wörn, H.; Apitz, R.; Bischoff, R.; Hein, B.; Kowalski, P.; Mages, D.; Schuler, H.: Roboterprogrammierung in der Fertigung – Einfache Roboterprogrammierung für die Produktion von morgen (Ergebnisse des IRoProg Projekts). wt Werkstattstechnik online, 95 (2005) Heft 9, S. 656-660
- [18] Diestel, R.: Graphentheorie. Springer, Heidelberg, 2000
- [19] Diethers, K.; Fireley, T.; Kröger, T.; Thomas, U.: A New Framework for Task Oriented Sensor Based Robot Programming and Verification. In Tagungsband: IEEE International Conference on Advanced Robotics, Coimbra, Portugal, 2003, S. 1208-1214
- [20] Domschke, W.; Scholl, A.; Voß, S.: Produktionsplanung – Ablauforganisatorische Aspekte. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2005
- [21] Eberly, D.H.: 3D Game Engine Design: A Practical Approach to Real-Time Computer Graphics. Morgan Kaufmann, San Francisco, 2001
- [22] Eigner, M.; Stelzer, R.: Produktdatenmanagement-Systeme – Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2001
- [23] Engels, H.: CAN-Bus – CAN-Bus-Technik einfach, anschaulich und praxisnah vorgestellt. Franzis, Poing, 2000
- [24] Eversheim, W.; Schuh, G.: Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005
- [25] Fatikow, S.: Mikroroboter und Mikromontage. Teubner, Stuttgart, Leipzig, 2000
- [26] Fayad, C.; Chitiu, A.; Eastwood, S.; Webb, P.: Control of a Flexible Automatic Riveting System. School of Mechanical, Materials, Manufacturing Engineering and Management, University Nottingham, England, verfügbar unter: <http://www.cs.nott.ac.uk/~cfx/Papers/ARAMpaper.pdf>, Stand: März 2006
- [27] Feldmann, K.: Montageplanung in CIM. Hrsg.: Bey, I.: CIM-Fachmann. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, London, 1992
- [28] Feldmann, K.; Koch, M.; Licha, A.: Hexapoden zur Manipulation flächiger Bauteile. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 97 (2002) Heft 3, S. 97-101
- [29] Feldmann, K.; Licha, A.: Assembly of laminar products using cooperating robots. Annals of the German Academic Society for Production Engineering, X/2 (2003), S. 137-140
- [30] Feldmann, K.; Rückel, V.: Verkürzung von Montageprozessen durch CAD-gestützte Montageplanung und kooperierende Industrieroboter. In Tagungsband: Industriekolloquium des SFB 396 "Robuste, verkürzte Prozessketten für flächige Leichtbauteile", Erlangen, 2006, S. 255-264
- [31] Feldmann, K.; Rückel, V.: Zusammenarbeit führt zum Erfolg – Kooperierende Industrieroboter in der Montage. In Tagungsband: VDI Seminar "Auslegung und Betrieb modularer Montagesysteme", Fürth, VDI Wissensforum, 2004, S. 4.1-4.9
- [32] Friedrich, J.: Performance-Engineering – Geschwindigkeit entscheidet. VDI-Z – Integrierte Produktion, 03 (2006) S. 36-39
- [33] Gairola, A.: Montagegerechtes Konstruieren – Ein Beitrag zur Konstruktionsmethodik. Darmstädter Dissertationen. Universität Darmstadt, Darmstadt, 1981
- [34] Geyer, G.: Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage. Hrsg.: Feldmann, K.; Geiger, M.: Fertigungstechnik – Erlangen. Hanser, München, Wien, 1991

- [35] Goldwasser, M.: An Implementation for Maintaining Arrangements of Polygons. In Tagungsband: 11th Annual ACM Symposium on Computational Geometry, Vancouver, Canada, 1995, S. C32-C33
- [36] Grabowski, H.; Lossack, R.; Weißkopf, J.: Datenmanagement in der Produktentwicklung. Carl Hanser, München, Wien, 2002
- [37] Gruhler, G.: Feldbusse und Gerätekommunikationssysteme. Franzis, Poing, 2001
- [38] Guldner, J.; Stelter, J.; Verl, A.: Kraft-/Momentenregelung für Industrieroboter zur Durchführung komplexer Montageapplikationen. wt Werkstattstechnik online, 93 (2003) Heft 9, S. 632-635
- [39] Günther, H.-O.; Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2005
- [40] Halperin, D.; Latombe, J.-C.; Wilson, R.: A general Framework for Assembly Planning: The Motion Space Approach. In Tagungsband: Symposium on Computational Geometry, 1998, S. 9-18
- [41] Hanning, T.; Graf, S.; Pisinger, G.: Extrinsic Calibration of a Stereo Camera System Fulfilling Generalized Epipolar Constraints. In Tagungsband: Visualization, Imaging and Image Processing – VIIP, Marbella, Spanien, 2004, S. 1-5
- [42] Heigenhauser, B.; Schäpers, H.G.; Rode, H.: Grundlagen der Arbeits- und Zeitwirtschaft auf der Grundlage der Methoden nach AWF, MTM und Refa. Cornelsen, Berlin, 1994
- [43] Hein, B.; Wörn, H.: Fast Hierarchical A* Path Planning for Industrial Robots Based on Efficient Use of Distance Computations. In Tagungsband: 37th International Symposium on Robotics (ISR) and 4th German Conference on Robotics, München, VDI Wissensforum IWB GmbH, 2006, S. 51.1-51.17
- [44] Heinemann, P.; Becker, H.; Zell, A.: Improved Path Planning in Highly Dynamic Environments Based on Time Variant Potential Fields. In Tagungsband: 37th International Symposium on Robotics (ISR) and 4th German Conference on Robotics, München, VDI Wissensforum IWB GmbH, 2006, S. 177.1-177.11
- [45] Heinz, K.; Olbrich, R.: Planzeitermittlung. Hanser, München, Wien, 1994
- [46] Helms, E.; Dünne, M.; Hans, M.; Hägele, M.; Wandosell, J.H.: Rob@work: Assistenzsysteme als Helfer in der Produktion. In Tagungsband: Robotik 2002 – Leistungsstand, Anwendungen, Visionen, Trends, Ludwigsburg, VDI-Verlag, 2002, S. 661-667
- [47] Helms, E.; Meyer, C.: Assistor – Mensch und Roboter rücken zusammen: Einsatz von sicheren und einfach bedienbaren Assistenzrobotern im Produktionsalltag. wt Werkstattstechnik online, 95 (2005) Heft 9, S. 677-683
- [48] Hesse, S.: Industrieroboterpraxis – Automatisierte Handhabung in der Fertigung. Vieweg & Sohn, Braunschweig, Wiesbaden, 1998
- [49] Holle, W.: Rechnerunterstützte Montageplanung – Montageplanung und Simultaneous Engineering. Carl-Hanser, München, Wien, 2002
- [50] Husty, M.; Karger, A.; Sachs, H.; Steinhilper, W.: Kinematik und Robotik. Springer, Berlin, Heidelberg, 1997
- [51] Ichbiah, D.: Roboter – Geschichte – Technik – Entwicklung. Knesebeck, München, 2005
- [52] Kaminsky, C.: Digitale Fabrik im Werkzeugbau. VDI-Z – Integrierte Produktion, 147 (2005) S. 42-45

- [53] Kibira, D.; McLean, C.: Virtual Reality Simulation of a Mechanical Assembly Production Line. In Tagungsband: Winter Simulation Conference, 2002, S. 1130-1137
- [54] King, H.H.: Product Lifecycle Management: A Unique Perspective on Innovation, Productivity & Digital Manufacturing. In Tagungsband: International PACE Forum Digital Manufacturing, TU Darmstadt, 2005, S. 1
- [55] Kippels, D.: Automatisierung nach Maß stärkt profitable Montage. VDI-Nachrichten vom 09. September, 36 (2005) S. 14
- [56] Koch, A.; Rückel, V.: Potential von Prozessinformationen für frühe Phasen im Produktentstehungsprozess. In Tagungsband: Design for X, Neukirchen, 2003, S. 117-128
- [57] Koch, A.; Rückel, V.; Hauck, C.; Ernst, R.: Verkürzung der Prozesskette "Konstruktion – Qualitätsmanagement – Montage" durch Rückkopplung von Prozesswissen. In Tagungsband: Industriekolloquium des SFB 396 "Robuste, verkürzte Prozessketten für flächige Leichtbauteile", Erlangen, Meisenbach, 2003, S. 103-129
- [58] Kopp, S.; Jung, B.; Leßmann, N.; Wachsmuth, I.: Max – A Multimodal Assistant in Virtual Reality Construction. Künstliche Intelligenz, 04 (2003) S. 11-17
- [59] Kreuzer, E.J.; Lugtenburg, J.-B.; Meißner, H.-G.; Truckenbrodt, A.: Industrieroboter - Technik, Berechnung und anwendungsorientierte Auslegung. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, London, 1994
- [60] Kriesel, W.; Heibold, T.; Teschow, D.: Bustechnologien für die Automation – Vernetzung, Auswahl und Anwendung von Kommunikationssystemen. Hütig, Heidelberg, 2000
- [61] Kroh, R.: Kooperierende Roboter – Teams mit Zukunft. MaschinenMarkt vom 24. Februar, 03 (2006) S. 3
- [62] Kugelman, D.: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern. Herbert Utz, München, 1999
- [63] Kurth, J.: Flexible Produktionssysteme durch kooperierende Roboter. wt Werkstattstechnik, 95 (2005) Heft 3, S. 81-84
- [64] Kurth, J.: Kooperierende Roboter eröffnen neue Anwendungen in der Produktion. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 99 (2004) Heft 7-8, S. 385-389
- [65] Lange, E.: Die Digitale Fabrik winkt mit handfestem Profit. VDI-Nachrichten – Sonderteil: Hannover Messe 2006 vom 07. April, 14 (2006) S. 23
- [66] Lanza, G.; Herm, U.; Ude, J.: Anlaufleistung in Wertschöpfungsnetzwerken. wt Werkstattstechnik online, 96 (2006) Heft 4, S. 233-238
- [67] Latombe, J.C.: Robot Motion Planning. Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London, 2004
- [68] LaValle, S.: Planning Algorithms. Cambridge University Press, Cambridge, England, 2006
- [69] Lawrenz, W.: CAN – Controller Area Network – Grundlagen und Praxis. Hütig, Heidelberg, 2000
- [70] Licha, A.: Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter. Hrsg.: Feldmann, K.; Geiger, M.: Fertigungstechnik – Erlangen. Meisenbach, Bamberg, 2003
- [71] Lindemann, U.: Marktchance Individualisierung: Marktnahe Produktion individualisierter Produkte – Industriekolloquium des SFB 582. Utz, München, 2004

- [72] Malorny, C.; Wunram, J.; Kassner, S.; Altzberger, A.: Automobil – Auf dem Weg zu einer neuen Rollenverteilung. McKinsey&Company – Digital Transformation, 2006
- [73] Marczinski, G.: Digitale Fabrik - aus der Nutzenperspektive zur wirksamen Planungsunterstützung. In Tagungsband: Fachtagung Digitale Fabrik, Ludwigsburg, 2005, S. 21.1-21.27
- [74] Marian, R.M.: Optimisation of Assembly Sequences Using Genetic Algorithms. University of South Australia, Adelaide, Australien, 2003
- [75] Mau, G.: Virtuelle Werkzeuge – Optimierungsprozesse für die Digitale Fabrik. handling, 2006, Heft 03, S. 26
- [76] May, W.; Elter, H.: Externes Verfahren – Dokumentation. Reis GmbH&Co Maschinenfabrik, Oberburg, 2004
- [77] Mesihovic, S.; Malmqvist, J.; Pikosz, P.: Product Data Management system-based Support for Engineering Project Management. Journal of Engineering Design, 15 (4) 2004, S. 389-403
- [78] Miata, N.; Ota, J.; Arai, T.; Asama, H.: Cooperative Transport by Multiple Mobile Robots in Unknown Static Environments Associated with Real-time Task-Assignment. In Tagungsband: IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, S. 769-780
- [79] Münch, H.: Effizienter industrieller Einsatz bahnsynchron kooperierender Industrieroboter. Hochschule Magdeburg, verfügbar unter: http://www.maschinenbau.hs-magdeburg.de/personal/bargfrede/fue/cooprob/paper_cooprob.pdf, Stand: März 2006
- [80] N.N.: Bedienhandbuch KR C2 – Release 4.1. Kuka Roboter GmbH, Augsburg, 2004
- [81] N.N.: The Benefits of Digital Manufacturing. 2003, CIMdata, Inc. verfügbar unter: www.delmia.de
- [82] N.N.: Die "Digitale Fabrik" lässt Schwachstellen in der Produktion keine Chance. VDI-Nachrichten – Sonderteil: Fabrik der Zukunft vom 02. September, 35 (2005) S. 26
- [83] N.N.: DualARM System. Fanuc Robotics, verfügbar unter: http://www.fanucrobotics.com/file_repository/fanucmain/dualarm%2System.pdf, Stand: April 2006
- [84] N.N.: Firmenschrift der Cognex Germany, Inc. verfügbar unter: www.cognex.de, Stand: April 2006
- [85] N.N.: Firmenschrift der Firma Delmia – Process Engineer. April 2006
- [86] N.N.: Firmenschrift der Firma Delmia V5 – Robotics. verfügbar unter: http://www.delmia.com/gallery/pdf/DELMA_V5Robotics.pdf, Stand: April 2006
- [87] N.N.: Firmenschrift der Firma Motoman. verfügbar unter: www.motoman.de/de/produkte/steuerung/xrc/index.html, Stand: April 2006
- [88] N.N.: Firmenschrift der Stiefelmayer-Contento GmbH&Co KG. verfügbar unter: www.stiefelmayer-contento.de, Stand: April 2006
- [89] N.N.: Firmenschrift von UGS. verfügbar unter: <http://www.ugspm.de/produkte/tecnomatix/>, Stand: April 2006
- [90] N.N.: Fünf Fragen an... Rolf Peters. Factory Automation – Sonderheft: Messe-Highlights in Hannover, 2005, S. 66

- [91] N.N.: Hand in Hand. MaschinenMarkt vom 24. Februar, 03 (2006) S. 90-92
- [92] N.N.: IT-Sicherheit im Produktionsumfeld. GmbH, K.R.: Braunschweig, 2004
- [93] N.N.: Konzepte für die Wettbewerbsfähigkeit. VDI-Nachrichten – Sonderteil: Fabrik der Zukunft vom 02. September, 35 (2005) S. 28
- [94] N.N.: KR 3 SI (Safe Interaction) – vierfaches Sicherheitssystem. verfügbar unter: http://www.kuka.com/NR/rdonlyres/CF1E1C64-21B3-4F78-BE90-BE48C7FABD0C/0/PR_Flyer_KR3_SI_de.pdf, Stand: April 2006
- [95] N.N.: Mehr Flexibilität in der Automation mit Mehrroboter-Systemen. Messe-Pressinformation der Messe München GmbH, 03 (04) 2005, S. 1
- [96] N.N.: Pressemitteilung vom 14.03.2006: BMBF stärkt Forschung für die Produktion. verfügbar unter: <http://www.bmbf.de/press/1753.php&QUERY=papas>, Stand: Mai 2006
- [97] N.N.: RTCI – Benutzerhandbuch – Version 1.1.3. KUKA Roboter GmbH, Augsburg, 2004
- [98] N.N.: Schulungsunterlagen für V+ Niveau 1. Stäubli, Faverges, Frankreich, 2000
- [99] N.N.: VDI 2860 – Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. 1990
- [100] N.N.: World Robotics 2005: Statistics, Market Analysis, Forecast, Case Studies and Profitability of Robot Investment. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) und International Federation of Robotics (IFR), Genf, Schweiz, 2005
- [101] Obermann, K.: CAD/CAM/PLM-Handbuch. Carl Hanser, München, Wien, 2003
- [102] Pardi, W.J.: XML in Action. Microsoft Press Deutschland, 2000
- [103] Pfeiffer, K.: Probes for Security and Surveillance Robots. In Tagungsband: SSRR – Safety, Security and Rescue Robotics 2004, Bonn, IEEE, 2004, S. 5.1-5.12
- [104] Reinertsen, D.: Die neuen Werkzeuge der Produktentwicklung. Carl Hanser, München, Wien, 1998
- [105] Reinhart, G.: Wirtschaftliche Montage – Herausforderung für den Mittelstand. 'wt Werkstattstechnik online, 93 (2003) Heft 9, S. 570
- [106] Reinhart, G.; Feldmann, C.: Werkzeuge für die Montageplanung. In: Sonderforschungsbereich 336 - Montageautomatisierung durch Integration von Konstruktion und Planung - Kolloquium. Hrsg.: Bender, K.; Ehrlenspiel, K.; Heinzl, J.; Milberg, J.; Pfeiffer, F.; Reichwald, R.; Reinhart, G., TU München, München, 1995, S. 4.1-4.8
- [107] Reinhart, G.; Zäh, M.F.: Marktchance Individualisierung. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2003
- [108] Reinhart, G.; Zäh, M.F.; Angerer, T.: Increase of Efficiency in Automated Assembly by Active Use of Mechatronic Product Components. Annals of the German Academic Society for Production Engineering, XI/1 (2004), S. 165-170
- [109] Reißweber, B.: Feldbussysteme zur industriellen Kommunikation. Oldenburger Industrieverlag, München, 2002
- [110] Risse, J.: Time-to-Market-Management in der Automobilproduktion – Ein Gestaltungsrahmen für ein logistikorientiertes Anlaufmanagement. Technische Universität Berlin, Berlin, 2002

- [111] Rivera, L.; Estrella, V.; Carvalho, P.: Oriented Bounding Boxes Using Multiresolution Contours for fast Interference Detection of Arbitrary Geometry Objects. In Tagungsband: WSCG – Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, Bory – Pízen, Tschechische Republik, Union Agency – Science Press, 2004, S. 219-226
- [112] Romney, B.: Atlas: an Automatic Assembly Sequencing and Fixturing System. In Tagungsband: International Conference on the Theory and Practice of Geometric Modelling, Tübingen, 1996, S. 55-61
- [113] Rückel, V.: Montage mit kooperierenden Industrierobotern. In Tagungsband: VDI- Wissensforum "Auslegung und Betrieb modularer Montagesysteme", Fürth, VDI-Verlag, 2003, S. 4.1-4.10
- [114] Rückel, V.; Feldmann, K.: Computer-aided Assembly Planning and Autonomous Task Execution with Cooperating Industrial Robots. In Tagungsband: 37th International Symposium on Robotics (ISR) and 4th German Conference on Robotics, München, VDI Wissensforum IWB GmbH, 2006, S. 229.1-229.6
- [115] Rückel, V.; Feldmann, K.: Komplettmontage mit kooperierenden Robotern. wt Werkstattstechnik online, 95 (2005) 2005, S. 85-90
- [116] Rückel, V.; Feldmann, K.: Kooperierende Industrieroboter mit ethernetbasierter Echtzeitkommunikation. In: SPS/IPC/DRIVES. Hrsg.: Bender, K.; Brandenburg, G.; Schraft, R.D., Franzis, Poing, 2005, S. 507-513
- [117] Rückel, V.; Feldmann, K.: Zusammenarbeit führt zum Erfolg – CAD-gestützte Komplettmontage mit kooperierenden Industrierobotern. In Tagungsband: Flexible Automation, Stuttgart, IIR Deutschland, 2004, S. 6.1-6.7
- [118] Rückel, V.; Koch, A.; Feldmann, K.; Meerkamm, H.: Process Data Management for the Shortening of the whole Product Creation Process. In: Computer Supported Cooperative Work in Design II – 9th International Conference – Revised Selected Papers. Hrsg.: Shen, W.; Chao, K.-M.; Lin, Z.; Barthès, J.-P.; James, A., Springer, Berlin, Heidelberg, 2006, S. 616-625
- [119] Rückel, V.; Koch, A.; Feldmann, K.; Meerkamm, H.: Process Data Management in the whole Product Creation Process. In Tagungsband: IEEE Computer Supported Cooperative Work in Design, Coventry, England, School of Mathematical and Information Sciences, Coventry University, 2005, S. 1029-1033
- [120] Rückel, V.; Koch, A.; Feldmann, K.; Meerkamm, H.: Prozessdatenmanagement – der Schlüssel zum Erfolg. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 99 (2004) 10, S. 582-586
- [121] Rückel, V.; Wittmann, S.; Feldmann, K.; Meerkamm, H.: Shortening of the Product Creation Process by using PDM-System and CAD-oriented Assembly Planning. In Tagungsband: International PACE Forum Digital Manufacturing, TU Darmstadt, 2005, S. 10.1-10.4
- [122] Rühl, M.; Roth, H.: Path Planning and Visualisation in High Dimensional Configuration Space. In Tagungsband: 37th International Symposium on Robotics (ISR) and 4th German Conference on Robotics, München, VDI Wissensforum IWB GmbH, 2006, S. 53.1-53.14
- [123] Russel, S.; Norvig, P.: Artificial Intelligence: A Modern Approach. Prentice Hall, 2002
- [124] Saaksvuori, A.; Immonen, A.: Product Lifecycle Management. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005

- [125] Sauer, O.: Neue VDI-Arbeitsgruppe Digitaler Fabrikbetrieb. VDI-Z – Integrierte Produktion, 05 (2005), S. 42
- [126] Schäfer, G.: Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung. Hrsg.: Feldmann, K.; Geiger, M.: Fertigungstechnik – Erlangen. Hanser, München, Wien, 1992
- [127] Scharf, A.: Software verbindet Planung und Produktion. Factory Automation – Sonderheft: Messe-Highlights in Hannover, 2004, S. 56-57
- [128] Scherff, B.; Haese, E.; Wenzek, H.R.: Feldbussysteme in der Praxis – Ein Leit-faden für den Anwender. Springer, Berlin, Heidelberg, 1999
- [129] Schichtel, M.: Produktdatenmodellierung in der Praxis. Carl Hanser, München, Wien, 2002
- [130] Schiessle, E.; Reichert, M.; Ruf, W.-D.; Vogt, A.: Mechatronik 2. Vogel Industrie Medien GmbH & Co. KG, Würzburg, 2002
- [131] Schnell, G.: Bussysteme in der Automatisierungs- und Prozesstechnik. Vieweg & Sohn, Braunschweig, Wiesbaden, 2000
- [132] Schönherr, U.: Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungs-zellen mit kooperierenden Robotern. Hrsg.: Feldmann, K.; Geiger, M.: Fertigungstechnik – Erlangen. Meisenbach, Bamberg, 1996
- [133] Schöttner, J.: Produktdatenmanagement in der Fertigungsindustrie: Prinzip – Konzepte – Strategien. Hanser, München, Wien, 1999
- [134] Schraft, R.D.; Meyer, C.: Assistenzroboter in der Produktion. Industrie Manage-ment, 22 (2006) Heft 2, S. 17-20
- [135] Schrijver, A.: Combinatorial Optimization. Springer, Heidelberg, 2003
- [136] Schröder, T.: Vom Kraftprotz zum Kollegen. Financial Times Deutschland, 23. Februar (2006), S. 46
- [137] Schuh, G.; Schwenk, U.: Produktkomplexität managen – Strategien, Methoden, Tools. Hanser Fachbuch, München, Wien, 2005
- [138] Schulé, M.: Selbstorganisierte Aufgabenzuordnung für kooperierende mobile Roboter. Logos, Berlin, 2005
- [139] Schweikard, A.: Vorlesungsskript Robotik. verfügbar unter: <http://www.rob.uni-luebeck.de/~binder/robotik/>, Stand: März 2006
- [140] Sender, U.; Warwer, V.: CAD und PDM: Prozessoptimierung durch Integration. Carl Hanser, München, Wien, 2005
- [141] Spur, G.: Automation als technische Herausforderung. In: Marktchance Individualisierung. Hrsg.: Reinhart, G.; Zäh, M.F., Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2003, S. 205-213
- [142] Stark, J.: Product Lifecycle Management – 21st Century Paradigm for Product Realisation. Springer, London, 2005
- [143] Steffan, R.; Kuhlen, T.: Maestro – A Tool for Interactive Assembly Simulation in Virtual Environments. In: Immersive projection technology and virtual environments. Hrsg.: Fröhlich, B.; Deisinger, J.; Bullinger, H.-J., Springer, Wien, New York, 2001, S. 141-152
- [144] Steinbuch, R.: Simulation im konstruktiven Maschinenbau. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2004

- [145] Sung, W.-T.; Ou, S.-C.: Using Virtual Reality Technologies for Manufacturing Applications. *International journal of computer applications in technology (IJCAT)*, 17 (4) 2003, S. 213-219
- [146] Sutanto, A.: *Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments*. Hrsg.: Feldmann, K.; Geiger, M.: *Fertigungstechnik – Erlangen*. Meisenbach, Bamberg, 2005
- [147] Tarn, T.-J.; Chen, S.-B.; Zhou, C.: *Robotic Welding, Intelligence and Automation*. Springer, Berlin, 2004
- [148] Thomas, U.; Barrenscheen, M.; Wahl, F.: Efficient Sequence Planning Using Stereographical Projections of C-Space Obstacles. In *Tagungsband: 5th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, Besancon, Frankreich, 2003*, S. 96-102
- [149] Thomas, U.; Movshyn, A.; Wahl, F.: Autonomous Execution of Automatically Planned Robot Tasks Based on Force Torque Maps. In *Tagungsband: 37th International Symposium on Robotics (ISR) and 4th German Conference on Robotics, München, VDI Wissensforum IWB GmbH, 2006*, S. 121.1-121.14
- [150] Valle, C.; Gasca, R.M.; Toro, M.; Camacho, E.F.: A Genetic Algorithm for Assembly Sequence Planning. In: *IWANN 2003*. Hrsg.: Mira, J., Springer, Berlin, Heidelberg, 2003, S. 337-344
- [151] Wahl, F.M.; Thomas, U.: Robot Programming – From simple Moves to Complex Robot Tasks. In *Tagungsband: First International Colloquium "Collaborative Research Centre 562 – Robotic Systems for Modelling and Assembly"*, Braunschweig, 2002, S. 245-259
- [152] Weber, P.: Digital Mock-up im Maschinenbau. Hrsg.: Eversheim, W.; Klocke, F.; Pfeifer, T.; Schuh, G.; Weck, M.: *Berichte aus der Produktionstechnik*. Shaker, Aachen, 2003
- [153] Weber, W.: *Industrieroboter – Methoden der Steuerung und Regelung*. Carl Hanser, München, Wien, 2002
- [154] Wenk, M.: Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern. Hrsg.: Feldmann, K.; Geiger, M.: *Fertigungstechnik – Erlangen*. Meisenbach, Bamberg, 2002
- [155] Westkämper, E.: Assembly and Disassembly Processes in Product Life Cycle Perspectives. *Annals of the CIRP*, 52 (2) 2003, S. 579-588
- [156] Westkämper, E.; Runde, C.: Anwendung von Virtual Reality in der Digitalen Fabrik – eine Übersicht. *wt Werkstattstechnik online*, 96 (2006) Heft 3, S. 99-103
- [157] Westkämper, E.; Schreiber, S.: Verbesserte Ressourcenausnutzung in der Montage. *wt Werkstattstechnik online*, 96 (2006) Heft 3, S. 115-121
- [158] Wirth, S.: Unterstützung für Unternehmen durch die neue Arbeitsgruppe "Digitaler Fabrikbetrieb" der VDI-FML. *Presseinformation des Fraunhofer-Instituts Informations- und Datenverarbeitung*, 04 (2005)
- [159] Wörn, H.; Mages, D.; Hein, B.; Denkena, B.; Apitz, R.: Combining Manual Haptic Path Planning of Industrial Robots with Automatic Path Smoothing. In *Tagungsband: International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINO), Barcelona, Spanien, 2005*, S. 387-390

- [160] Yin, Z.-P.; Ding, H.; Xiong, Y.-L.: A Virtual Prototyping Approach to Generation and Evaluation of Mechanical Assembly Sequences. In Tagungsband: Proceedings of the I MECH E Part B Journal of Engineering Manufacture, 2004, S. 87-102
- [161] Zäh, M.F.; Egermeier, H.; Eursch, A.; Petzold, B.: Effiziente Interaktion mit virtuellen Prototypen - Interaktion durch haptische Eingabegeräte verbessern. wt Werkstattstechnik online, 93 (2003) Heft 9, S. 619-623
- [162] Zäh, M.F.; Patron, C.; Fusch, T.: Die Digitale Fabrik – Definition und Handlungsfelder. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 98 (2003) Heft 3, S. 75-77
- [163] Zankl, A.: Milestones in Automation – From the Transistor to the Digital Factory. Publicis, Erlangen, 2006
- [164] Zechmann, B.: Digital Mock Up – Clash and Clearance in der Gesamtfahrzeugentwicklung. verfügbar unter: http://www.zechmann.de/pub/000510_Zechmann_Innovationsforum_Berlin_paper.pdf, Stand: April 2006
- [165] Zeller, P.: Virtual Planning Tools Supporting Manufacturing System Design. In Tagungsband: Proceedings of the 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Saarbrücken, Universität des Saarlandes, 2003, S. 5-6

Anhang

A Potentialfeldmethode in Vektorschreibweise

Berechnung des anziehenden und abstoßenden Potentials in ausführlicher Vektorschreibweise in Analogie zu Kapitel 5.1.3, wobei als anziehendes Potential sowohl eine quadratische als auch eine konische Quellfunktion verwendet werden. Dabei beschreibt $\rho(p)$ den euklidischen Abstand zwischen dem Zielpunkt sowie der aktuellen Ist-Position

$$\rho(p) = \|p_{\text{Ziel}} - p\| = \sqrt{(x_{\text{Ziel}} - x)^2 + (y_{\text{Ziel}} - y)^2 + (z_{\text{Ziel}} - z)^2} \quad (35)$$

Anziehendes Potential

$$U_{\text{an,quad}}(p) = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot \rho(p)^2 \quad (36)$$

$$\begin{aligned} F_{\text{an,quad}}(p) &= -\nabla U_{\text{an,quad}}(p) = -\frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot 2 \cdot \rho(p) \cdot \nabla \rho(p) = \\ &= -\varepsilon \cdot \rho(p) \cdot \begin{pmatrix} -\frac{1}{2 \cdot \rho(p)} \cdot 2 \cdot (x_{\text{Ziel}} - x) \\ -\frac{1}{2 \cdot \rho(p)} \cdot 2 \cdot (y_{\text{Ziel}} - y) \\ -\frac{1}{2 \cdot \rho(p)} \cdot 2 \cdot (z_{\text{Ziel}} - z) \end{pmatrix} = \varepsilon \cdot \begin{pmatrix} x_{\text{Ziel}} - x \\ y_{\text{Ziel}} - y \\ z_{\text{Ziel}} - z \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (37)$$

oder

$$U_{\text{an,kon}}(p) = \varepsilon \cdot \rho(p) \quad (38)$$

$$\begin{aligned} F_{\text{an,kon}}(p) &= -\nabla U_{\text{an,kon}}(p) = -\varepsilon \cdot \nabla \rho(p) = \\ &= -\varepsilon \cdot \begin{pmatrix} -\frac{1}{2 \cdot \rho(p)} \cdot 2 \cdot (x_{\text{Ziel}} - x) \\ -\frac{1}{2 \cdot \rho(p)} \cdot 2 \cdot (y_{\text{Ziel}} - y) \\ -\frac{1}{2 \cdot \rho(p)} \cdot 2 \cdot (z_{\text{Ziel}} - z) \end{pmatrix} = \frac{\varepsilon}{\rho(p)} \cdot \begin{pmatrix} x_{\text{Ziel}} - x \\ y_{\text{Ziel}} - y \\ z_{\text{Ziel}} - z \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (39)$$

Abstoßendes Potential

Für den Fall, dass der Einflussradius ρ_0 überschritten wird, so ist das abstoßende Potential bzw. Kraft gleich 0. Sollte er allerdings unterschritten werden, so gilt:

$$\begin{aligned}
 U_{ab,i}(p) &= \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot \left(\frac{1}{\rho_{Hind,i}(p)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 = \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{(x_{Hind,i} - x)^2 + (y_{Hind,i} - y)^2 + (z_{Hind,i} - z)^2}} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2
 \end{aligned} \tag{40}$$

$$\begin{aligned}
 F_{ab,i}(p) &= -\nabla U_{ab,i}(p) = -\frac{1}{2} \cdot \eta \cdot 2 \cdot \left(\frac{1}{\rho_{Hind,i}(p)} - \frac{1}{\rho_0} \right) \cdot \left(-\frac{1}{\rho_{Hind,i}(p)^2} \right) \cdot \nabla \rho_{Hind,i}(p) = \\
 &= \eta \cdot \left(\frac{1}{\rho_{Hind,i}(p)} - \frac{1}{\rho_0} \right) \cdot \left(\frac{1}{\rho_{Hind,i}(p)^2} \right) \cdot \begin{pmatrix} -\frac{1}{2 \cdot \rho_{Hind,i}(p)} \cdot 2 \cdot (x_{Hind,i} - x) \\ -\frac{1}{2 \cdot \rho_{Hind,i}(p)} \cdot 2 \cdot (y_{Hind,i} - y) \\ -\frac{1}{2 \cdot \rho_{Hind,i}(p)} \cdot 2 \cdot (z_{Hind,i} - z) \end{pmatrix} = \\
 &= -\eta \cdot \left(\frac{1}{\rho_{Hind,i}(p)} - \frac{1}{\rho_0} \right) \cdot \left(\frac{1}{\rho_{Hind,i}(p)^3} \right) \cdot \begin{pmatrix} (x_{Hind,i} - x) \\ (y_{Hind,i} - y) \\ (z_{Hind,i} - z) \end{pmatrix} = \\
 &= \frac{-1}{\text{Abstand}} \cdot \frac{1}{\|H_i - p\|} \cdot \begin{pmatrix} x_{Hind,i} - x \\ y_{Hind,i} - y \\ z_{Hind,i} - z \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{41}$$

B Kommunikationsprotokoll der Robotersteuerungen

Für die Realisierung des in der vorliegenden Arbeit entwickelten Steuerungskonzepts ist ein intensiver Datenaustausch zwischen den einzelnen Steuerungen sowie dem Leitrechner erforderlich. Hierzu werden lediglich vom Hersteller angebotene Standard-schnittstellen verwendet, um eine Portierung des Lösungsansatzes auf andere Systeme ohne große Adaptionen zu gewährleisten. Bei der Kuka-Robotersteuerung wird die RTCI (Real Time Communication Interface) Schnittstelle für den Austausch der aktuellen Ist-Position sowie der Vorgabe der neuen Zielposition verwendet. Bei den Reis-Robotern geschieht dies durch XML-Kommandos.

B.1 RTCI-Schnittstelle für die Kuka-Roboter

Mit Hilfe des Real Time Communication Interfaces ist ein Datenaustausch in Echtzeit zwischen dem Leitrechner und den Controllern möglich. Dabei wird die in C vordefinierte Datenstruktur verwendet. Die aktuelle Istposition wird sowohl in kartesischen als auch in winkelspezifischen Größen in der Struktur `rob_daten` übermittelt, die wie folgt aufgebaut ist:

```

Struct rob_data
{
float pos_ist[6];           Ist-Position
float pos_soll[6];        Soll-Position
float axis_ist[12];       Robotergelenkwinkel
float tech_par[18];       technologische Parameter
unsigned char dig_out;    digitale Ausgänge
...
}

```

Die Übermittlung einer Zielposition geschieht durch die Vorgabe von Korrekturwerten bzw. -winkeln mit Hilfe der Struktur `ext_data`, die wie folgt aufgebaut ist:

```

Struct ext_data
{
char message[80];         Meldung
float pos_corr[6];       kartesische Korrekturen
float axis_corr[12];     achsspezifische Korrekturen
float tech_par[18];     technologische Parameter
unsigned char dig_out;   digitale Ausgänge
unsigned char flag_message;  Meldungs-Flag
unsigned char flag_break;  End-Flag
}

```

B.2 XML-Kommandos für die Reis-Roboter

Für die Kommunikation mit den Controllern der Firma Reis sowie dem Leitrechner muss das so genannte externe Verfahren aktiviert werden. Hierfür dient die Systemvariable `_IEXTMODE`, deren Werte unterschiedliche Verfahrenarten des Roboters ermöglichen

Tabelle 6: Mögliche Zustände der Systemvariablen `_IEXTMODE`

Bit	Bedeutung
0	0: Verfahren PTP – 1: Verfahren CP_LIN
1	0: ohne Überschleifen – 1: mit Überschleifen
2	0: Ringspeicher ist aufnahmebereit – 1: Ringspeicher ist voll
3	0: Mit Ringspeicher – 1: Direktes Verfahren (ohne Ringspeicher)
4	0: Führungsgröße ist der Weg – 1: Führungsgröße ist der Winkel

Abfrage von Istpositionen

Standardmäßig wird die aktuelle Ist-Position des Roboters im Base-Koordinatensystem über den Befehl

```
<CMD><getVar><ClientStamp>faps</ClientStamp>
<name>_PACTISTPOS</name><Position/></getVar></CMD>
```

abgefragt. Soll allerdings ein benutzerdefiniertes Koordinatensystem verwendet werden, so muss zunächst auf Seiten der Robotersteuerung die aktuelle Position in einem Array sowie der Angabe des Koordinatensystems zwischengespeichert werden.

```
MPR „Extern“
LOK_VAR Name:Ppos
WERKZEUG Variable:T
EXTERN_FAHREN #EIN
IST_POS Variable:Ppos,#N,Frame:1
KOPIERE Quelle:Ppos,Ziel_Var:_PUSER[1]
END
```

Das Auslesen erfolgt sodann mittels des XML-Befehls

```
<CMD><getVar><ClientStamp>faps</ClientStamp><name>_PUSER</name>
<Position><array><index>0</index></array></Position></getVar>
</CMD>
```

Vorgabe von Sollpositionen

Sollpositionen werden durch Überschreiben der Systemvariablen `_PEXTPOS` vorgegeben.

```
<CMD><setVar><ClientStamp>faps</ClientStamp>
<name>_PEXTPOS</name><Position><element><index>0</index>
<PositionValue>
<IntValue>Anzahl der Hauptachsen</IntValue>
<IntValue>Anzahl der Nebenachsen</IntValue>
<IntValue>Positionstyp</IntValue>
<IntValue>Framennummer</IntValue>
<RealValue>TCP-X</RealValue>
<RealValue>TCP-Y</RealValue>
<RealValue>TCP-Z</RealValue>
<RealValue>Tool-Frame z-Richtung x-Koordinate</RealValue>
<RealValue>Tool-Frame z-Richtung y-Koordinate</RealValue>
<RealValue>Tool-Frame z-Richtung z-Koordinate</RealValue>
<RealValue>Tool-Frame x-Richtung x-Koordinate</RealValue>
<RealValue>Tool-Frame x-Richtung y-Koordinate</RealValue>
<RealValue>Tool-Frame x-Richtung z-Koordinate</RealValue>
```

```

<IntValue>Achsinkrement Hauptachse 1</IntValue>
<IntValue>Achsinkrement Hauptachse 2</IntValue>
<IntValue>Achsinkrement Hauptachse 3</IntValue>
<IntValue>Achsinkrement Hauptachse 4</IntValue>
</PositionValue></element></Position></setVar></CMD>

```

Festlegen von Bahngeschwindigkeit und Bahnbeschleunigung

Die Bahngeschwindigkeit wird durch den Wert der Systemvariablen `_RVEL_CART_EXT` vorgegeben, der mit dem Wert 125,0 mm/s standardmäßig vorbelegt ist. Die Systemvariable kann durch die folgende XML-Abfrage verändert werden:

```

<CMD><setVar><ClientStamp>faps</ClientStamp>
<name>_RVEL_CART_EXT</name><Real><element><index>0</index>
<RealValue>Float-Wert</RealValue></element></Real>
</setVar></CMD>

```

Das Setzen der Bahnbeschleunigung über die Systemvariable `_RACC_CART_EXT`, die mit 100% vorbelegt ist, erfolgt analog.

Setzen von binären Ein- und Ausgängen

Für die Steuerung des I/O-Verhaltens stehen jeweils 40 Bytes zu Verfügung, die in den Integerarrays `_IBIN_IN[10]` und `_IBIN_OUT[10]` zusammengefasst sind. Jedes Bit repräsentiert dabei einen möglichen Ein- oder Ausgang. Tabelle 7 zeigt den Aufbau von `_IBIN_IN[10]`, wobei `_IBIN_OUT[10]` analog dazu aufgebaut ist.

Tabelle 7: Aufbau `_IBIN_IN[10]`

Variable	Byte-Nr.	Byte-Nr.	Byte-Nr.	Byte-Nr.
<code>_IBIN_IN[1]</code>	3 76543210	2 76543210	1 76543210	0 76543210
<code>_IBIN_IN[2]</code>	7	6	5	4
<code>_IBIN_IN[3]</code>	11	10	9	8
<code>_IBIN_IN[4]</code>	15	14	13	12
<code>_IBIN_IN[5]</code>	19	18	17	16
<code>_IBIN_IN[6]</code>	23	22	21	20
<code>_IBIN_IN[7]</code>	27	26	25	24
<code>_IBIN_IN[8]</code>	31	30	29	28
<code>_IBIN_IN[9]</code>	35	34	33	32
<code>_IBIN_IN[10]</code>	39	38	37	36

Die Modifikation der Bits eines solchen Integerarrays erfolgt nahezu analog zu der einer Integersystemvariablen wie `_IEXMODE`. Es sind wiederum beide Verfahren möglich, nämlich das direkte über `<bitsetVar>` und das indirekte über `<setVar>`. Folgendes Beispiel zeigt die XML-Abfragen für das Setzen von Bit0 in Byte10 des Arrays `_IBIN_OUT[10]`. Das Löschen des Bit erfolgt analog dazu.

```
<CMD><setVar><ClientStamp>faps</ClientStamp><name>_IBIN_OUT
<name><Integer><element><index>3</index><IntValue>65536
</IntValue></element></Integer></setVar></CMD>
```

und

```
<CMD><bitsetVar><ClientStamp>faps</ClientStamp><name>_IBIN_OUT
</name><Integer><bitelement><index>3</index><or/><IntValue>65536
</IntValue></bitelement></Integer></bitsetVar></CMD>
```

Durch den Index wird die Position des Byte im Array angegeben. Der Zustand der Variablen kann über `<getVar>` abgefragt werden.

```
<CMD><getVar><ClientStamp>faps</ClientStamp><name>_IBIN_OUT
</name><Integer><array><index>3</index></array></Integer>
</getVar></CMD>
```

Lebenslauf

Veit Clemens Rückel

geboren am 14. Februar 1978 in Bayreuth

ledig

1984 – 1988 Grundschule Bayreuth

1988 – 1997 Gymnasium Bayreuth

11/1997 – 04/2002 Studium der Fertigungstechnik an der Friedrich-Alexander
Universität Erlangen-Nürnberg

Abschluss: Dipl.-Ing. (Univ.)

seit 06/2002 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungs-
automatisierung und Produktionssystematik an der Friedrich-
Alexander Universität Erlangen-Nürnberg

Leiter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann

Reihe Fertigungstechnik - Erlangen

www.mb.uni-erlangen.de/diss

Band 1 - 52
Carl Hanser Verlag, München

ab Band 53
Meisenbach Verlag, Bamberg
45,-- Euro

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- Band 84: Knuth Götz
Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-112-1
- Band 85: Ralf Luchs
Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-113-7
- Band 86: Frank Pöhlau
Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8
- Band 87: Roland T. A. Kals
Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-115-6
- Band 88: Gerhard Luhn
Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tabelle. 1999.
ISBN 3-87525-116-4
- Band 89: Axel Sprenger
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-117-2
- Band 90: Hans-Jörg Pucher
Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-119-9
- Band 91: Horst Arnet
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-120-2
- Band 92: Doris Schubart
Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-122-9
- Band 93: Adrianus L. P. Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver – Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-124-5
- Band 94: Hans-Martin Biehler
Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1
- Band 95: Wolfgang Becker
Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-127-X
- Band 96: Philipp Hein
Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-128-8

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten
181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-164-4

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

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

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

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung
111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-163-0

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

Band 123: Mark Geisel

Prozeßkontrolle und –steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik

135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-180-6

Band 124: Gerd Eßer

Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik

148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-171-7

Band 125: Marc Fleckenstein

Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte

159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-170-9

Band 126: Stefan Kaufmann

Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik

159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-172-5

Band 127: Thomas Fröhlich

Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung

143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-186-5

Band 128: Achim Hofmann

Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen

113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tabellen
ISBN 3-87525-182-2

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik

129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-169-5

Band 130: Thomas Pohl

Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen

133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tabellen. 2002
ISBN 3-87525-173-3

Band 131: Matthias Wenk

Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern

167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tabelle. 2002.
ISBN 3-87525-174-1

Band 132: Matthias Negendanck

Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen

116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tabellen
ISBN 3-87525-184-9

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung –

Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation

167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tabellen
ISBN 3-87525-176-8

Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten

179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-177-6

Band 135: Roland Meier

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

155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tabellen. 2002.

ISBN 3-87525-178-4

Band 136: Jürgen Wunderlich

**Kostensimulation – Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung
komplexer Produktionssysteme**

202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tabellen. 2002.

ISBN 3-87525-179-2

Band 137: Stefan Novotny

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

132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tabellen. 2002.

ISBN 3-87525-185-7

Band 138: Andreas Licha

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

158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tabellen. 2003.

ISBN 3-87525-189-X

Band 139: Michael Eisenbarth

**Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik
für mechatronische Baugruppen**

207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tabellen. 2003.

ISBN 3-87525-190-3

Band 140: Frank Christoph

**Durchgängige simulationsgestützte Planung von
Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion**

187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tabellen. 2003.

ISBN 3-87525-191-1

Band 141: Hinnerk Hagenah

**Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden
Måhhaltigkeit für das Blechbiegen**

131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tabellen. 2003.

ISBN 3-87525-192-X

Band 142: Ralf Eckstein

**Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile –
Materialeinfluss und Materialverhalten**

148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tabellen. 2003.

ISBN 3-87525-193-8

Band 143: Frank H. Meyer-Pittruff

**Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien
mit homogener Lichtlinie**

138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2003.

ISBN 3-87525-196-2

Band 144: Andreas Kach

**Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen
an Bauteilabweichungen**

139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-197-0

Band 145: Stefan Hierl

**System- und Prozeßtechnik für das simultane Låten mit
Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen**

124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-198-9

Band 146: Thomas Neudecker

**Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge-
Einfluss einer Oberflåchenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung**

166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-200-4

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze

132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-203-9

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz

188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-204-7

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren – Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik

122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-206-3

Band 150: Martino Celeghini

Wirkmedienbasierte Blechumformung:

Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie

146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-207-1

Band 151: Ralph Hohenstein

Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung

282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-210-1

Band 152: Angelika Hutterer

Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse

149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-212-8

Band 153: Emil Egerer

Massivumformen metallischer Kleinteile bei erhöhter Prozesstemperatur

158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-213-6

Band 154: Rüdiger Holzmann

Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen

186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-217-9

Band 155: Marco Nock

Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen

Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens

164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-218-7

Band 156: Frank Niebling

Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlintern metallischer Bauteile

148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-219-5

Band 157: Markus Meiler

Großserientauglichkeit trockenschmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk

Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche

104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-221-7

Band 158: Agus Sutanto

**Solution Approaches for Planning of Assembly Systems
in Three-Dimensional Virtual Environments**

169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-220-9

Band 159: Matthias Boiger

**Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen
auf der Basis flexibler Schaltungsträger**

175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-222-5

Band 160: Matthias Pitz

Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle

120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-223-3

Band 161: Meik Vahl

**Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses
beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen**

165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-224-1

Band 162: Peter K. Kraus

**Plattformstrategien – Realisierung einer varianz- und
kostenoptimierten Wertschöpfung**

181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-226-8

Band 163: Adrienn Cser

Laserstrahlschmelzabtrag – Prozessanalyse und -modellierung

146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-227-6

Band 164: Markus C. Hahn

**Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von
Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern**

143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-228-4

Band 165: Gordana Michos

Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen

146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-230-6

Band 166: Markus Stark

Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays

158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-231-4

Band 167: Yurong Zhou

**Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen
Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion**

156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-232-2

Band 168: Werner Enser

**Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer
Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen**

190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-233-0

Band 169: Katrin Melzer

**Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen
Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle**

155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-234-9

Band 170: Alexander Putz

**Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von
armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall**

137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-237-3

Band 171: Martin Prechtl
**Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien –
System- und Prozesstechnik**
154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-238-1

Band 172: Markus Meidert
**Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung
von Werkzeugen der Kaltmassivumformung**
131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-239-X

Band 173: Bernd Müller
**Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung
und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile**
147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-240-3

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen
136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-243-9
ISBN 3-87525-243-8

Band 175: Peter Wölflick
**Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen
für bleifreie Mechatronik-Anwendungen**
177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-246-0
ISBN 3-87525-246-2

Band 176: Attila Komlódi
**Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding
of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods**
155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-248-4
ISBN 3-87525-248-9

Band 177: Uwe Popp
**Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren
von Kaltmassivumformwerkzeugen**
140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-249-1
ISBN 3-87525-249-7

Band 178: Veit Rückel
**Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung
Für kooperierende Industrieroboter**
148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-250-7
ISBN 3-87525-250-0