

Lehrstuhl für
Betriebswissenschaften und Montagetechnik
der Technischen Universität München

**Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage
am Beispiel der Automobilindustrie**

Dipl.-Wirtsch.-Ing.

Jochen Werner

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

Doktor-Ingenieurs

(Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

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

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. F. Schiller

Die Dissertation wurde am 03.07.2008 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 25.09.2008 angenommen.

Jochen Werner

**Methode zur roboterbasierten
förderbandsynchronen Fließmontage
am Beispiel der Automobilindustrie**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 225

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2008

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2009

ISBN 978-3-8316-0857-7

Printed in Germany
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Geleitwort der Herausgeber

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

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

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

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

Vorwort

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

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

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Schiller, dem Leiter des Fachgebiets Automatisierungstechnik des Lehrstuhl für Informationstechnik im Maschinenwesen (*itm*) der Technischen Universität München, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates sehr herzlich bedanken.

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

Dr.-Ing. Friedrich Lange des Instituts für Robotik und Mechatronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) möchte ich für die fachliche Unterstützung bei der vorliegenden Thematik und die gute Zusammenarbeit danken.

In besonderem Maße möchte ich mich selbstverständlich auch bei meiner Familie bedanken, die mich in meinem Handeln stets unterstützt und gefördert haben.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme.....	VII
Verzeichnis der Formelzeichen.....	IX
1 Einleitung	1
1.1 Flexible Automatisierung in der Montagetechnik.....	1
1.2 Motivation.....	3
1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise	4
2 Stand der Technik	7
2.1 Allgemeines	7
2.2 Mechanische Synchronisation	7
2.2.1 Allgemeines	7
2.2.2 Formschlüssige Synchronisation	8
2.2.3 Kraftschlüssige Synchronisation.....	9
2.3 Gesteuerte Synchronisation	10
2.3.1 Allgemeines	10
2.3.2 Parallele Soll-Wertvorgabe.....	11
2.3.3 Soll-Wertvorgaben aus Ist-Werten	11
2.4 Geregelte Synchronisation.....	13
2.4.1 Allgemeines	13
2.4.2 Hydraulische Regelung.....	14

2.4.3	Elektronische Regelung.....	14
2.5	Zusammenfassung.....	17
3	Systemanalysen.....	19
3.1	Analyse der Synchronisationsprinzipien.....	19
3.2	Aufbau der untersuchten Fördertechnik.....	21
3.2.1	Allgemeines.....	21
3.2.2	Gliederbandförderer.....	23
3.2.3	Elektrohängebahn.....	24
3.3	Analyse des Laufverhaltens der Fördersysteme.....	25
3.3.1	Allgemeines.....	25
3.3.2	Auswahl des Messsystems.....	25
3.3.3	Laufverhalten des Plattenbandförderers.....	29
3.3.4	Laufverhalten der Elektrohängebahn.....	32
3.4	Analyse der eingesetzten Robotertechnik.....	35
3.4.1	Allgemeines.....	35
3.4.2	Kinematik.....	36
3.4.3	Robotersteuerung.....	37
3.4.4	Dynamik von Industrierobotern.....	38
3.5	Zusammenfassung und Präzisierung des Handlungsbedarfs.....	42
4	Anforderungen an die roboterbasierte förderbandsynchrone Montage.....	45
4.1	Technische Anforderungen.....	45
4.1.1	Allgemeines.....	45
4.1.2	Positioniergenauigkeit.....	46

4.1.3	Montageprozess	49
4.1.4	Sicherheit	49
4.2	Wirtschaftliche Anforderungen	51
4.2.1	Allgemeines	51
4.2.2	Ökonomische Effizienz.....	52
4.2.3	Technologie/Organisation.....	53
4.2.4	Flexibilität	53
5	Methode der roboterbasierten förderbandsynchronen Montage	55
5.1	Randbedingungen und Vorgehen	55
5.2	Entwicklung der Synchronisationsstrecke.....	55
5.2.1	Definition und Anforderungen.....	55
5.2.2	Möglichkeiten der Synchronisationsortes.....	57
5.2.3	Bewertung und Auswahl.....	59
5.3	Entwicklung der Integration von Nachgiebigkeit.....	60
5.3.1	Definition und Anforderungen.....	60
5.3.2	Möglichkeiten der Integration von Nachgiebigkeit	61
5.3.3	Bewertung und Auswahl.....	63
5.4	Konzeption des Synchronisationsprinzips.....	63
5.4.1	Allgemeines zum Synchronisationsprinzip	63
5.4.2	Funktionsweise des Synchronisationsprinzips.....	64
5.5	Entwicklung des Synchronisationslaufes	66
5.5.1	Allgemeiner Prozessablauf und Prozessphasen.....	66
5.5.2	Grobpositionierungsphase	67

5.5.3	Annäherungsphase.....	68
5.5.4	Kontaktphase	69
5.6	Anwendungsbereiche der Methode.....	70
5.7	Zusammenfassung.....	72
6	Entwicklung von Möglichkeiten der Prozessdatenerfassung	75
6.1	Allgemeines.....	75
6.2	Identifikation der Messaufgabe.....	76
6.3	Anforderungen an die Prozessdatenerfassung.....	77
6.4	Berührungslose Erfassung der Posedifferenzen.....	78
6.4.1	Allgemeines.....	78
6.4.2	Möglichkeiten der Datenerfassung.....	79
6.4.3	Einschränkung der Messprinzipien	80
6.4.4	Bewertung und Auswahl	81
6.5	Taktile Erfassung der Kräfte und Momente.....	82
6.5.1	Allgemeines.....	82
6.5.2	Möglichkeiten der Datenerfassung.....	83
6.5.3	Einschränkung der Messprinzipien	84
6.5.4	Bewertung und Auswahl	85
6.6	Zusammenfassung.....	86
7	Aufbau einer Pilotanlage	89
7.1	Allgemeines.....	89
7.2	Komponenten der Anlage.....	90
7.2.1	Allgemeines.....	90

7.2.2	Fördersystem mit Fahrzeug	91
7.2.3	Roboter mit Linearachse	91
7.2.4	Sonstige Einrichtungen	91
7.3	Entwicklung des Endeffektors.....	92
7.3.1	Anforderungen	92
7.3.2	Aufbau des Endeffektors.....	93
7.3.3	Integration des Bildverarbeitungssystems	95
7.3.4	Integration des Kraft-Momenten-Sensors.....	96
7.4	Adaption der Robotersteuerung.....	98
7.4.1	Anforderungen	98
7.4.2	Struktur der Robotersteuerung.....	99
7.4.3	Integration der Sensorik.....	101
7.5	Zusammenfassung	102
8	Betrieb der Pilotanlage.....	105
8.1	Allgemeines	105
8.2	Bestimmung der Soll-Bahn	105
8.2.1	Allgemeiner Ablauf	105
8.2.2	Programmierung der Referenztrajektorie	106
8.2.3	Korrektur der Soll-Position aufgrund von Sensorwerten	107
8.2.4	Bestimmung der Trajektorie der Endeffektorlage	108
8.3	Realisierung Montageprozess.....	109
8.3.1	Montageablauf	109
8.3.2	Grobpositionierungsphase	110

8.3.3	Annäherungsphase.....	111
8.3.4	Kontaktphase	112
8.4	Zusammenfassung.....	114
9	Bewertung des Systems	115
9.1	Allgemeines.....	115
9.2	Technische Bewertung	115
9.2.1	Aufbau des Messsystems.....	115
9.2.2	Verfolgegenauigkeit in der Grobpositionierungsphase	117
9.2.3	Verfolgegenauigkeit in der Annäherungsphase.....	120
9.2.4	Verfolgegenauigkeit in der Kontaktphase	124
9.2.5	Sicherheit.....	125
9.3	Wirtschaftliche Bewertung.....	126
9.3.1	Allgemeines	126
9.3.2	Realisierungsalternativen.....	128
9.3.3	Investitionsrechnung.....	130
9.3.4	Nutzwert	136
9.4	Zusammenfassung.....	138
10	Zusammenfassung und Ausblick	141
10.1	Zusammenfassung	141
10.2	Ausblick.....	143
11	Literaturverzeichnis	145
12	Anhang.....	163

Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme

Abkürzung/ Akronym	Bedeutung
1D	Eindimensional
3D	Dreidimensional
6D	Sechsdimensional
A/D-Wandler	Analog - Digital Wandler
BV	Bildverarbeitung
CCD	Charged Coupled Device (Ladungsgekoppeltes Bauelement)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMS	Dehnungsmessstreifen
EHB	Elektrohängebahn
Endeffektor	Der Endeffektor ist das Roboterwerkzeug, welches am Roboterflansch angebracht wird. Es beinhaltet im Allgemeinen den Greifer, die Prozesstechnik und Sensorik
FT	Fourier-Transformation
IPC	Industrial Personal Computer (Industrie - PC)
IPO-Takt	Interpolationstakt der Robotersteuerung
ISO	International Standardization Organization (Internationale Standardisierungsorganisation)
KFZ	Kraftfahrzeug
KMS	Kraft-Momenten-Sensor
KOS	Koordinatensystem

LED	Light Emitting Diode (Lichtemittierende Diode)
Max.	Maximalwert
Min.	Minimalwert
Mittl.	Mittlere (Durchschnittlich)
Pose	Position und Orientierung
PSD	Position Sensing Detektor (Positionsdetektor)
ROI	Region of Interest (Prüffenster)
RSI	Robot Sensor Interface (Sensorschnittstelle für Roboter)
TCP	Tool-Center-Point (Werkzeugbezugspunkt)
UDP	User Datagram Protocol
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VGA	Video Graphics Array (Grafikkartenstandard mit 640×480 Pixel)

Verzeichnis der Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
a	mm/s ²	Beschleunigung
a_{Oi}	mm	Ist-Orientierung des zu verfolgenden Objektes um Achse z
a_{Ri}	mm	Ist-Orientierung des Roboters in Achse z
A		Amplitude
b_{Oi}	mm	Ist-Orientierung des zu verfolgenden Objektes um Achse y
b_{Ri}	mm	Ist-Orientierung des Roboters in Achse y
c_{Oi}	mm	Ist-Orientierung des zu verfolgenden Objektes um Achse x
c_{Ri}	mm	Ist-Orientierung des Roboters in Achse x
f	Hz	Frequenz
F	N	Kraft
G	€	Gewinn
i	%	Zinssatz
I	€	Invest
K_0	€	Kostenwert
K	€	Kosten
m	kg	Masse
M	Nm	Moment
N		Nutzen
P_n		Gewichtung eines Parameters n

${}^s \underline{P}_T^x$		Verschiebung des Endeffektorkoordinatensystems gegenüber dem Sensorkoordinatensystem
${}^s \underline{R}_T$		Rotation des Endeffektorkoordinatensystems zum Sensorkoordinatensystem
s	mm	Weg
t	s	Zeit
v	mm/s	Geschwindigkeit
VG_a	Grad	Orientierungs-Verfolgegenauigkeit um Achse z
VG_b	Grad	Orientierungs-Verfolgegenauigkeit um Achse y
VG_c	Grad	Orientierungs-Verfolgegenauigkeit um Achse x
VG_P	mm	Positions-Verfolgegenauigkeit
x_{Oi}	mm	Ist-Position des zu verfolgenden Objektes in Achse x
x_{Ri}	mm	Ist-Position des Roboters in Achse x
y_{Oi}	mm	Ist-Position des zu verfolgenden Objektes in Achse y
y_{Ri}	mm	Ist-Position des Roboters in Achse y
z_{Oi}	mm	Ist-Position des zu verfolgenden Objektes in Achse z
z_{Ri}	mm	Ist-Position des Roboters in Achse z
Δx	mm	Abweichung der Ist-Position von der Soll-Position in Achse x
Δy	mm	Abweichung der Ist-Position von der Soll-Position in Achse y

Δz	mm	Abweichung der Ist-Position von der Soll-Position in Achse z
------------	----	--

1 Einleitung

1.1 Flexible Automatisierung in der Montagetechnik

Die Montage stellt in der Wertschöpfungskette das letzte Glied dar. Sie ist geprägt durch die Notwendigkeit der Realisierung einer hohen Variantenvielfalt bei gleich bleibend hoher Qualität (2000). Aus Sicht der Montagetechnik ist es in diesem Zusammenhang erforderlich, weiterhin in hohen Stückzahlen zu fertigen, um vor allem hinsichtlich der Kosten konkurrenzfähige Produkte am Markt zu platzieren (ZÄH et al. 2003). Dennoch treten in der Montage die größten Zeit- und Kostenpositionen des gesamten Wertschöpfungsprozesses auf. Dies resultiert daraus, dass in der Montage sämtliche zuvor gemachten Fehler mit hohem Aufwand ausgeglichen werden müssen (MILBERG 1987, REINHART et al. 1998). Der Zeitanteil der Montage an der gesamten Produktion liegt nach ANDREASEN & AHM (1988) bei 60%, der Kostenanteil bei 30%. PFEIFFER (1989) beziffert den Anteil der Montagekosten mit etwa 50%, GAIROLA (1985) sogar mit bis zu 70%. Diese hohen Zeit- und Kostenanteile in der Montage lassen auf ein erhebliches Rationalisierungspotential schließen.

Eine Antwort auf die genannten Anforderungen sind hochflexible Montagesysteme (FELDMANN & SLAMA 2001, REINHART & ZÄH 2006). Technische Ansätze liegen in der flexiblen oder gar wandlungsfähigen Gestaltung von Betriebsmitteln für Montagesysteme (DENKENA & DRABOW 2005, HILDEBRAND 2001, POUGET 2000, WESTKÄMPER 2001, ZÄH et al. 2006b).

Der Einsatz von Robotern als flexibles Handhabungs- und Montagewerkzeug ist dabei ein zentraler Stützpfiler. Die seit vielen Jahren ansteigenden Kosten für menschliche Arbeit und der hohe Druck, die Produktionskosten zu senken, führen dazu, dass der Automatisierungsgrad in vielen Bereichen des produzierenden Gewerbes steigt. Aber nicht nur die kostenintensive menschliche Arbeitskraft fördert den Einsatz von Robotern. Häufig arbeiten Roboter auch in für den Menschen gefährlichen Umgebungen oder führen körperlich anstrengende Arbeiten aus. Bei vielen industriellen Produktionsabläufen kommt es außerdem auf sehr hohe Präzision, Zuverlässigkeit und Kontinuität an, die oft nur der Roboter leisten kann.

Der Einsatz von Industrierobotern wird neben den schon beschriebenen Gründen auch von der Art des Montagesystems entscheidend beeinflusst. Aufgrund einer Vielzahl von Vorteilen, wie beispielsweise der geringen Werkerbindung, Minimierung der Durchlaufzeiten oder der Aufgabenteilung hat sich die Fließfertigung nach dem Erzeugnisprinzip in vielen Bereichen der Industrie durchgesetzt (LOTTER et al. 1998). Die Fließmontage ist daher die typische Organisationsform der automobilen Endmontage. Daraus resultiert jedoch ein hoher Anteil an manueller Arbeitsleistung. Dieser ist bedingt durch die kontinuierliche Bewegung, die das Fahrzeug ausführt. Eine Automatisierung und somit der Einsatz von Industrierobotern in der Fließmontage ist nur möglich, wenn das Handhabungssystem mit dem Produkt synchronisiert wird. Daraus ergeben sich zwei unterschiedliche Ansätze:

Bei der Teilautomatisierung werden Automatisierungskomponenten dazu eingesetzt, den Menschen bei bestimmten Bewegungen oder Abläufen zu unterstützen, wobei die Kontrolle und Steuerung beim Menschen bleibt. Beispiele für diese Art der Automatisierung sind der Einsatz von Balancern bei der Sitzmontage oder beim Radanbau. In Abhängigkeit des Montageprozesses werden die Handhabungssysteme direkt durch den Menschen geführt oder von diesem mechanisch mit dem Fahrzeug verbunden, so dass sie vom Fahrzeug mitgeschleppt werden.

Die Vollautomatisierung ist derzeit lediglich bei Stillstand des zu montierenden Produktes möglich. Diese Notwendigkeit ergibt sich aus der erforderlichen Synchronisation zwischen Produkt und Handhabungswerkzeug, die mit der erforderlichen Genauigkeit aktuell nur bei einem Stillstand zu erreichen ist. Dafür wird das Produkt mittels Spannsystemen fixiert, evt. vermessen und die entsprechenden Bauteile mit Hilfe von Industrierobotern montiert. Diese Art der Montage findet derzeit im Allgemeinen bei der Schiebedach-, Frontscheiben- und Cockpitmontage statt.

Die förderbandsynchrone Montage als Möglichkeit der Automatisierung in kontinuierlichen Fließmontagelinien ist durch eine Vielzahl von Vorteilen gegenüber sowohl der getakteten Automatisierung als auch der manuellen Montage gekennzeichnet. In einer Studie der MAURER et al. (2005) wird die förderbandsynchrone Montage daher als eine der Schlüsseltechnologien für die Automatisierung in der Fließmontage bezeichnet.

1.2 Motivation

In manuellen Fließmontagelinien folgt der Werker der Karosserie, indem er entweder parallel läuft oder auf dem gleichen Förderband mitfährt. Diese Form der Montage bietet eine Reihe von Vorteilen, wie beispielsweise die Vermeidung von Taktzeitverlusten und damit die Reduktion von Durchlaufzeiten. Nachteile dieses Montagekonzeptes liegen in der geringen Ergonomie der Arbeitsplätze sobald große oder schwere Bauteile, wie Sitze und Räder, zu handhaben sind. Darüber hinaus kann eine gleich bleibend hohe Qualität nur bedingt sichergestellt werden.

Die automatisierte Montage in Fließmontagelinien wird durch die Notwendigkeit der Synchronisation von Handhabungsgerät und Produkt limitiert. Daher muss das Produkt aus der Fließlinie ausgeschleust und bis zum Stillstand abgebremst werden. Zusätzlich werden die Fahrzeuge aufgrund des starren Stationstaktes vor der eigentlichen Montagestation gepuffert. In dieser erfolgt im Anschluss die taktgebundene, automatisierte Montage. Sobald diese abgeschlossen ist, wird das Fahrzeug erneut beschleunigt und in die Fließlinie eingeschleust. Diese vor- und nachgelagerten Puffer- und Beschleunigungsbereiche, siehe Abbildung 1-1, verringern in Kombination mit der geringeren Flexibilität automatisierter Anlagen in Bezug auf Stückzahlschwankungen die Wirtschaftlichkeit vollautomatisierter Montagesysteme in Fließmontagelinien. Daher werden heutzutage automatisierte Stationen so weit wie möglich kombiniert und zentralisiert, um den Platzbedarf pro Station zu minimieren. Wenn dies nicht möglich ist, wird teilweise auf eine Automatisierung verzichtet, auch wenn diese für sich genommen effizient wäre.



Abbildung 1-1: Gestaltung von Fließmontagelinien in der Automobilindustrie aufgrund getakteter Automatisierungsanlagen

Die förderbandsynchrone Montage kombiniert die hohe und reproduzierbare Qualität der automatisierten Montage mit der Flexibilität der manuellen Fließmontage. Ein weiterer Vorteil der förderbandsynchronen Montage ist die Vermeidung der Puffer- und Beschleunigungsbereiche. Die Montagelinien schrumpfen in der Länge und es resultieren daraus weniger Beeinträchtigungen bei der Layoutgestaltung.

1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur förderbandsynchronen Montage. Diese soll es ermöglichen, Montageprozesse, die derzeit entweder manuell im Fließbetrieb oder automatisiert getaktet durchgeführt werden, in die automatisierte Fließmontage zu übernehmen.

Zur Erreichung dieses Zieles ist es folglich notwendig, ausgehend vom Stand der Technik und den zu analysierenden Anforderungen an ein derartiges Robotersystem, eine Methode zur Synchronisation vom Roboter zum Montagehauptkörper zu erarbeiten. Die Validierung findet anhand einer zu realisierenden Pilotanlage statt. Der im Rahmen der vorliegenden Arbeit angestrebte Forschungsschwerpunkt liegt in der Ermöglichung eines Gleichlaufes zwischen dem Roboter und dem geförderten Bauteil. Dies soll insbesondere durch die Kombination geeigneter Handhabungs-, Regelungs- und Sensortechnik erreicht werden.

Um das beschriebene Ziel zu erreichen, wird in der Arbeit aufbauend auf standardisierten Vorgehensweisen für das wissenschaftliche Arbeiten nach MÜLLER (1990), POPPER (1976) und UHL (1999) folgendermaßen vorgegangen (vgl. Abbildung 1-2):



Abbildung 1-2: Vorgehensweise der Arbeit

Das *Kapitel 2* erläutert und zitiert detailliert die in der Literatur vorhandenen Ansätze zur Synchronisation von Handhabungssystemen und Förderbändern. Es

wird die chronologische Entwicklung aufgezeigt und anhand von Praxisbeispielen erläutert.

Schwerpunkt des *Kapitels 3* bildet die Analyse von für die Realisierung einer förderbandsynchronen Montage benötigten Systemen. Berücksichtigung finden in diesem Zusammenhang eigene Untersuchungen zur Lagegenauigkeit des Fördergutes auf bzw. in den Fördersystemen während des Förderns und zur Dynamik standardisierter Industrieroboter.

Die Anforderungen an eine förderbandsynchrone Montage und somit an die Synchronisation werden in *Kapitel 4* definiert. Diese beruhen auf den vorausgegangen Systemanalysen und allgemeinen Anforderungen an Montageprozesse. Zusätzlich werden die wirtschaftlichen Randbedingungen an ein zu entwerfendes automatisiertes Robotersystem konkretisiert.

Das *Kapitel 5* ist der Entwicklung einer allgemeingültigen Methode der förderbandsynchronen Montage gewidmet und ist somit der Kern der Arbeit. Dabei werden die für die Synchronisation zwischen dem Produkt, welches sich im Fördersystem befindet, und dem Handhabungsgerät notwendigen Prinzipien sowie geeignete Sensor- und Regelungssysteme beschrieben. Die erarbeiteten Einzelergebnisse werden dafür in eine allgemeingültige Methode überführt.

Für den Einsatz der Methode in einzelnen Applikationen ist es notwendig, die jeweils am Besten geeignete Prozessdatenerfassung auszuwählen. Daher werden in *Kapitel 6* die Möglichkeiten der Prozessdatenerfassung aufgezeigt und geeignete Systeme diskutiert.

Die Auswahl eines Anwendungsszenario und der Aufbau einer Pilotanlage ist Inhalt des *Kapitel 7*. Anhand eines industriellen Anwendungsbeispiels werden die Funktionsweise der entwickelten Prinzipien, Regelungsalgorithmen sowie die systemtechnische Umsetzung dargestellt.

Kapitel 8 beschreibt die Funktionsweise der realisierten Pilotanlage. Dabei werden insbesondere die Bestimmung der Roboterbahn und die Realisierung des konkreten Montageszenarios beleuchtet.

Die Bewertung des Systems in *Kapitel 9* erfolgt sowohl in Form einer Analyse der Genauigkeit während der Synchronisation als auch einer Analyse der Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage. Bei dieser Betrachtung wird die förderbandsynchrone Montage der manuellen Fließmontage und der automatisierten getakteten Montage gegenübergestellt.

Den Abschluss der vorliegenden Arbeit bilden in *Kapitel 10* die Zusammenfassung der erarbeiteten Ergebnisse und der Ausblick auf zukünftige Arbeiten zu diesem Thema.

2 Stand der Technik

2.1 Allgemeines

Für eine Bewegungssynchronisation zwischen Fördersystem bzw. Montagehauptkörper und der Handhabungseinrichtung bzw. dem Fügebauteil existiert bereits eine Vielzahl von Ansätzen. Die Synchronisationskonzepte zur förderbandsynchronen Montage vorzugsweise schwerer Lasten lassen sich aufgrund ihrer Koppelungsprinzipien zwischen Roboter und Fördersystem in mechanische, gesteuerte und geregelte Synchronisationen einteilen, siehe Abbildung 2-1. Unter einem Fördersystem soll dabei der Förderer mit dem zu fördernden Basisbauteilen verstanden werden. Die verschiedenen Konzepte werden nachfolgend näher erläutert.

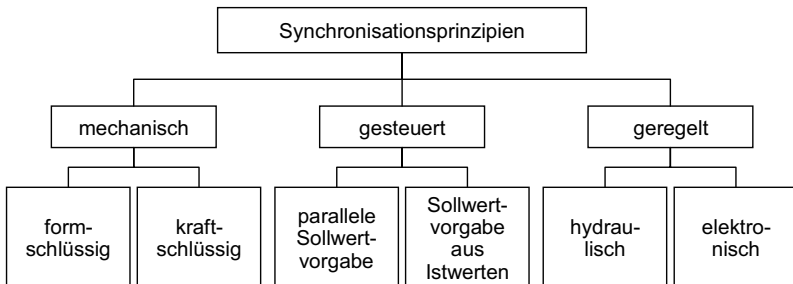


Abbildung 2-1: Synchronisationsprinzipien zwischen Handhabungssystem und Fördersystem bei der automatisierten förderbandsynchronen Montage nach DIRNDORFER (1993)

2.2 Mechanische Synchronisation

2.2.1 Allgemeines

Die mechanische Synchronisation ist die einfachste Art der Bewegungssynchronisation. Sie erfolgt über eine form- oder kraftschlüssige Verbindung des Fördersystems mit dem Handhabungssystem. Aufgrund der Verbindung wird das Pro-

dukt oder das Handhabungswerkzeug mitgeschleppt und somit eine quasistatische Montage ermöglicht.

2.2.2 Formschlüssige Synchronisation

Eine mögliche Art der formschlüssigen Synchronisation stellt ein Handhabungssystem mit abschaltbarem Antrieb dar, welches vom Fördersystem mitgeschleppt wird. Es bewegt sich auf einer Schiene parallel zum Fördersystem und verbindet sich mit diesem während des Montagevorganges formschlüssig. Durch das Abschalten des eigenen Antriebs ermöglicht es daraufhin einen Synchronlauf. Nach Beendigung des Montagevorganges koppelt die Vorrichtung aus und fährt selbständig in die Ausgangsstellung zurück. Ein Beispiel hierfür ist im Schutzrecht DE 32 49 454 C2 (1989) beschrieben und wurde zur Montage der Dachhimmel in der Fahrgastzelle umgesetzt, siehe Abbildung 2-2.

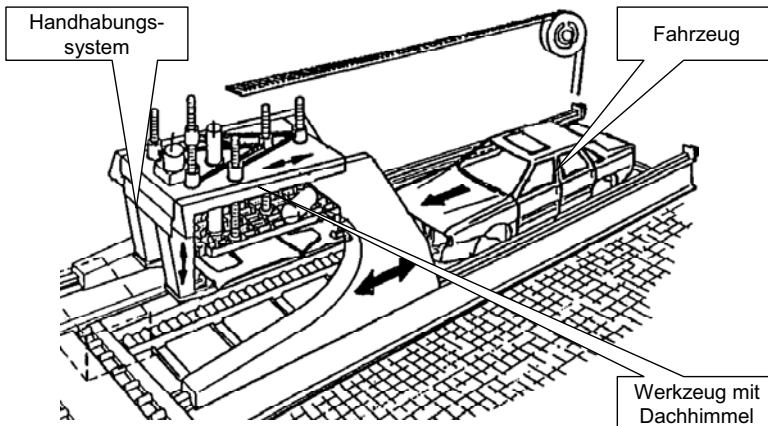


Abbildung 2-2: Vorrichtung zur Montage von Fertighimmeln nach
SCHUTZRECHT DE 32 49 454 C2 (1989)

Im SCHUTZRECHT DE 35 16 284 A1 (1986) ist eine Lösung erläutert, bei der auf beiden Seiten des Förderbandes verfahrbare Plattformen angebracht sind, siehe Abbildung 2-3. Auf diesen Plattformen befinden sich je ein Industrieroboter und eine Hubeinrichtung. Für die Dauer des Montageprozesses wird das Fahrzeug über die Hubeinrichtung vom Band abgehoben, auf den Plattformen zentriert und dort formschlüssig befestigt. Die Plattformen bewegen sich durch einen Vergleich der Absolutgeschwindigkeiten in etwa synchron zum Förderband, so dass

nach Beendigung des Montagevorganges das Fahrzeug wieder auf das Band aufgesetzt werden kann.

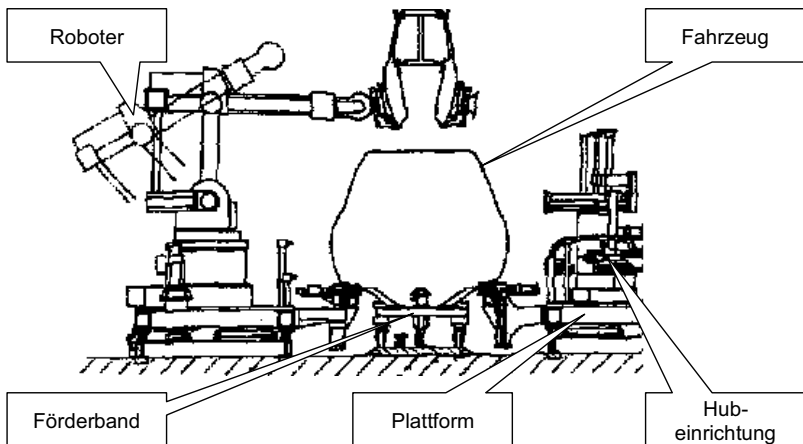


Abbildung 2-3: Montagevorrichtung für Fahrzeugkarosserieteile nach SCHUTZRECHT DE 35 16 284 A1 (1986)

Eine weitere Möglichkeit ist ein Handhabungssystem mit eigenem Antrieb, welches für die Dauer des Montageprozesses das Basisbauteil vom Förderband abhebt, es zentriert und sich mit ihm formschlüssig verbindet. Die Handhabungseinrichtung bewegt sich durch einen Vergleich der Absolutgeschwindigkeiten in etwa synchron zum Förderband, so dass auch hier das Bauteil nach dem Montagevorgang wieder auf das Band aufgesetzt werden kann. Diese Variante wird im SCHUTZRECHT DE 35 26 284 C2 (1993) beschrieben.

2.2.3 Kraftschlüssige Synchronisation

Kraftschlüssige Synchronisationen beruhen darauf, dass die Handhabungseinrichtungen während der Synchronfahrt mit einer definierten Kraft gegen einen Anschlag am bewegten Förderband drücken. Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Förderband und Handhabungseinrichtung führen zu einer Änderung dieser Anpresskraft. Anhand des Unterschiedes zwischen Soll- und Ist-Wert der Kraft wird die Geschwindigkeit des Handhabungssystems entsprechend nachgeregelt. Durch die Regelung des Antriebs passt sich die Handhabungseinrichtung der Geschwindigkeit des Förderbandes an. Dies setzt ein Handhabungssystem voraus,

welches mit einem momentengeregelten oder –begrenzten Antrieb parallel zur Fördereinrichtung verfahren werden kann. Im SCHUTZRECHT EP 02 20 687 B1 (1990) ist dies beschrieben (Abbildung 2-4).

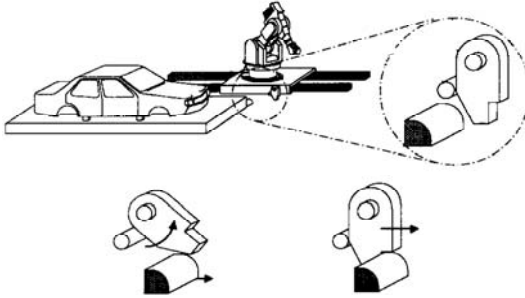


Abbildung 2-4: Kraftschlüssige Kopplung von Handhabungs- und Fördereinrichtung (SCHUTZRECHT EP 02 20 687 B1 1990)

Im SCHUTZRECHT DE 199 04 422 A 1 (1999) wird die mechanische Synchronisation durch Weichschalten einer oder mehrerer Achsen und eine Kraftregelung realisiert. Dabei wird der Roboter mittels einer aktivierbaren Kopplungseinheit von der Fördervorrichtung mit einer vorgebbaren Kraft mitgeschleppt, sobald das jeweilige Servosystem zur Durchführung der synchronen Bewegung des Roboters mit der Fördervorrichtung in einen nachgiebigen Zustand geschaltet wird. Die aktivierbare Kopplungseinheit zum Mitschleppen des Roboters mit der Fördervorrichtung kann sowohl mechanisch oder magnetisch insbesondere elektromagnetisch realisiert werden.

2.3 Gesteuerte Synchronisation

2.3.1 Allgemeines

Eine gesteuerte Synchronisation von Handhabungseinrichtung und Fördersystem erfolgt über die Vorgabe von Soll-Geschwindigkeitswerten an die Steuerungen. Dabei kommt es zu keiner Rückführung der aktuellen Ist-Werte. Die Vorgaben der Soll-Werte können dabei parallel an Fördersystem (hier Förderband) und Handhabungseinrichtung (hier Roboter) gegeben werden (Abbildung 2-5 links).

Eine zweite Möglichkeit besteht darin, die Vorgaben der Soll-Werte für die Handhabungseinrichtung aus einer Messung der aktuellen Ist-Werte des Fördersystems zu bestimmen (Abbildung 2-5 rechts).

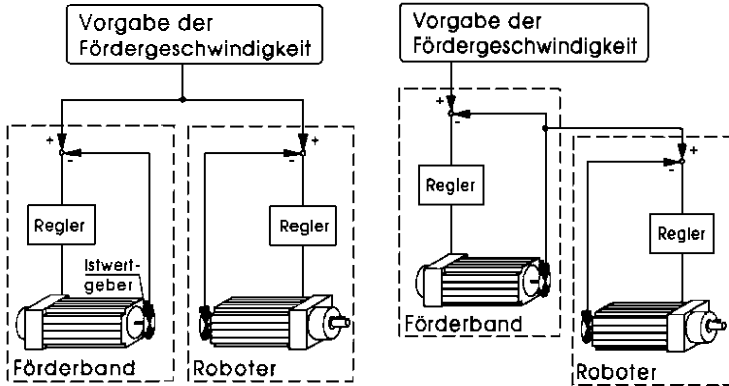


Abbildung 2-5: Parallele Soll-Wertvorgaben für Roboter und Förderband (links) und Ist-Werte des Förderbandes als Soll-Wertvorgabe für den Roboter (rechts) (DIRNDORFER 1993)

2.3.2 Parallele Soll-Wertvorgabe

Hier wird der Soll-Geschwindigkeitswert parallel sowohl an die Steuerung des Fördersystems als auch an die Steuerung der Handhabungseinrichtung weitergegeben. Durch die gleiche Soll-Wertvorgabe können die Einflüsse aus der Förderanlagendynamik nicht berücksichtigt werden. Mit dieser relativ einfach zu realisierenden Lösung sind daher nur geringe Positioniergenauigkeiten zu erzielen (DIRNDORFER 1993).

2.3.3 Soll-Wertvorgaben aus Ist-Werten

Bei diesem Ansatz wird die Soll-Wertvorgabe der Geschwindigkeit nur an das Fördersystem gegeben. Durch die zusätzliche Messung der aktuellen Fördersystemgeschwindigkeit wird nun der Soll-Wert für das Handhabungssystem generiert. Damit können die Geschwindigkeitsschwankungen aufgrund der Fördersystemdynamik teilweise kompensiert werden, jedoch erfordert dieses Prinzip einen höheren Aufwand.

Ein Ansatz hierzu ist im SCHUTZRECHT GB 20 75 217 A (1981) vorgeschlagen. Der bewegungssynchrone Gleichlauf von Handhabung und Fördereinrichtung wird hier durch eine eigene Steuerung der parallel zum Fördersystem ausgerichteten Linearachse des Roboters, die mit der eigentlichen Steuerung kommuniziert, realisiert.

Die Soll-Wertvorgabe aus Ist-Werten ist der Vorläufer des so genannten "Conveyor-Trackings". Dabei wird die Geschwindigkeit des Fördersystems erfasst, daraus der Weg für die Nachführung des Tool-Center-Point (TCP) des Roboters im Interpolationstakt der Robotersteuerung (IPO-Takt) berechnet, das am ruhenden Objekt erstellte Verfährprogramm durch die Robotersteuerung korrigiert und so ein Gleichlauf zwischen Roboter und Fördersystem erreicht (PARK & LEE 1991). Nach DIRNDORFER (1993) und WALTHER (1985) können mit dieser Art der Synchronisation bei großen und schweren Bauteilen lediglich Positioniergenauigkeiten von mehreren Millimetern erreicht werden, was unter anderem auf Regelschwingungen und auftretende Schleppfehler des Industrieroboters zurückzuführen ist. Anwendungsgebiete des Conveyor-Trackings sind beispielsweise der Robotereinsatz in der Lackiererei oder das Einlegen von Bauteilen in einen bewegten geordneten Speicher (DIRNDORFER 1993).

Die Funktion des Conveyor Tracking ist für nahezu alle Robotersysteme verfügbar (ABB FLEXIBLE AUTOMATION GMBH 1998, ADEPT 2006, FANUC ROBOTICS 2008, KUKA ROBOTER 2006a, MOTOMAN 2003). Der Einsatzbereich des Conveyor Tracking reicht dabei von Anwendungen im Automobilbau über Pick&Place Aufgaben (HUANG et al. 2007) bis in die Verpackungsindustrie.

Im von DIRNDORFER (1993) beschriebenen und als SCHUTZRECHT DE 40 21 330 C2 (1996) angemeldeten System wird ein Portalroboter (siehe Abbildung 2-6) mit einem Förderband mittels eines Master-Slave-Konzeptes verbunden. Dabei wird ein Positionsübermittler mithilfe einer Kopplungseinheit an das Werkstück angekoppelt und mitgeschleppt. Zur Reduzierung der Signalverarbeitungsdauer werden die Lagekoordinaten und die aktuelle Transportgeschwindigkeit der elektronischen Robotersteuerung in der jeweiligen Schlussphase der Ermittlung einer Roboterbewegung übermittelt. Durch direkte Einspeisung der Daten in die Lageregelkarte des Roboters mit Umgehung der zentralen Robotersteuerung kann die Zeit für die Datenübertragung an den Schnittstellen sowie für mögliche Soll-Wertadditionen minimiert werden.

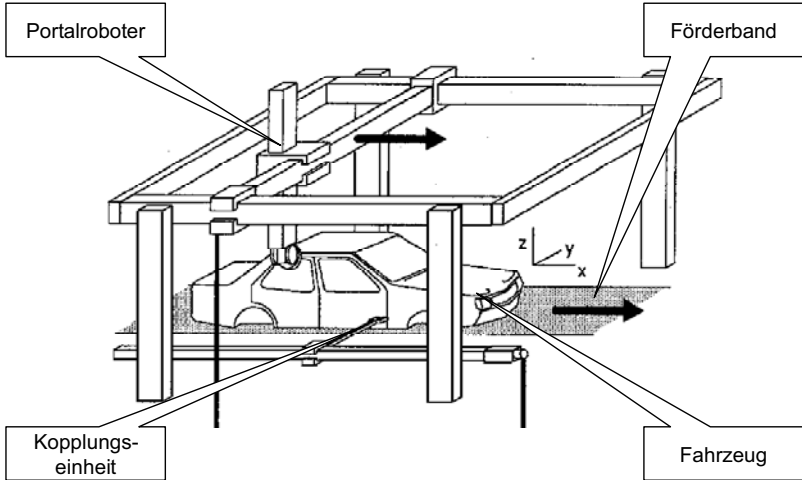


Abbildung 2-6: Gesteuerte Koppelung unter Umgehung der Robotersteuerung
(SCHUTZRECHT DE 40 21 330 C2 1996)

Im von der IBG TECHNOLOGY (2006) vorgestellten System zur Radmontage wird die Synchronisation ebenfalls über ein Conveyor-Tracking realisiert. Ein zusätzlicher Laserabstandssensor registriert Gehänge- oder Stahlbauungenauigkeiten und übermittelt diese als Höhenkorrekturwerte dem Roboter. Für die einmalige Orientierungsmessung wird ein Bildverarbeitungssystem mit je zwei Kameras verwendet, welches die Lage der Radaufnahmen und deren Lochbilder detektiert.

2.4 Geregelte Synchronisation

2.4.1 Allgemeines

Bei einer geregelten Synchronisation werden, im Gegensatz zu einer gesteuerten Synchronisation, die relativen Positionsabweichungen zwischen dem Handhabungssystem und dem Fördersystem während des Synchronlaufes erfasst und über einen Regelkreis an die Steuerung zurückgeführt. Somit gehen sie direkt in die Stellwertbildung des zu synchronisierenden Handhabungssystems ein. Zur Regelung existieren hydraulische oder elektronische Lösungsprinzipien. Einen

schematischen Regelung dieser Art zeigt Abbildung 2-7 anhand eines Förderbandes und dem Antrieb des dazu gehörigen Handhabungssystems.

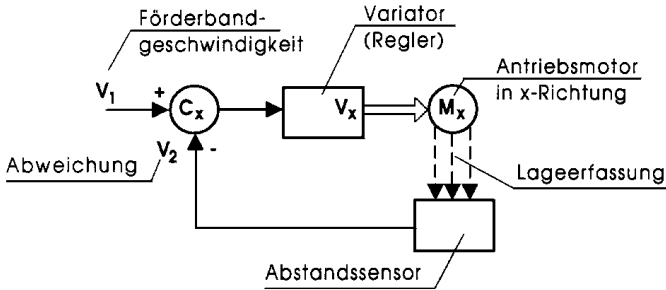


Abbildung 2-7: Schematischer Regelkreis der geregelten Synchronisation nach SCHUTZRECHT US 4.453.303 (1984)

2.4.2 Hydraulische Regelung

Bei einer hydraulischen Regelung führt eine Abweichung der Geschwindigkeiten zu einer proportionalen Änderung von Volumenströmen. Diese Änderung wird genutzt, um die Synchronisation nachzuregeln.

Im SCHUTZRECHT US 3 283 918 (1966) wird eine Form der Koppelung mittels hydraulischer Regelung beschrieben. Über einen am zu synchronisierenden Handhabungssystem angebrachten Stellhebel (Koppelschieber), der am Förderband mechanisch einhakt, wird ein Proportionalventil betätigt. Ist keine Synchronfahrt vorhanden, wird der Hebel entsprechend ausgelenkt und somit das Ventil verstellt. Der sich dadurch ändernde Ölvolumenstrom führt zu einer Drehzahländerung des hydraulischen Antriebs und damit zu einer Geschwindigkeitsänderung des Laufwagens. Bei dieser Lösung tritt ein geschwindigkeitsabhängiger Schleppfehler auf, da eine Synchronfahrt nur bei einer Auslenkung des Hebels stattfinden kann. Die Größe der Auslenkung hängt von der benötigten Geschwindigkeit zur Synchronfahrt ab.

2.4.3 Elektronische Regelung

Neben der hydraulischen existiert noch die Möglichkeit einer elektronischen Regelung zur Synchronisation von Handhabungs- und Fördersystem. Hier werden

die relativen Positionierfehler der Handhabungseinrichtung zum Fördersystem von Sensoren erfasst und die Abweichungen über einen Regelkreis an die Steuerung zurückgeführt. Aus diesen Abweichungen und der gemessenen Fördersystemgeschwindigkeit wird dann die aktuelle Bewegungsgeschwindigkeit für das Handhabungssystem errechnet.

Eine mögliche Ausführung wird im SCHUTZRECHT US 4.453.303 (1984) anhand eines Handhabungssystems zum Einbau von PKW-Frontscheiben dargestellt. Die für die Montage notwendige Bewegung orthogonal zur Förderrichtung wurde hier durch eine zusätzliche, nicht synchronisierte Bewegungsachse (Laufschiene in Y-Richtung) realisiert, siehe Abbildung 2-8.

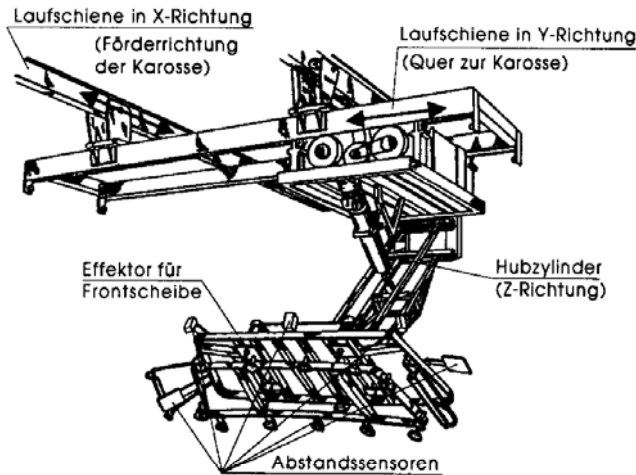


Abbildung 2-8: Vorrichtung mit elektronischer Regelung zur förderbandsynchronen Scheibenmontage (SCHUTZRECHT DE 195 20 582 C1 1996)

Das SCHUTZRECHT DE 42 30 995 A1 (1992) beschreibt ein System zu Synchronisation von Elektrohängebahnen (EHB). Dabei wird mithilfe eines Positionserfassungssystems, welches sich in jeder EHB befinden muss, der Abstand eines Referenzpunktes der EHB zu einem beliebigen anderen Punkt bestimmt. Durch Soll-/Ist-Vergleiche wird die Geschwindigkeit entsprechend angepasst. Durch die kontinuierliche Positionsbestimmung des EHB-Fahrzeuges wird die Geschwindigkeit des EHB-Fahrzeuges stetig geregelt. Die Positionserfassung und Geschwindigkeitsregelung erfolgt separat für jedes EHB-Fahrzeug.

Im SCHUTZRECHT DE 195 20 582 C1 (1996) ist eine weitere Möglichkeit einer geregelten Synchronisation von Handhabungs- und Fördersystem beschrieben. Am Handhabungssystem befindet sich ein Tastarm, welcher am Basisbauteil mechanisch einhakt. Während der Synchronfahrt erfährt er Auslenkungen innerhalb einer bestimmten Regelstrecke des Relativlagenreglers. Diese Auslenkungen werden über eine integrierte Wegmesseinrichtung erfasst und an die Robotersteuerung zurückgeführt. Die Steuerung errechnet daraus permanent die Differenz zwischen Soll-Position und Ist-Position des Tastarms und regelt die Bewegungsgeschwindigkeit der Handhabungseinrichtung entsprechend nach. Eine Auslenkung des Tastarms ist sowohl in positiver als auch in negativer Richtung möglich.

Das von GREWE et al. (2000) präsentierte System zur robotergestützten Kolbenmontage am bewegten Motorblock basiert auf einer modellbasierten Regelung und einem bibliotheksgestützten Kraftregler. Die Steuerung der Trajektorie erfolgt durch Bewegungsprädiktion. Dabei wird die mittels Sensoren, wie z.B. einem Bildverarbeitungssystem, gewonnene Lageinformation ausgenutzt, um eine robuste Bewegungsprädiktion zu erreichen. Das System ist in Abbildung 2-9 dargestellt.

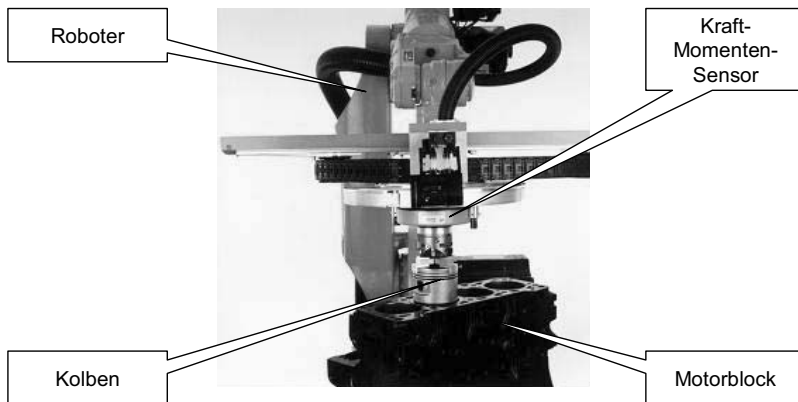


Abbildung 2-9: Autonomes, bildbasiertes Einfügen eines Kolbens in einen Motorblock (GREWE et al. 2000)

2.5 Zusammenfassung

In der Literatur finden sich eine Vielzahl von Untersuchungen und Patenten bezüglich der förderbandsynchronen automatisierten Montage. Chronologisch betrachtet entwickelten sich die unterschiedlichen Synchronisationsprinzipien von den mechanischen über die gesteuerten bis hin zu den geregelten Systemen.

Die mechanische Synchronisation ist die einfachste Art der Bewegungssynchronisation. Dabei wird das Handhabungswerkzeug mit dem Fördersystem über eine form- oder kraftschlüssige Verbindung gekoppelt.

Die gesteuerten Systeme basieren auf der Synchronisation der Geschwindigkeiten von Förder- und Handhabungssystem. Man kann hier zwischen der gemeinsamen Vorgabe eines Soll-Geschwindigkeitswertes und der Soll-Wertvorgabe des Roboters aus den Ist-Werten des Fördersystems unterscheiden. Eine Sonderform des zweitgenannten Prinzips ist das Conveyor-Tracking.

Im Gegensatz zur Fokussierung auf den Ausgleich der Geschwindigkeiten werden bei den geregelten Systemen die Positionen zwischen dem Handhabungswerkzeug und dem Fördersystem als Eingangsgröße für die Regelung herangezogen. Vorteil dieser Systeme ist die Vermeidung eines positionsversetzten Gleichlaufs der Systeme und der daraus resultierenden Positionsungenauigkeit.

3 Systemanalysen

3.1 Analyse der Synchronisationsprinzipien

Die Vor- und Nachteile der einzelnen Synchronisationsprinzipien sind in der Literatur hinreichend diskutiert (DIRNDORFER 1993, ZÄH et al. 2006a). Die Ergebnisse der durchgeführten Analysen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

Mechanische Systeme können aufgrund der notwendigen mechanischen Eigenschaften der Teilkomponenten wie Steifigkeit und Verschleißfestigkeit sowie den daraus resultierenden Massenträgheiten die geforderte Dynamik und Genauigkeit nicht erreichen. Formschlüssige Systeme stellen immer Sondermaschinen dar und werden sich auch in Zukunft nicht oder nur bedingt in manuelle Fließsysteme integrieren lassen. Die auf Kraftschluss basierenden Systeme erfordern eine Umrüstung der vorhandenen Fördersysteme, da diese weder über geeignete Anschlüsse noch über Führungen zum Ausgleich der zu erwartenden Momente verfügen. Diese notwendigen konstruktiven Adaptionen der eingesetzten Förder-technik verhindern einen wirtschaftlichen Einsatz derartiger Montageanlagen.

Die in Abschnitt 2.3 beschriebenen gesteuerten Systeme basieren auf der Synchronisation der Geschwindigkeiten von Förder- und Handhabungssystem. Eine Kopplung der Soll-Wertvorgaben scheidet aus den Betrachtungen aus, da die Fördersysteme zu nachgiebig und vom Antriebsverhalten zu träge sind, um eine präzise Umsetzung der gewünschten Soll-Lage zu gewährleisten. Die Soll-Wertvorgabe aus Ist-Werten kompensiert diesen Nachteil. Die Funktionsweise von gesteuerten Systemen mit Soll-Wertvorgabe aus Ist-Werten ist in Abbildung 3-1 dargestellt. Die jeweilige Ist-Geschwindigkeit des Fördersystems wird mittels eines Geschwindigkeitssensors aufgenommen und mit der Soll-Geschwindigkeit verglichen. Die sich daraus ergebende Differenz wird als Eingangsgröße für die Regelung des Handhabungsgerätes verwendet. Aus diesem Konzept ergeben sich zwei grundlegende Nachteile. Erstens werden sämtliche Störungen, die direkt auf das Produkt einwirken, wie Prozesskräfte während der Montage, nicht berücksichtigt. Zweitens können einmal eingetretene Positionsabweichungen aufgrund nicht vorhandener Kompensationsstrategien nicht ausgeglichen werden und führen somit zu einer sich stetig verschlechternden Synchronisationsgüte. Aus den beschriebenen Nachteilen resultiert, dass es für gesteuerte Systeme nicht möglich

ist, die Differenzen von Soll- und Ist-Pose von Roboter und Montagehauptkörper auszugleichen.

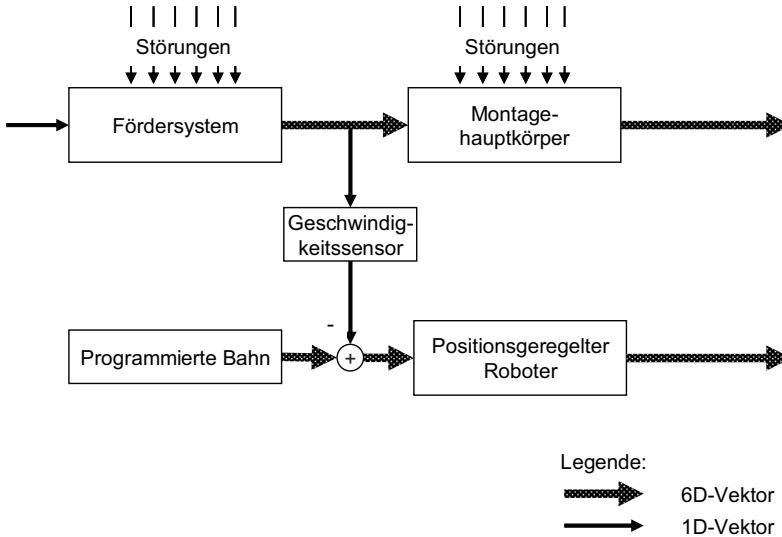


Abbildung 3-1: Prinzip der gesteuerten Synchronisation

Die Realisierung einer geregelten Synchronisation, wie sie in Abschnitt 2.4 vorgestellt wurden, ermöglicht den Ausgleich von Lageabweichungen in Förderrichtung zwischen Roboter und Montagehauptkörper. Erreicht wird dies, wie in Abbildung 3-2 dargestellt, durch die Messung der Ist-Position des Fördersystems mittels Lagesensoren und dem anschließenden Vergleich mit der Ist-Position des Roboters. Letztere wird nicht direkt gemessen, sondern von den gemessenen Achswerten der Robotergelenke errechnet. Die Differenz dieser Werte ist unter Berücksichtigung der Vorgabe von Offsets für die synchrone Bewegung die Eingangsgröße für die Regelung. Ein entscheidender Nachteil dieses Synchronisationsprinzips ist ebenfalls wie bei den gesteuerten Systemen die Nichtberücksichtigung der direkt am Produkt auftretenden Störgrößen.

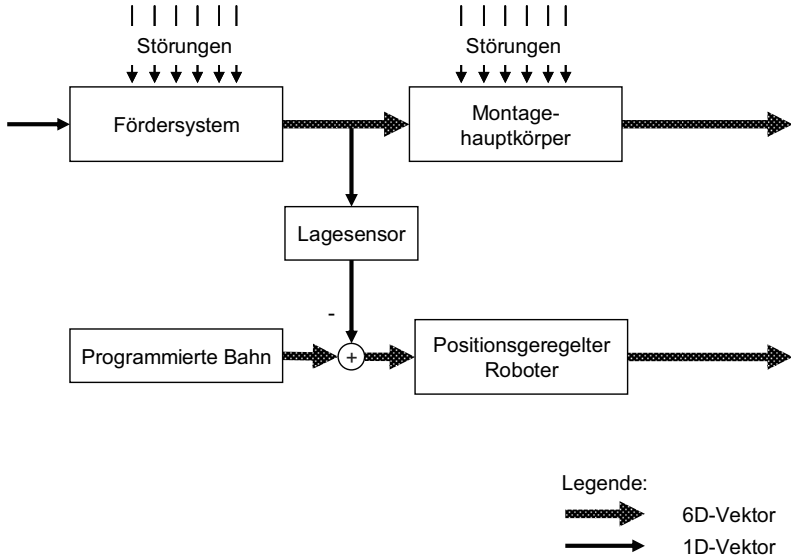


Abbildung 3-2: Prinzip der geregelten Synchronisation

Es kann daher festgehalten werden, dass die bisher verfolgten Synchronisationsansätze eine Rückführung der direkt am Montageobjekt auftretenden Positions- und Orientierungsabweichungen nicht berücksichtigen.

3.2 Aufbau der untersuchten Fördertechnik

3.2.1 Allgemeines

Die Fördermittel der technischen Logistik, welche in den Montagebereichen eines Unternehmens vorkommen, lassen sich in Anlehnung an die DIN 15201 TEIL 1 (1994) folgendermaßen klassifizieren:

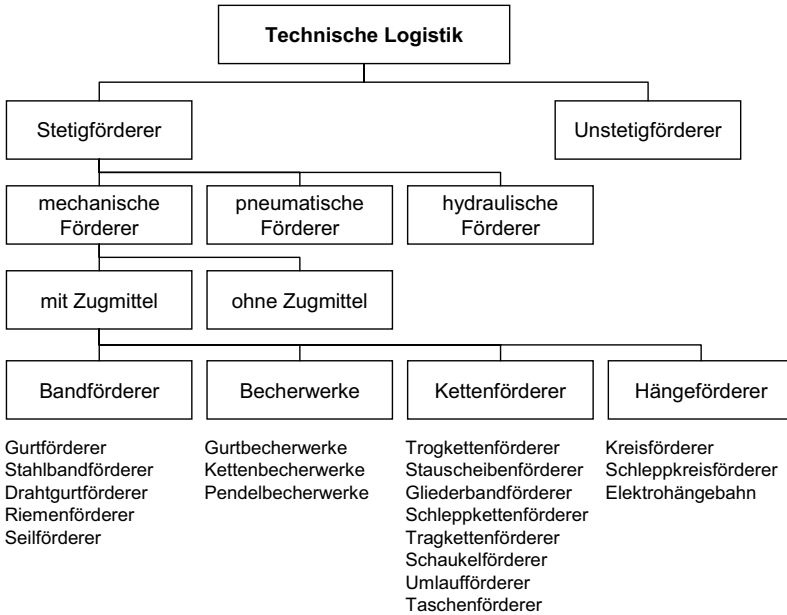


Abbildung 3-3: Klassifizierung der innerbetrieblichen Fördersysteme nach DIN 15201 TEIL 1 (1994)

Für den Einsatz in Fließmontagelinien sind aufgrund des gleichmäßigen, nicht unterbrochenen Transportes zumeist Stetigförderer im Einsatz. Stetigförderer sind mechanische, pneumatische oder auch hydraulische Fördereinrichtungen, bei denen das Fördergut auf festgelegtem Förderweg von der Aufgabe- zur Abgabestelle stetig, mit wechselnder Geschwindigkeit oder im Takt bewegt wird (DIN 15201 TEIL 1 1994). Diese Einteilung basiert lediglich auf dem Grundprinzip der Fördersystems, da nahezu sämtliche heutzutage eingesetzte Systeme einen mechatronischen Aufbau besitzen. In Fließlinien in der Montage werden zumeist mechanische Stetigförderer eingesetzt. Diese lassen sich wiederum in Stetigförderer mit Zugmittel oder ohne Zugmittel unterscheiden. Aufgrund der Art des Zugmittels wird darüber hinaus in folgende Systeme differenziert: (DIN 15201 TEIL 1 1994)

- Bandförderer sind Stetigförderer mit endlosem umlaufenden Band (z.B. Gut, Riemen, Seil) als Trag- und Zugorgan. Das Band wird von Tragrollen oder gleitend auf glatter Unterlage getragen.

- Becherwerke sind Stetigförderer mit Bechern als Tragorgane. Als Zugorgane dienen Ketten oder Gurte. Die Befüllung erfolgt durch Schöpfen oder Zuteilen, das Entleeren durch Abwurf oder Kippen der Becher.
- Kettenförderer sind Stetigförderer mit ein- oder mehrsträngiger, endloser, umlaufender Kette für waagerechtes, senkrechtes oder geneigtes Fördern oder für eine Kombination hiervon.
- Hängeförderer sind Stetigförderer, bei dem das Fördergut von Gehängen getragen wird, die von umlaufenden Zugkatzen gezogen oder durch Schwerkraft oder manuell bewegt werden. Die Fahrwerke der Gehänge laufen auf einem Schienenstrang.

In der automobilen Endmontage werden aufgrund der Art des Produktes und des Einsatzes als Verkettungselement einzelner Arbeitsstationen lediglich Ketten- und Hängeförderer eingesetzt. Wie in Abbildung 3-3 ersichtlich, lassen sich diese nach ihren weiteren Konstruktionsmerkmalen in eine Vielzahl von Varianten und Ausprägungen unterteilen. Wegen der Häufigkeit ihres Einsatzes in der automobilen Endmontage werden im Folgenden die Gliederbandförderer und EHB näher beleuchtet.

3.2.2 Gliederbandförderer

Gliederbandförderer sind eine Variante der Kettenförderer, welche aus sich überdeckenden, einzelnen oder gelenkig miteinander verbundenen Platten bestehen (DIN 15201 TEIL 1 1994). Sie werden durch endlose, zweisträngige Ketten angetrieben. Reiht man Platten als Aufbauten eines Gliederbandförderers endlos aneinander und verbindet sie mit einer zweisträngigen Kette, die als Zugmittel dient, bezeichnet man diese Systeme nach MARTIN (1978) als Plattenbandförderer. Angetrieben werden Plattenbandförderer durch Getriebemotoren über Kettenräder oder -sterne, wobei bei längeren Bändern auch mehrere Antriebe eingesetzt werden. Durch mittig angeordnete Ketten oder Verbindungsglieder der Platten lassen sich große Freiheitsgrade in der Linienführung erreichen und Förderstrecken mit nahezu beliebigen Raumkurven realisieren (JÜNEMANN & SCHMIDT 1999, KURTH 1983, SCHEFFLER 1973).

Beim Einsatz in der automobilen Endmontage stehen laut KOETHER (2001) die Fahrzeuge auf dem Plattenbandförderer zumeist auf den eigenen Rädern. Durch den Einsatz von Platten entsteht eine weitgehend geschlossene, gleichförmig be-

wegte und somit begehbare Fläche, siehe Abbildung 3-4. Daher werden Plattenbänder oft für manuelle Montagearbeiten eingesetzt (ARNOLD 2004).

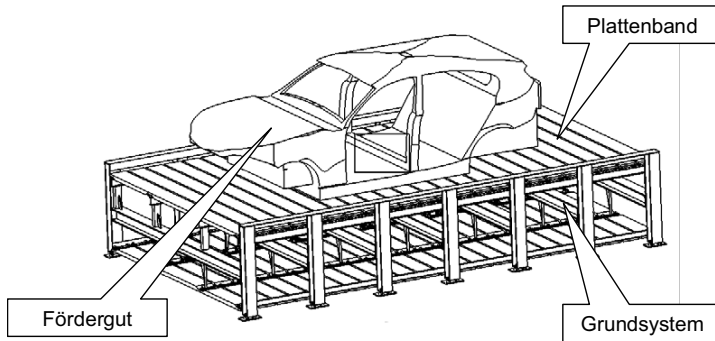


Abbildung 3-4: Aufbau eines Plattenbandes

3.2.3 Elektrohängebahn

Elektrohängebahnen (EHB) sind mechanische, flurfreie Fördersysteme (DIN 15201 TEIL 1 1994). Die Einschienen-Hängebahnen bestehen aus einer an der Hallendecke oder an Stützen befestigten Schienen, den EHB Fahrzeugen (Laufkatzen) und Gehängen, siehe Abbildung 3-5 (MARTIN 1978, ARNOLD 2004). An der Laufschiene sind zusätzlich die Stromschienen und das Fahrwerk angebracht. In Abhängigkeit vom Einsatzbereich sind die EHB mit zusätzlichen Funktionen, wie Auflaufbegrenzern oder einem in der Höhe verstellbaren sowie schwenkbaren Gehänge ausgestattet.

Bei einer Einschienen-Hängebahn bewegt sich eine Vielzahl von Laufkatzen entlang der Laufschiene. Jedes dieser Fahrzeuge verfügt über einen eigenen Antrieb. Daraus resultiert, dass die Abstände zwischen den Fahrzeugen und deren Einzelgeschwindigkeiten unterschiedlich sein können und somit ein kurzzeitiges Puffern von Materialien ermöglicht wird. Die EHB ist aufgrund dieser individuellen Steuerbarkeit ihrer Fahrzeuge im Fahrzeugbau und in anderen Bereichen, beispielsweise zur Zuführung und zum Transport von Bauteilen, vielfältig einsetzbar (KOETHER 2001).

In der automobilen Endmontage werden EHB vorwiegend dort eingesetzt, wo Arbeiten an der Unterseite der Karosserie stattfinden. Beispiele für diese Stationen sind die Montagen der Räder, der Abgasanlage und des Kraftstoffbehälters.

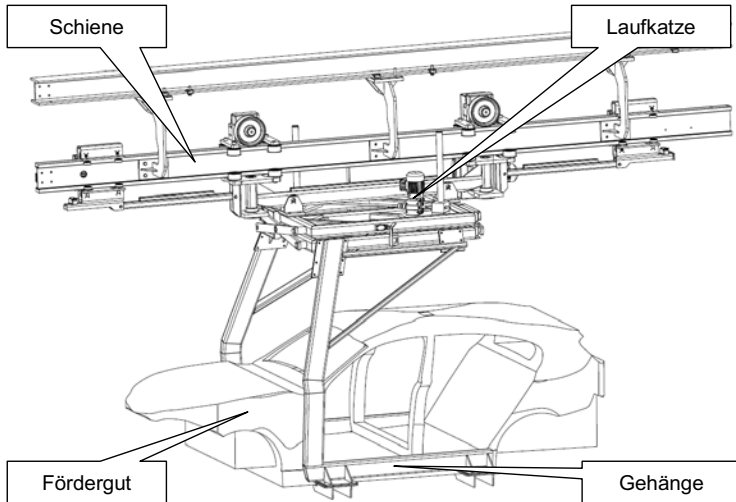


Abbildung 3-5: Aufbau einer Elektrohängebahn

3.3 Analyse des Laufverhaltens der Fördersysteme

3.3.1 Allgemeines

Da von DIRNDORFER (1993) Ungenauigkeiten im Laufverhalten von Förderbändern beschrieben wurden, die eine roboterbasierte förderbandsynchrone Fließmontage behindern, mussten diese genauer untersucht werden. Dafür wurde ein Messsystem ausgewählt, das Positionsdifferenzen in allen Freiheitsgraden detektieren kann. Daran anschließend wurden Messungen sowohl an Plattenbandförderern als auch an EHB durchgeführt.

3.3.2 Auswahl des Messsystems

Ziel der Untersuchungen war die Messung der Positionsabweichungen des Montagehauptkörpers von einer vorgegebenen Soll-Position während der Bewegung des Fördersystems. Die zu detektierenden Positionsdifferenzen können, laut Annahme, in allen translatorischen Freiheitsgraden auftreten.

Anforderungen an das Messsystem

Die Anforderungen an das einzusetzende Messsystem resultieren aus der Genauigkeit und dem zu erwartenden Installations- und Messaufwand. Die Genauigkeit des Systems sollte nach SCHÖNFELDER (1993) ein Viertel der zu messenden Werte betragen. Daher ergibt sich aufgrund der in der Literatur beschriebenen Positionsabweichungen in Förderrichtung eine Messgenauigkeit von mindestens 0,025 mm in den translatorischen Freiheitsgraden.

Der Installations- und Messaufwand ist von besonderer Bedeutung, da die Messungen teilweise während laufender Montagetätigkeiten durchgeführt werden sollen. Dies hat zur Folge, dass sowohl ein hoher Platzbedarf als auch eine zeitaufwendige Kalibrierung des Systems auszuschließen sind.

Möglichkeiten der Datenerfassung

Für die Lagemessung von Bauteilen steht eine Vielzahl von Messverfahren zur Verfügung. Die dreidimensionale Erfassung einer Bewegung eines Bauteils erfolgt jedoch zumeist mithilfe optischer Systeme. Dabei wird beispielsweise eine Platte mit Referenzmerkmalen an dem Bauteil befestigt und diese von einem externen optischen Messsystem erfasst. Nachteilig erweist sich bei diesen Systemen die Notwendigkeit eines ständigen Sichtkontaktes zwischen dem optischen Messsystem und dem Bauteil sowie ein zumeist hoher Kalibrationsaufwand. Vorteile der optischen Systeme sind die hohe Genauigkeit und direkte Messung von Positionen.

Neben der optischen Erfassung kann diese auch mit einem Beschleunigungsaufnehmer und der nachträglichen Integration der Messwerte zur Berechnung der Geschwindigkeits- und der Positionsdifferenzen realisiert werden. Diese Art der Messung ist in diesem Anwendungsfall möglich, da eine Angabe der absoluten Position und Geschwindigkeit nicht notwendig ist. Jede detektierte Beschleunigung resultiert in einer Positionsabweichung von der Soll-Position, da Soll- und Ist-Werte nur bei einer gleichförmigen Bewegung, also ohne Beschleunigungen, identisch sind. Ein Beschleunigungsaufnehmer ist ein Messwertaufnehmer zur Messung von Beschleunigungen, bei dessen Beschleunigung eine Kraft auf die in ihm montierte seismische Masse wirkt, die proportional zur Beschleunigung

$$F = ma \tag{1}$$

ist. Bei einem piezoresistiven Beschleunigungsaufnehmer, wie er in Abbildung 3-6 dargestellt ist, führt eine auftretende Beschleunigung zu einer Krümmung der

Biegebalken und somit zu einer Änderung der Widerstände der eingebauten Dehnungsmessstreifen. Bei der Verwendung von piezoresistiven Beschleunigungsaufnehmern können Beschleunigungen im Frequenzbereich von 0 Hz bis ~2 kHz gemessen werden.

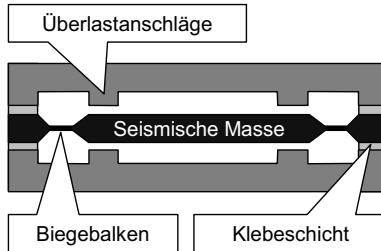


Abbildung 3-6: Aufbau eines piezoresistiven Beschleunigungsaufnehmers

Auswahl des Messsystems

Für die durchzuführenden Messungen wurde ein Beschleunigungsaufnehmer gewählt, weil ein optisches Messsystem den Montageablauf beeinträchtigen würde. Der notwendige Sichtkontakt zwischen Messsystem und Bauteil bzw. Fördersystem kann aufgrund der stattfindenden Montage nicht garantiert werden. Darüber hinaus wäre der Kalibrationsaufwand hoch und ein Verfolgen des Bauteils über einen längeren Bandabschnitt nicht möglich.

Versuchsplanung

Um die Beschleunigungen an der Karosserie in allen drei translatorischen Freiheitsgraden messen zu können, wurden drei jeweils orthogonal zueinander ausgerichtete piezoresistive Beschleunigungssensoren des Typs „ENDEVCO Microtron 7018-20“ verwendet und die jeweiligen Daten mithilfe eines Digital-Speicheroszilloskops des Typs „YOKOGAWA ScopeCorder 7018-20“ unter Verwendung eines Tiefpassfilters mit einer Eckfrequenz von 40 Hz aufgezeichnet. Der Tiefpass dient der Unterdrückung des systeminternen Rauschens.

Die Beschleunigungsaufnehmer befanden sich bei allen Messreihen an der Innenseite der Crashbox im Motorraum des Fahrzeuges, um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit zu garantieren.

Im Rahmen der Messungen wurden je 10 Prüfläufe an der Elektrohängebahn und am Plattenband durchgeführt. Die Prüfläufe an der Elektrohängebahn fanden im Versuchsaufbau statt, die Messungen am Plattenband bei einem Projektpartner.

Die Prüfläufe wurden am fahrenden Band durchgeführt, es wurden keine Start- und Stopprampen berücksichtigt. Die Messungen stellen somit nicht die absolute Position des Förderbandes über die Zeit dar, sondern die relative Abweichung zu einer als konstant angenommenen Bewegung.

Nach der Aufzeichnung der Messdaten wurden die Beschleunigungsverläufe durch einen Hochpass mit einer Eckfrequenz von 0,2 Hz gefiltert. Dadurch werden etwaige Offsets, beispielsweise durch Höhendifferenzen des Tragwerks, Positionierungsfehler des Sensors an der Crashbox oder Änderung in der Neigung des Sensors (Verkippen) während der Fahrt des Förderbandes unterdrückt.

Die Bestimmung der Geschwindigkeits- und Positionsschwankungen um die angenommene Konstantgeschwindigkeit erfolgt durch die numerische Integration der Messwerte. Aufgrund der hohen Abtastrate (20 kHz) im Verhältnis zu den betrachteten Signalfrequenzen (40 Hz) werden die systematischen Fehler beim numerischen Integrieren minimiert. Die verbleibende Messungenauigkeit ist sowohl frequenz- als auch amplitudenabhängig, d. h. das mit steigender Frequenz und Amplitude die Messungenauigkeit steigt. Im untersuchten Frequenzbereich wird jedoch selbst bei Addition der maximalen Systemfehler eine Ungenauigkeit von max. 5% nicht überschritten.

Die im folgenden Kapitel aufgeführten Daten entsprechen den jeweiligen Durchschnitten der maximalen Messwerte aller Läufe.

3.3.3 Laufverhalten des Plattenbandförderers

Der untersuchte Plattenbandförderer befördert Fahrzeuge im Bereich der Innenraummontage. Die Soll-Geschwindigkeit des Fördersystems beträgt 6 m/min. Die Abbildung 3-7 zeigt die Ausrichtung des Koordinatensystems, welchem die folgenden Abbildungen und Auswertungen zugrunde liegen. Die Daten wurden während des Leerlaufes des Bandes erfasst, d.h. zur Zeit der Messdatenaufzeichnung fand keine Montage statt.

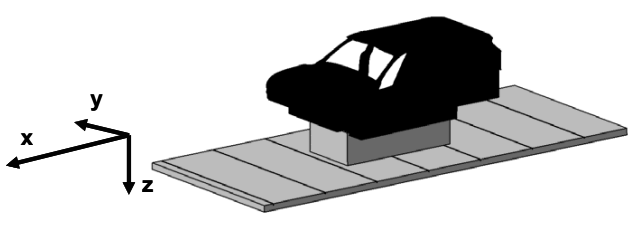


Abbildung 3-7: Koordinatensystem des Plattenbandes

Die detektierten Beschleunigungen sind in Abbildung 3-8 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Plattenband neben den Schwingungen in Förderrichtung auch Schwingungen sowohl zur Seite als auch in der Höhe aufweist. Die maximal aufgezeichneten Werte sind dabei in z-Achse zu finden und betragen bis zu $\pm 900 \text{ mm/s}^2$. Die weiteren Achsen erreichen Messwerte von bis zu $\pm 270 \text{ mm/s}^2$ in Förderrichtung und bis zu $\pm 795 \text{ mm/s}^2$ in der y-Achse.

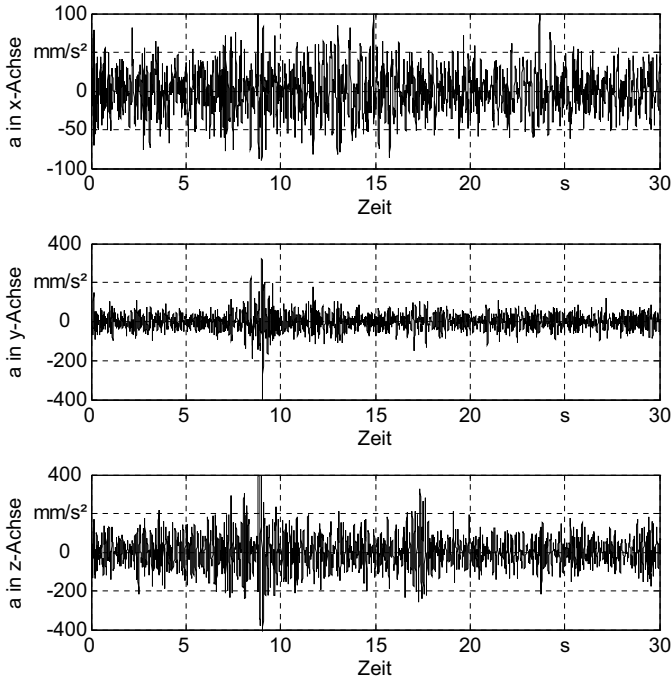


Abbildung 3-8: Messrieb für die auftretenden Beschleunigungen am Plattenbandförderer

Durch die zweifache Integration der aufgenommenen Beschleunigungsdaten ergeben sich die Abbildung 3-9 dargestellten Differenzen zwischen der Ist- und der Soll-Position des Montagehauptkörpers während des Verfahrens des Plattenbandes. Es ist ersichtlich, dass die gemessenen Beschleunigungen in allen translatorischen Freiheitsgraden zu signifikanten Positionsdifferenzen führen. Die maximalen Differenzen im gemessenen Zeitintervall betragen in Förderrichtung (x -Achse) $\pm 1,13$ mm, quer zur Förderrichtung (y -Achse) bis zu $\pm 1,24$ mm und in der Höhe (z -Achse) bis zu $\pm 1,7$ mm. Darüber hinaus sind die gemessenen Positionsabweichungen stochastisch verteilt.

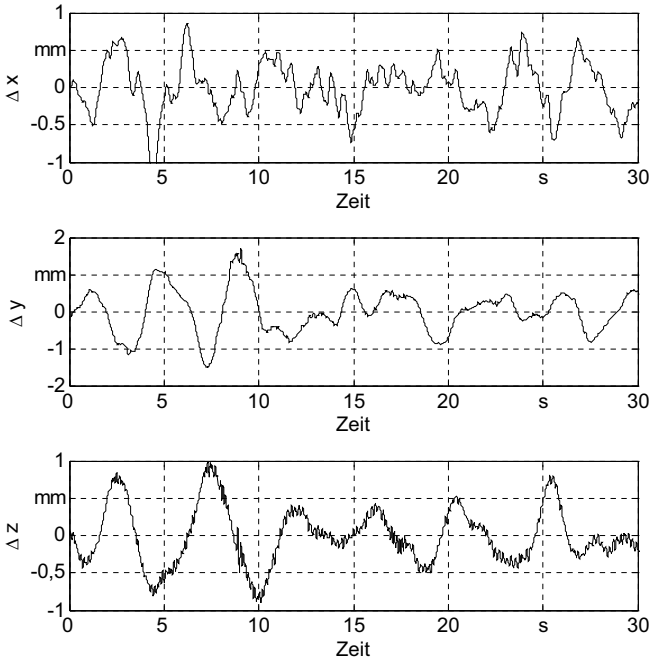


Abbildung 3-9: Messschrieb für die Positionsabweichungen am Plattenbandförderer

Die Analyse der fouriertransformierten Positionsabweichungen ergibt, dass der Großteil der für die Differenzen verantwortlichen Frequenzen im Bereich bis 1 Hz liegt. Wie in Abbildung 3-10 ersichtlich, gilt dies für alle gemessenen Achsen. Höhere Frequenzen, die in der Fouriertransformation der Beschleunigungen detektiert werden konnten, haben nur geringe Auswirkungen auf die Positionsabweichungen.

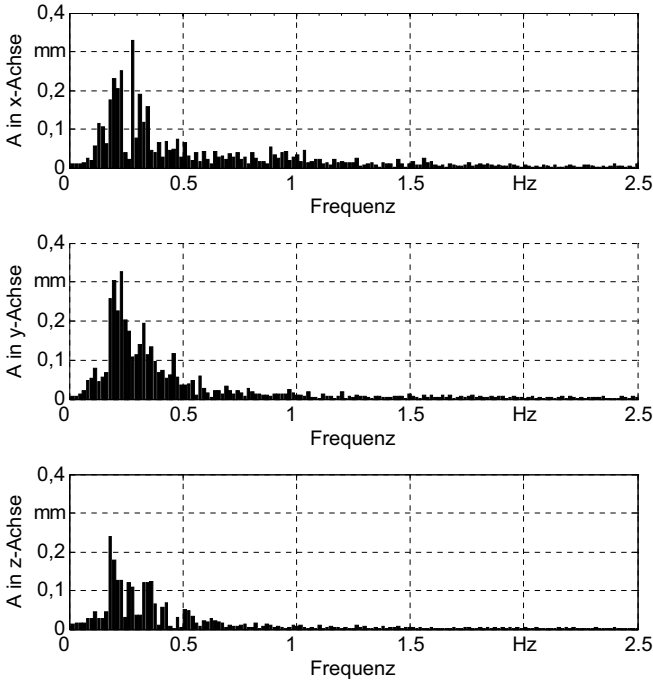


Abbildung 3-10: Frequenzanalyse der Positionsabweichungen (A-Amplitude)

3.3.4 Laufverhalten der Elektrohängebahn

Die Messungen an der EHB wurden am zur Verfügung stehenden Versuchsaufbau vorgenommen. Die vorhandene EHB erreicht eine Maximalgeschwindigkeit von 6 m/min. Abbildung 3-11 zeigt das im Folgenden verwendete Koordinatensystem. Die Versuchsreihen wurden ohne externe Einwirkungen wie beispielsweise Montagetätigkeiten am Fahrzeug durchgeführt. Daher resultieren sämtliche aufgezeichneten Schwingungen aus systeminhärenten Störquellen.



Abbildung 3-11: Koordinatensystem der EHB

Die in Abbildung 3-12 an einem Prüflauf dargestellten Beschleunigungsverläufe zeigen deutliche Abweichungen von einer konstanten Bewegung. So wurden in der Förderrichtung eine durchschnittliche maximale Beschleunigung über alle Prüfläufe von $\pm 78 \text{ mm/s}^2$ gemessen. Der Durchschnitt der Maxima in der seitlichen Bewegung liegt bei $\pm 86 \text{ mm/s}^2$ und in der z-Achse von $\pm 90 \text{ mm/s}^2$.

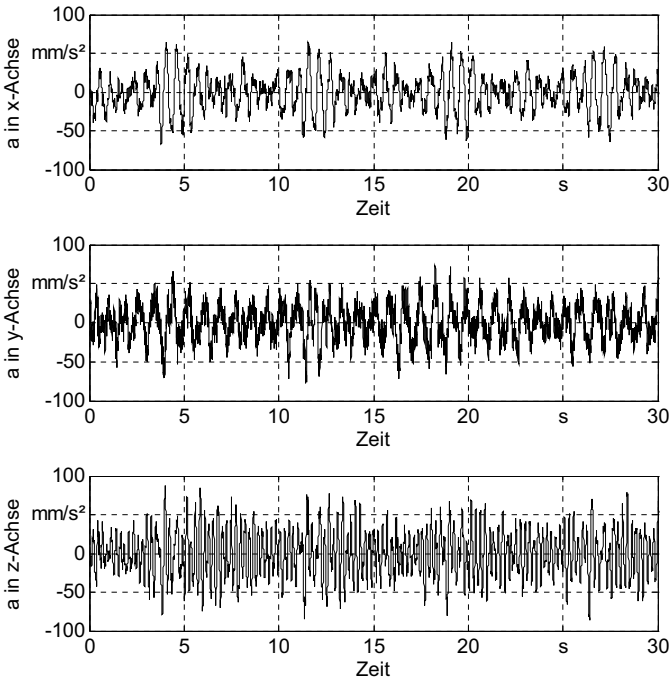


Abbildung 3-12: Messschrieb für die auftretenden Beschleunigungen an der EHB

Die berechneten Differenzen zwischen Soll- und Ist-Lage der Elektrohängebahn sind in Abbildung 3-13 dargestellt. Der Durchschnitt der maximalen Abweichungen über die Prüfläufe beträgt $\pm 1,7$ mm und ist in der seitlichen Bewegung zu finden. Diese resultieren sowohl aus Eigenschwingungen als auch einer Pendelbewegung der Laufkatze mit Gehänge und Fahrzeug um die Schiene. Zusätzlich sind deutliche Abweichungen auch in der Förderrichtung und der Höhe mit jeweils bis zu ± 1 mm zu verzeichnen.

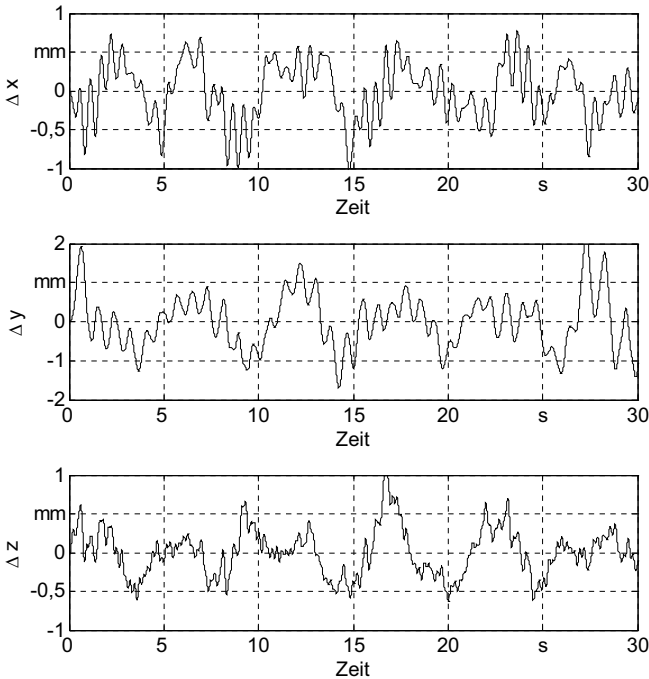


Abbildung 3-13: Messschrieb für die Positionsabweichungen der EHB

Mit Hilfe der Fouriertransformation kann auch bei der EHB festgestellt werden, dass die Mehrheit der zu Posedifferenzen führenden Schwingungen im Bereich bis 2 Hz liegen. Die Auswirkungen der oberhalb dieses Bereiches detektierten Frequenzen sind vernachlässigbar, da sie im Bereich der Messunsicherheit liegen. Die Darstellung der Frequenzanalyse der Positionsabweichungen erfolgt in Abbildung 3-14.

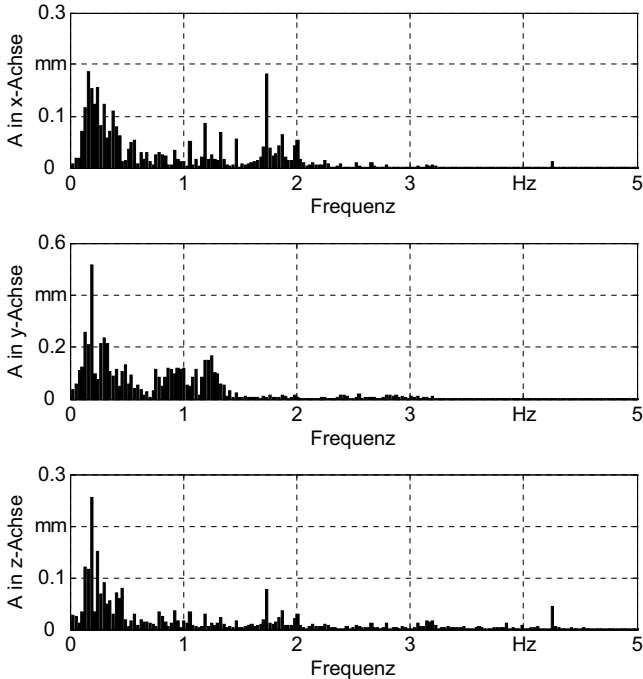


Abbildung 3-14: Frequenzanalyse der Positionsabweichungen (A-Amplitude)

3.4 Analyse der eingesetzten Robotertechnik

3.4.1 Allgemeines

In vielen Fachbüchern wie z. B. ANGELES (2003), CRAIG (2005), KURFESS (2005), MCKERROW (1995) und PAUL (1981) werden die Grundlagen der stationären Robotik ausführlich behandelt. Dennoch sollen die wichtigsten Punkte, die für den weiteren Verlauf dieser Arbeit notwendig sind, kurz angesprochen werden.

Laut der Definition nach VDI RICHTLINIE 2860 (1990) sind Industrieroboter universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei, d.h. ohne me-

chanischen Eingriff, programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen.

3.4.2 Kinematik

Als Kinematik eines Roboters wird dessen Aufbau aus Gliedern und Gelenken bezeichnet (VDI-RICHTLINIE 2861 - BLATT 1 1988). Besteht der Weg von der Roboterbasis bis zum Endeffektor aus nur einer kinematischen Kette, so spricht man von einem seriellen Roboter. Wird der Endeffektor durch mehrere kinematische Ketten bewegt, dann handelt es sich um einen parallelen Roboter. Für serielle und parallele Kinematiken sind jeweils verschiedene Strukturen möglich. Davon haben sich nur wenige im industriellen Einsatz durchgesetzt (DIN EN ISO 9787 2000). Bei den seriellen Robotern sind das vor allem die Portalroboter, SCARA-Roboter und 6-Achsen-Knickarm-Roboter. Hexa- bzw. Pentapoden sind die üblichen Typen paralleler Manipulatoren.

Da sich die vorliegende Arbeit mit 6-Achsen-Knickarm-Robotern beschäftigt, wird in der Folge auch nur auf diese eingegangen. Die Abbildung 3-15 zeigt den allgemeinen Aufbau eines solchen Roboters.

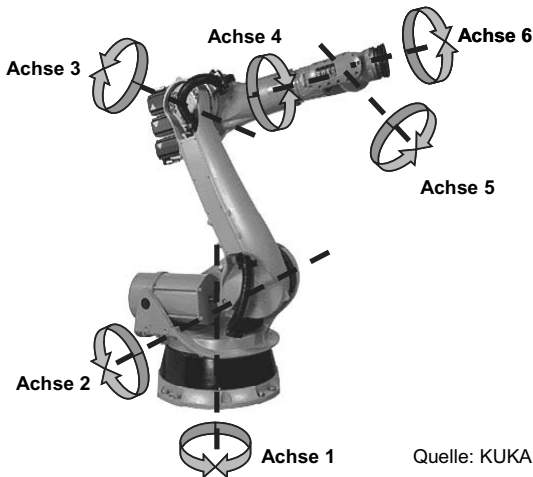


Abbildung 3-15: Aufbau eines 6-Achsen-Knickarm-Roboters

3.4.3 Robotersteuerung

Die Steuerung von Industrierobotern soll dem Anwender ermöglichen, Bewegungsabläufe eines Roboters entlang festgelegter Bahnen, zu festgelegten Punkten, mit frei definierbaren Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerten, gepaart mit Steueraktivitäten der Peripherie frei zu programmieren und diese im Anschluss auszuführen. Die grundlegende Struktur von Robotersteuerungen ist in Abbildung 3-16 dargestellt.

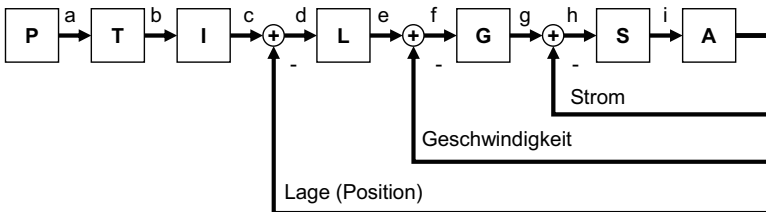


Abbildung 3-16: Struktur einer Robotersteuerung nach LANGE (2003)

Mit der Auswahl eines Roboterprogrammes wird der Bahn Speicher (P) mit den kartesischen Koordinaten und Orientierungen des Endeffektors für die beim Teach-in eingegebenen Bahnstützpunkte (a) geladen. Für jeden dieser Punkte erfolgt dann eine Rückwärtstransformation (T). Dadurch werden die Achsstellungen (b) bestimmt, die den Punkt und seine Orientierung repräsentieren. Aufgrund der mit meist mehrdeutigen Kinematikstrukturen behafteten Roboterkonfigurationen hängt die berechnete Achsstellung in der Regel von den benachbarten Stützpunkten der Robotertrajektorie ab, um Unstetigkeiten in der Bewegung zu vermeiden. Online erfolgt dann zu jedem Punkt die Interpolation (I) des Bahnverlaufs zwischen den Bahnstützpunkten. Auf diese Weise werden für jede Achse und jeden Abtastzeitpunkt der Regelung die Soll-Positionen (Soll-Gelenkwinkel) in Roboterkoordinaten (c) festgelegt. Die Regelung erfolgt meist als Kaskadenregelung. Damit sind drei ineinander verschachtelte Regelkreise für Motorstrom (S), Soll-Geschwindigkeit (G) und Soll-Position (L) gemeint. Die Differenz (d) aus Soll-Position und aktueller Achsposition ergibt die Soll-Geschwindigkeit (e). Aus der Differenz (f) von Soll-Geschwindigkeit und aktueller Achsgeschwindigkeit werden die Soll-Werte für den Strom (g) berechnet. Im innersten Regelkreis wird mithilfe der Stromdifferenz (h) der Strom (i) geregelt, mit welchem die einzelnen Achsen des Roboterarms (A) angesteuert werden.

Neben der reinen Kaskadenregelung, die bei fast allen kommerziellen Robotersystemen im Einsatz ist, sind auch andere Regelungskonzepte zur Positionsregelung entwickelt worden. Dazu zählen vor allem die modellbasierte Regelung (CRAIG 2005), aber auch Ansätze mit Zustandsreglern, adaptiven Reglern (ASTRÖM & WITTENMARK 1995, ORTEGA & SPONG 1989), Fuzzy-Reglern und Regelungen, die auf neuronalen Netzen (PEINEMANN 1995) basieren. Diese alternativen Konzepte zur Positionsregelung finden aber bisher laut WINKLER (2006) keinen industriellen Einsatz.

3.4.4 Dynamik von Industrierobotern

Als Dynamik eines Industrieroboters bezeichnet man sein Bewegungsverhalten unter dem Einfluss einwirkender Kräfte und Momente. Dieses Bewegungsverhalten kann mittels der in der DIN EN ISO 9283 (1990) definierten Kennzahlen beschrieben werden. Zu diesen Kennzahlen zählen sowohl Pose- als auch Bewegungskenngrößen. Diese Kenngrößen beziehen sich jeweils auf eine bekannte, zumeist geteachte Bahn. Eine durch geteachte Stützpunkte beschriebene Bahn wird von der Steuerung dahingehend optimiert, dass ein möglichst bahntreues und schnelles Abfahren der Bahn ermöglicht wird. Die in der DIN aufgeführten Kenngrößen beschreiben jedoch nicht die Reaktionszeiten von Robotern auf unvorhergesehene Ereignisse, wie sie bei Sensorführung eintreten können. Daher ist es notwendig, neben den Beschleunigungen, die ein Roboter auf einer bekannten Bahn fahren kann, auch die Verfahrensparameter auf unbekannt Bahnen zu bestimmen. Darüber hinaus sind die Beschleunigungswerte eines Roboters bahnabhängig. Insbesondere die Länge einer Bewegung bestimmt die maximalen Beschleunigungs- und Geschwindigkeitswerte.

Die Bestimmung der dynamischen Kenngrößen Beschleunigung und Geschwindigkeit erfolgt nach DIN EN ISO 9283 (1990) wonach der Roboter mit Nennlast eine definierte Prüfbahn abfährt. Die Prüfbahn, siehe Abbildung 3-17, gibt eine Abfolge von Grundbewegungen vor, wobei die Skalierung der Prüfbahn der Prüfaufgabe angepasst werden kann. Für die vorliegenden Messungen wurde eine Größe von 200x200 mm gewählt. Aufgrund dieser Skalierung betragen die Abstände zwischen den Punkten P_{26} bis P_{33} jeweils 5 mm und stellen somit den bei der förderbandsynchronen Montage zu erwartenden maximalen Verfahrensreich bei Bahnkorrekturen dar. Der Bereich ist in Abbildung 3-17 markiert. Da die Bahn keine Orientierungsänderungen enthält, wird sie in drei zueinander orthogonalen Ebenen befahren. Für jeden Versuch wurden je 10 Prüfläufe durchge-

führt. Als Messsystem wurde die in Unterabschnitt 3.3.2 beschriebene Systemtechnik eingesetzt. Für die Messungen stand ein KUKA KR 180 2000 (KUKA ROBOTER 2004) zur Verfügung.

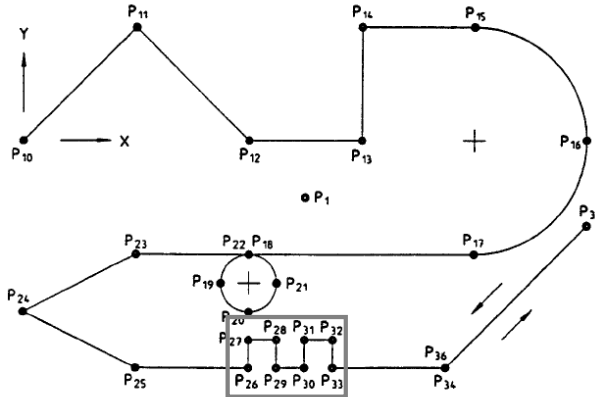


Abbildung 3-17: Prüfbahn nach DIN EN ISO 9283 (1990)

Abbildung 3-18 zeigt den Messschrieb eines vollständigen Prüfdurchganges. Die Beschleunigungen wurden jeweils in den Koordinatenachsen des Roboterbasiskoordinatensystems aufgezeichnet. Für die Messungen wurden die Bahnen ohne Überschleifen einzelner Punkte befahren, um eine Vergleichbarkeit mit der sensorgeführten Bahn zu ermöglichen. Die markierten Bereiche in Abbildung 3-18 stellen den in Abbildung 3-17 ebenfalls markierten Bereich zwischen den Punkten P_{26} bis P_{33} dar. Dieser Bereich wird in jeder Ebene ein Mal durchfahren, so dass bei der kumulierten Darstellung in Abbildung 3-18 dieser insgesamt drei Mal vorhanden ist. Es ist deutlich zu erkennen, dass es einen direkten Zusammenhang zwischen der Beschleunigung und der jeweiligen Länge der einzelnen Teilstrecke gibt. Die Messungen zeigen, dass die Reduzierung einer Teilstrecke zu einer Verringerung der maximalen Beschleunigung auf dieser Teilstrecke führt. Eine mögliche Erklärung dieser Tatsache ist das Vorhandensein einer Vorsteuerungskomponente in der Robotersteuerung, die in Abhängigkeit der zukünftigen Trajektorie nicht nur die Geschwindigkeiten, sondern auch die Beschleunigungen glättet bzw. dämpft.

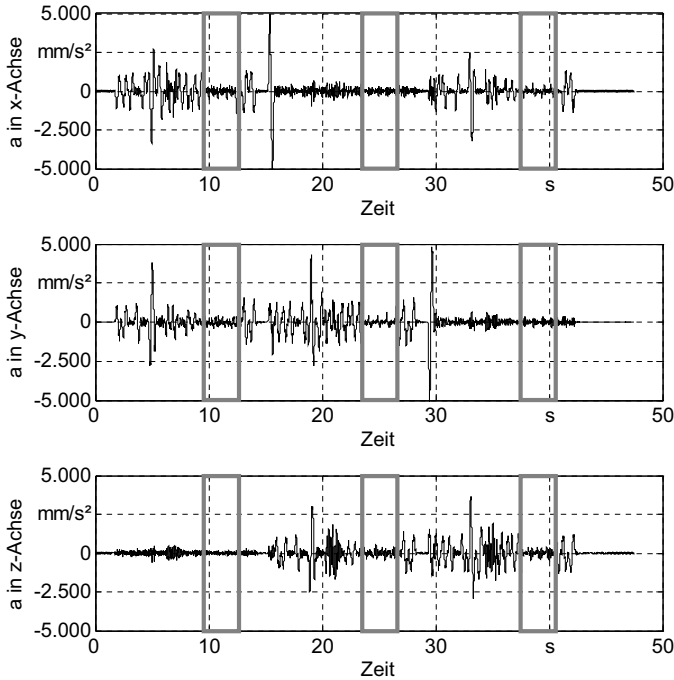
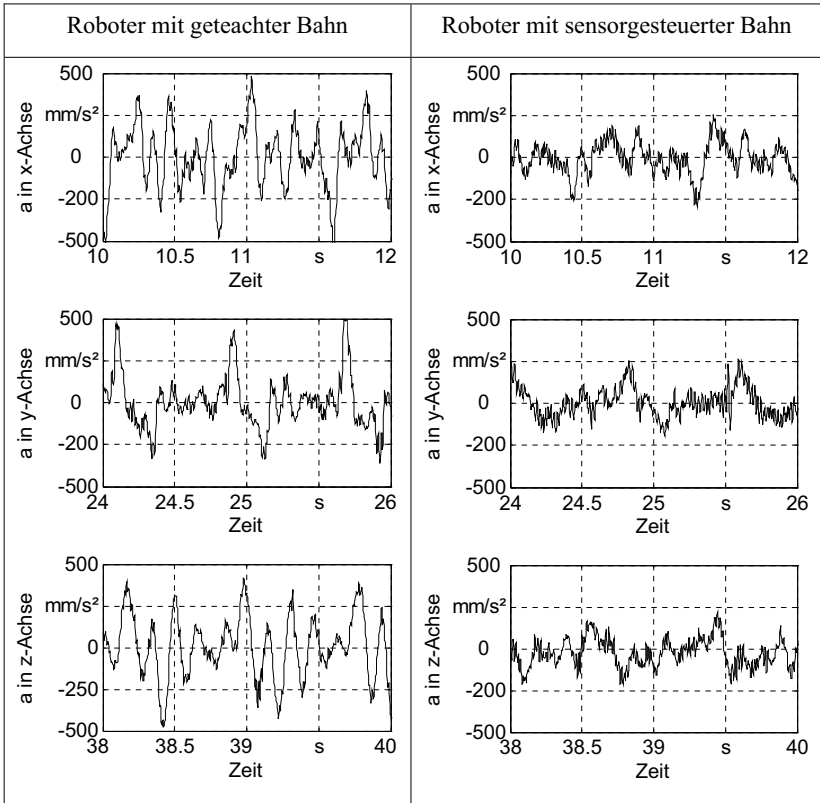


Abbildung 3-18: Prüfbahn und resultierende Beschleunigungsverläufe

Den maximalen Beschleunigungen des Roboters bei geteachter Bahn wurden in einem weiteren Testlauf die Beschleunigungen bei sensorgeführter Bahn gegenüber gestellt. Dafür wurde in einem ersten Schritt die geteachte Bahn abgefahren und in jedem Abtastschritt die Ist-Punkte der Prüfbahn aus den Ist-Achswerten aufgezeichnet. Diese Daten wurden mithilfe eines simulierten Sensors über die Sensorschnittstelle Robot Sensor Interface (RSI) dem Roboter als Soll-Trajektorie zur Verfügung gestellt.

Eine Gegenüberstellung der realisierten Beschleunigungen des Roboters mit geteachter und sensorgeführter Bahn im Bereich der Punkte P_{26} bis P_{33} der Prüfbahn ist in Tabelle 3-1 dargestellt. Es ist daraus ersichtlich, dass beim Abfahren der geteachten Bahn in allen Achsen des Koordinatensystems deutlich höhere Beschleunigungswerte als bei der sensorgeführten Bahn erreicht werden. Dies liegt an einer roboterinternen Filterung, die eine Überlastung der einzelnen Roboterelenke vermeiden soll und daher einen externen Sensor als pt_n -Glied dämpft.

Tabelle 3-1: Gegenüberstellung von Beschleunigungen eines Roboters mit geteachter und sensorgesteuerter Bahn in den Koordinatenachsen des Weltkoordinatensystems (Zeit ab 1. Messwert)



Der Vergleich der jeweiligen Ist-Trajektorien bei geteachter und sensorgeführter Bahn ergibt die in Tabelle 3-2 aufgeführten Differenzen, siehe auch Anhang. Die ermittelten Posedifferenzen ergeben sich durch den Vergleich einzelner Punkte der Trajektorien zum gleichen Zeitpunkt. Die Bestimmung der Zeitdifferenzen erfolgt anhand der Berechnung von jeweils korrespondierenden Punkten. Als korrespondierende Punkte gelten diejenigen Punkte auf den Bahnen, die den geringsten Abstand zueinander besitzen.

Tabelle 3-2: Bahndifferenzen zwischen geteachter und sensorgeführter Bahn

Mittl. Pose-differenz in mm	Max. Pose-differenz in mm	Mittl. Zeit-differenz in s	Min. Zeit-differenz in s	Max. Zeit-differenz in s
0,390	4,921	-0,149	-0,072	-0,240

Die sensorgeführte ist gegenüber der geteachten Bahn um durchschnittlich ~150 ms und maximal 240 ms verzögert. Diese Verzögerung resultiert sowohl aus der eigentlichen Totzeit der Robotersteuerung als auch dynamischen Effekten des Roboterarmes, wie beispielsweise aufgrund der Massenträgheit.

Aus den Messwerten lässt sich schlussfolgern, dass mit Hilfe eines Roboters ohne zusätzliche Hilfssysteme eine Frequenz von 2-3 Hz stabil geregelt werden kann. Dieser Schlussfolgerung liegt Nyquist-Shannon'sche Abtasttheorem zugrunde, dass für eine stabile Regelung eine mindestens doppelt so hohe Abtastfrequenz notwendig ist (SHANNON 1949). Bei der Bestimmung dieses Wertes wurde jedoch lediglich die Totzeit des Robotersystems betrachtet. Bei Verwendung von zusätzlicher Sensorik verringert sich die zu realisierende Regelungsfrequenz proportional zur Totzeit des Sensorsystems. Das heißt, dass bei der Verwendung beispielsweise eines Bildverarbeitungssystems und einer angenommenen Verarbeitungsdauer der Bilddaten von durchschnittlich 100 ms lediglich eine Frequenz von 1 Hz stabil geregelt werden kann.

3.5 Zusammenfassung und Präzisierung des Handlungsbedarfs

Für die automatisierte förderbandsynchrone Montage ist eine präzise Positionierung der Bauteile zueinander erforderlich. Hierfür stehen verschiedene Synchronisationsprinzipien zur Verfügung, mit welchen eine möglichst hohe Positioniergenauigkeit zwischen Roboterwerkzeug und Montagehauptkörper erreicht wird. Diese Prinzipien basieren auf mechanischen, gesteuerten oder geregelten Kopplungen.

Alle bisherigen Ansätze basieren auf der Minimierung der Differenzen zwischen Roboter und Fördersystem in Förderrichtung. Dafür werden die Abweichungen entweder der Geschwindigkeit oder der Position bestimmt und mithilfe von geeigneter Systemtechnik ausgeglichen. Aufgrund der durchgeführten Analyse

kann jedoch festgehalten werden, dass diese Ansätze nicht ausreichen, um die angestrebte Synchronisationsgüte zu erreichen. Aufgrund einer Vielzahl bisher nicht berücksichtigter Störgrößen, wie beispielsweise Schwingungen des Fördersystems um die Förderrichtung oder Toleranzen in den Führungen des Fördersystems, ergeben sich Positionsdifferenzen zwischen Roboter-TCP und Montagehauptkörper in sechs Freiheitsgraden.

Über die beschriebenen Nachteile hinaus sind die bisher eingesetzten Montagesysteme Sonderanlagen und daher durch geringe Flexibilität gekennzeichnet. Vorhandene Ansätze zur Gestaltung flexibler Automatisierungssysteme sind im Rahmen der im Stand der Technik beschriebenen Anlagen zur förderbandsynchronen Montage nicht zum Einsatz gekommen.

Die durchgeführten Messungen haben darüber hinaus gezeigt, dass die notwendige Regelgeschwindigkeit durch einen Roboter nur bedingt erreicht werden können. Aufgrund der vorhandenen Positionsdifferenzen zwischen einer geteachten und einer sensorgeführter Bahn muss auch hier eine Möglichkeit zum Ausgleich gefunden werden.

Für die Entwicklung eines allgemeingültigen und übertragbaren Prinzips für die Synchronisation eines Roboters mit einem Montagehauptkörper für die automatisierte, förderbandsynchrone Montage ergeben sich die folgenden Schwerpunkte der Arbeit.

Es ist notwendig, ein Synchronisationsprinzip zum Ausgleich von Posedifferenzen in sechs Freiheitsgraden zu entwickeln. Besondere Aufmerksamkeit gilt dabei der Auswahl der Synchronisationsstrecke, um die realen Schwingungen des Montagehauptkörpers zu erfassen und somit einer Regelung zugänglich zu machen. Ein weiterer Kern des Synchronisationsprinzips liegt in der Entwicklung von Maßnahmen zum passiven Ausgleich von Posedifferenzen zwischen Montagehauptkörper und Roboter. Diese sind notwendig, um nicht regelbare Schwingungen des Montagehauptkörpers ausgleichen zu können.

Für das Montieren von Bauteilen mittels der förderbandsynchronen Montage ist ein geeignetes Vorgehensmodell zu formulieren, welches unter Anwendung des Synchronisationsprinzips einen Montageprozessablauf ermöglicht.

Darüber hinaus ist die Analyse und Auswahl geeigneter Prozesssensorik notwendig, die die nötigen Prozessdaten erfasst und diese in geeigneter Form der Robotersteuerung zur Verfügung stellt.

Darauf aufbauend ist ein Pilotsystem zur Validierung der Methode zur förderbandsynchronen Montage zu realisieren. Anhand dieser Anlage ist die Methode zu testen und zu bewerten.

4 Anforderungen an die roboterbasierte förderband-synchrone Montage

4.1 Technische Anforderungen

4.1.1 Allgemeines

Die Hauptanforderung an eine roboterbasierte förderbandsynchrone Montageanlage ist die vollständige Synchronisation des Handhabungsgerätes mit dem Montagehauptkörper. Synchronisation bedeutet basierend auf den griechischen Wörtern *syn*, „zusammen“ und *chrónos*, „Zeit“ den „Gleichlauf zwischen Vorgängen, Maschinen oder Geräten herstellen“ [DUDEN 2001]. Als Herstellen von Gleichlauf zwischen den zu synchronisierenden Systemen wird im Rahmen dieser Arbeit die Minimierung der geometrischen Abweichung der zu betrachtenden Systeme zueinander innerhalb eines definierten Zeitraums und einer definierten Wegstrecke verstanden.

Als größte Herausforderung für die Synchronisation erweist sich das unvorhersehbare, aber nicht vernachlässigbare Schwingen des Montagehauptkörpers. Dies resultiert beispielsweise aus Geschwindigkeitsschwankungen des verwendeten Fördersystems oder es sind selbst- bzw. fremdangeregte Schwingungen. Dieses Schwingen bewirkt Abweichungen zwischen der aktuellen Ist- und der Soll-Position sowie Orientierung des Montagehauptkörpers.

Die grundlegenden technischen Anforderungen an eine Methode und ein System für die förderbandsynchrone Montage betreffen die Einzelpunkte:

- Positioniergenauigkeit
- Montageprozess
- Sicherheit

4.1.2 Positioniergenauigkeit

Bei der Bestimmung der Genauigkeit von Robotern wird zwischen den Pose- und Bahnkenngrößen unterschieden (DIN EN ISO 9283 1999). Die Begriffe Posewiederholgenauigkeit und Poseabsolutgenauigkeit werden üblicherweise für den anzufahrenden Endpunkt einer Bewegung verwendet (DIN 55350-11:2007-03, DIN EN ISO 9283, VDI-RICHTLINIE 2861 - BLATT 1). Sie bezeichnen die Fähigkeit eines Industrieroboters, einen gegebenen Raumpunkt innerhalb eines bestimmten Kugelradius zu positionieren. Die Genauigkeitsangaben beschreiben hierbei die mittlere Abweichung des TCP und seiner Orientierung in sechs Freiheitsgraden zu einem vorgegebenen Arbeitsraumpunkt und einer vorgegebenen Orientierung. Demgegenüber gibt die Bahnwiederholgenauigkeit an, wie exakt ein Roboter in der Lage ist, seinen TCP auf einer programmierten Bahn unabhängig von der Programmiermethode unter gleichen Bedingungen beliebig oft innerhalb eines bestimmten Radius um die gemittelte Bahn zu bewegen (DIN EN ISO 9283 1999).

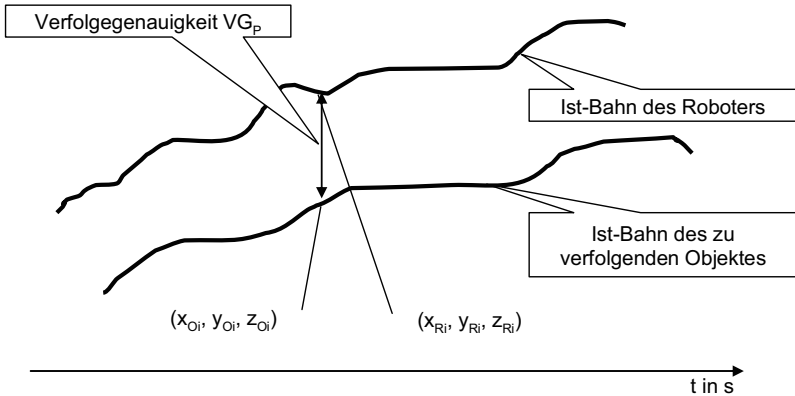
DIRNDORFER (1993) stellt fest, dass keine dieser Größen die Ungenauigkeit spezifiziert, die aus dem Übergang von einer Taktstation zu einem förderbandsynchron arbeitenden Robotersystem resultiert. Die Genauigkeitskenngröße, welche die Lageabweichung zwischen einem bewegten Hauptkörper und dem dazu synchron bewegten Werkzeug in Förderrichtung darstellt, definiert er als Verfolgegenauigkeit. Diese bezeichnet die Lageabweichung zwischen Montagehauptkörper und Werkzeug in Förderrichtung unter variierenden Bewegungszuständen des Fördersystems.

Im Rahmen dieser Arbeit muss dieser Begriff jedoch weiter präzisiert werden, da in dieser Arbeit die Verfolgegenauigkeit in allen Raumrichtungen betrachtet wird. Daher wird diese in Anlehnung an die Bahnwiederholgenauigkeit wie folgt definiert:

Die Verfolgegenauigkeit ist die Posedifferenz zwischen einem zu definierendem Punkt am Montagehauptkörper und dem Roboter-TCP unter variierenden Bewegungszuständen des Fördersystems.

Die Verfolgegenauigkeit ist somit durch die größte Bahnabweichung in Position und Orientierung entlang des Synchronisationsweges gekennzeichnet. Die Betrachtung der Verfolgegenauigkeit erfolgt jeweils zu definierten Zeitpunkten. Sie wird durch zwei Faktoren bestimmt:

- die Differenz zwischen den Positionen der Ist-Bahn des zu verfolgenden Objektes und den Positionen der Ist-Bahn des Roboters zu gleichen Zeitpunkten (siehe Abbildung 4-1)
- die Differenz zwischen den Ist-Orientierungen des zu verfolgenden Objektes und den Ist-Orientierungen des Roboters zu gleichen Zeitpunkten

Abbildung 4-1: Parameter der Verfolgengenauigkeit VG_P

Die Positions-Verfolgengenauigkeit (VG_P) wird durch das Maximum der Abstände zwischen den jeweiligen Ist-Positionen des Roboters ($x_{R_i}, y_{R_i}, z_{R_i}$) und des zu verfolgenden Objektes ($x_{O_i}, y_{O_i}, z_{O_i}$) für eine Anzahl von zu berechnenden Zeitpunkten (t) bestimmt, siehe Gleichung (2).

$$VG_P = \max \sqrt{(x_{R_i} - x_{O_i})^2 + (y_{R_i} - y_{O_i})^2 + (z_{R_i} - z_{O_i})^2} \quad i = 1 \dots t \quad (2)$$

Die Orientierungs-Verfolgengenauigkeiten VG_a , VG_b , VG_c werden als maximale Abweichung von den Ist-Orientierungen des Roboters und des zu verfolgenden Objektes festgelegt. Die Bestimmung der Orientierungs-Verfolgengenauigkeiten ist in Gleichung (3) dargestellt, wobei c_{R_i} , b_{R_i} und a_{R_i} die Ist-Orientierungen des Roboters am Punkt $(x_{R_i}, y_{R_i}, z_{R_i})$ und c_{O_i} , b_{O_i} und a_{O_i} die Ist-Orientierungen des zu verfolgenden Objektes am Punkt $(x_{O_i}, y_{O_i}, z_{O_i})$ sind.

$$\begin{aligned} VG_a &= \max |a_{R_i} - a_{O_i}| & i &= 1 \dots t \\ VG_b &= \max |b_{R_i} - b_{O_i}| & i &= 1 \dots t \\ VG_c &= \max |c_{R_i} - c_{O_i}| & i &= 1 \dots t \end{aligned} \quad (3)$$

Die Messung dieser Größen erfolgt mittels geeigneter Messapparaturen zur 6D-Erfassung. Dafür wird unter Vorgabe eines definierten Soll-Abstandes und einer Soll-Orientierung zwischen dem Montagehauptkörper und dem Roboter-TCP die Differenz in der Ist-Pose während der synchronisierten Bewegung gemessen. Die zu fordernden, maximal zulässigen Posedifferenzen zwischen Roboter und Montagehauptkörper sind nur mit den zugehörigen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufen der betreffenden Förderanlagen aussagekräftig.

Im förderbandsynchronen Betrieb soll die Verfolgegenauigkeit des Handhabungssystems zum Montagehauptkörper auch Montageoperationen mit hohen Genauigkeitsanforderungen ermöglichen. Daher ist eine Verfolgegenauigkeit von $VG_P=0,5$ mm und $VG_a, VG_b, VG_c=1^\circ$ zu erreichen, was der Bahnwiederholgenauigkeit eines standardisierten stationären Roboters mit vergleichbarer Traglast entspricht, siehe Tabelle 4-1.

Tabelle 4-1: Typische Genauigkeitskennwerte für Industrieroboter (BONGARDT 2004)

	Kleine Roboter Nutzlast <15 kg	Mittelgroße Roboter Nutzlast <60 kg	Große Roboter Nutzlast >60 kg
Positionswiederholgenauigkeit	0,02 bis 0,15 mm	0,04 bis 0,2 mm	0,1 bis 0,3 mm
Positionsgenauigkeit	0,3 bis 1 mm	0,4 bis 1,3 mm	0,5 bis 2 mm
Bahnwiederholgenauigkeit	0,1 bis 0,3 mm	0,2 bis 0,4 mm	0,3 bis 1 mm
Bahngenauigkeit	0,4 bis 1 mm	0,5 bis 1,5 mm	1 bis 2,2 mm

Die geforderte Verfolgegenauigkeit darf auch während Stopp-, Anfahr- und Schwingungsvorgängen der Förderanlagen nicht überschritten werden, andernfalls sind im Produktionsablauf Schäden und Störungen zu erwarten.

4.1.3 Montageprozess

Die Realisierung der förderbandsynchronen Montage erfordert eine ganzheitliche Betrachtung des Montageprozesses. Grundsätzlich lässt sich ein roboterbasierter Montageprozess in die folgenden Teilschritte untergliedern:

- Vorbereitende Tätigkeiten
- Positionierung / Orientierung
- Montageprozess

Vorbereitende Tätigkeiten sind beispielsweise die Aufnahme von Bauteilen und Montagehilfsmitteln durch den Roboter oder die Einfahrt des Montagehauptkörpers in den Arbeitsraum des Roboters. Daran schließt sich die Positionierung und Orientierung der Teilsysteme zueinander an. Den letzten Teilschritt stellt die eigentliche Montage des Bauteils an den Montagehauptkörper dar.

Bei der Entwicklung eines Systems für die förderbandsynchrone Montage gilt es, diesen Montageablauf zu berücksichtigen und die einzelnen Teilprozesse gegebenenfalls zu adaptieren oder zu erweitern. Darüber hinaus ist bei der Gestaltung des Systems darauf zu achten, dass die jeweils notwendige Prozesstechnik integriert werden kann und eine einfache Übernahme von stationär programmierten Montageabläufen möglich ist.

4.1.4 Sicherheit

Um die Sicherheitsbestimmungen von Maschinen und Anlagen zu gewährleisten, sind verschiedene Normen und Richtlinien zu erfüllen (DIN EN 60204-1 VDE 0113-1:2007-06, DIN EN ISO 12100-1, DIN EN ISO 12100-2, RICHTLINIE 2006/42/EG 2006). In der RICHTLINIE 2006/42/EG (2006) werden allgemeine Vorschriften und Anforderungen an Maschinen festgelegt. Im Bereich der Maschinensicherheit ist über diese eher allgemeinen Normen hinaus die DIN EN ISO 13849-1 (2007) und die DIN IEC 61508 (2006) für sicherheitsrelevante Steuerungen und die DIN EN ISO 13850 (2007) für die Gestaltung von Not-Aus-Einrichtungen zu nennen.

Neben der oben beschriebenen Sicherheit für Menschen ist bei der Entwicklung von Anlagentechnik darauf zu achten, dass bei einem Not-Stop auch bei der Anlagentechnik sowie dem Produkt Beschädigungen ausgeschlossen werden kön-

nen. Bei der Synchronisation von zwei unabhängigen Systemen besteht daher die Notwendigkeit des synchronen Abbremsens der Systeme oder des Ausgleiches von Differenzen beim Abbremsen. Insbesondere für Not-Aus Situationen während des eigentlichen Montagevorganges, also einer mechanischen Verbindung der beiden Teilsysteme, sind Strategien für die Beherrschung der Posedifferenzen zu erarbeiten.

Messungen am zur Verfügung stehenden Versuchsaufbau haben gezeigt, dass Fördersysteme und Roboter ein deutlich unterschiedliches Bremsverhalten aufweisen. Abbildung 4-2 zeigt, dass bei einem Abbremsvorgang des Fördersystems aufgrund eines Not-Stop mit erheblich größeren Positionsabweichungen gegenüber dem normalen Bahnverlauf zu rechnen ist. So ergeben sich in Förderrichtung (x-Achse) bis zu ± 9 mm Abweichung zur Soll-Position. Quer zur Förderrichtung (y-Achse) ergeben sich bis zu ± 3 mm Abweichung und in der Höhe (z-Achse) bis zu $\pm 2,5$ mm Differenz. Dies ergibt einen maximalen Abstand von ~ 10 mm. Diese Differenz muss von der zu verwendenden Prozesstechnik ausgeglichen werden können, um Beschädigungen der Teilsysteme zu vermeiden.

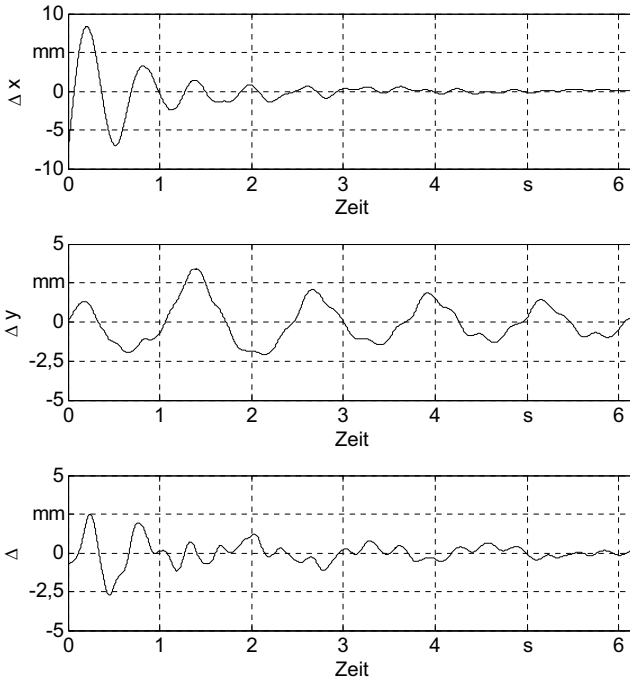


Abbildung 4-2: Positionsabweichungen der Elektrohängebahn bei Not-Aus

4.2 Wirtschaftliche Anforderungen

4.2.1 Allgemeines

Investitionsentscheidungen, insbesondere Entscheidungen für Sachinvestitionen, bedeuten eine mittel- bis langfristige Kapitalbindung. Der wirtschaftliche Erfolg einer Sachinvestition ist mit Unsicherheiten behaftet, da die Rückflüsse, die auf eine heute bekannte Ausgabe folgen, nach Höhe und Zeitpunkt nur geschätzt werden können (HOFFMEISTER 2000). Daher ist insbesondere bei Automatisierungssystemen auf eine wirtschaftliche Gestaltung zu achten, da diese eine hohe Erstinvestition erfordern und somit möglichst langfristig einsetzbar sein sollen. Wirtschaftliches Design automatisierter Montagesysteme beinhaltet eine Vielzahl

von unterschiedlichen Aspekten. Abbildung 4-3 gibt einen Überblick der grundlegenden wirtschaftlichen Anforderungen an Montagesysteme.

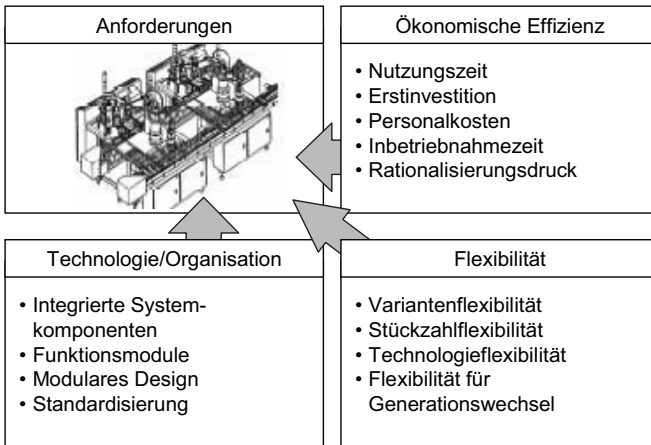


Abbildung 4-3: Wirtschaftliche Anforderungen an Montagesysteme in Anlehnung an FELDMANN & SLAMA (2001)

4.2.2 Ökonomische Effizienz

Das zu entwickelnde Robotersystem steht konzeptionell zwischen der manuellen Montage im Fließbetrieb und der getakteten automatisierten Anlage. Daher werden zur Analyse der wirtschaftlichen Effizienz diese beiden Realisierungsalternativen als Vergleichssysteme herangezogen.

Die Berechnung der Investitionshöhe und der entsprechenden Rückflüsse erfolgt mittels dynamischer Methoden der Investitionsrechnung. Die zu verwendenden Methoden sind die

- Kostenwertmethode und
- Kapitalbarwertmethode.

Eine Berücksichtigung mehrerer Berechnungsmethoden ist bedingt durch die jeweilige Entscheidungsgrundlage. So kann zwischen einer Erst-, Ersatz- oder Erweiterungsinvestition unterschieden werden (HOFFMEISTER 2000). Da sich die jeweils zu berücksichtigenden Kostendaten unterscheiden und somit auch die

Ergebnisse variieren können, werden die oben aufgezählten Varianten der Investitionsrechnung durchgeführt.

4.2.3 Technologie/Organisation

Die wirtschaftlichen Anforderungen, die aus der Technologie und Organisation resultieren, betreffen insbesondere die Konstruktion der Gesamtanlage, aber auch deren Systemkomponenten. In der Literatur existiert eine Vielzahl von Ansätzen zur Gestaltung von flexiblen Montagesystemen. Beispiele hierfür sind Ansätze zur modularen Gestaltung (NEUHAUSEN 2001, SCHUH et al. 2004, WESTKÄMPER 2001) sowie zur Wandlungsfähigkeit oder Rekonfigurierbarkeit auf Anlagenebene (KORTE 2005, MATT 2002, ZÄH et al. 2006b). Aus den Ergebnissen dieser Arbeiten lassen sich in Bezug auf die zu entwickelnde Anlage folgende Anforderungen extrahieren:

- einfacher, modularisierter Hardwareaufbau, um Prozessanpassungen aufwandsarm zu ermöglichen
- möglichst Verwendung von standardisierten Komponenten, um hohe Kosten und geringe Verfügbarkeiten von Sonderanlagen zu vermeiden
- einfache Einbindung in vorhandene Systemlandschaft, sowohl bei der Hardware als auch der Steuerungstechnik
- ermöglichen einer einfachen Anwendungsprogrammierung zur Verminderung von Stillstandszeiten und für eine schnelle Inbetriebnahme

4.2.4 Flexibilität

In der Literatur und der Praxis findet sich im Hinblick auf die Anpassungsfähigkeit von Produktionssystemen auf veränderte Umweltbedingungen vielfach der Begriff der Flexibilität wieder, der schon auf zahlreiche Weise zu definieren, zu klassifizieren und zu messen versucht wurde.

Flexibilität wird allgemein als Eigenschaft eines Systems bezeichnet, sich innerhalb bestimmter Grenzen, so genannter vorgedachter Korridore, an sich verändernde Randbedingungen bzw. Anforderungen anzupassen (SCHMIDT 2002, WESTKÄMPER et al. 2000, ZÄH et al. 2005, SETHI & SETHI 1990).

SEVERIN (1987) unterscheidet in Bezug auf Bearbeitungs- und Montagezellen folgende Flexibilitätsarten:

- Rüstflexibilität (Anpassung an Produkttypen- und Variantenvielfalt)
- Ablaufflexibilität (Änderung der Auftragsreihenfolge)
- Zeitflexibilität (Veränderung von Lieferterminen oder Systemtaktzeit)
- Mengenflexibilität (Änderung der geforderten Produktionsmenge)
- Funktionsflexibilität (Anpassung der technologischen Wirksysteme)
- Personalflexibilität (Variable Personalverfügbarkeit)
- Störungsflexibilität (Kompensation von Störungen im System)

Daraus wird abgeleitet, dass das zu entwickelnde Montagesystem bzw. das ihm zugrunde liegende Synchronisationsprinzip möglichst produkt- und anwendungsneutral gestaltet sein muss.

5 Methode der roboterbasierten förderbandsynchronen Montage

5.1 Randbedingungen und Vorgehen

Im Rahmen der Lösungssuche soll ein geeignetes Synchronisationsprinzip für die förderbandsynchrone Montage, welches den in Kapitel 4 definierten Anforderungen gerecht wird, entwickelt werden.

Aufgrund der von DIRNDORFER (1993) durchgeführten Analyse der möglichen Synchronisationsprinzipien und dem daraus folgenden Ausschluss der mechanischen Prinzipien wird auf eine weitere Betrachtung dieses Prinzips verzichtet. Die gesteuerten Synchronisationsprinzipien werden ebenfalls ausgeschlossen, da sich deren Grundkonzept nicht auf mehrere Freiheitsgrade übertragen lässt. Das hier zu entwickelnde Synchronisationsprinzip der förderbandsynchronen Montage basiert daher auf der geregelten Synchronisation. Diese wird im Rahmen der Arbeit auf die Synchronisation in sechs Freiheitsgraden erweitert und zu einem realisierbaren Konzept entwickelt.

Basierend auf dem ermittelten Handlungsbedarf und den definierten Anforderungen beinhaltet die Erarbeitung der Methode die folgenden Schwerpunkte:

- Entwicklung einer geeigneten Synchronisationstrecke,
- Entwicklung möglicher Integrationsformen einer Nachgiebigkeit,
- Konzeption des Synchronisationsprinzips und
- Entwicklung des Synchronisationslaufes.

5.2 Entwicklung der Synchronisationsstrecke

5.2.1 Definition und Anforderungen

Für den Aufbau einer geregelten Synchronisationslösung ist die kontinuierliche Messung der tatsächlichen Posedifferenz zwischen Roboter und Montagehaupt-

körper notwendig. Um dies realisieren zu können, ist die Wahl der Synchronisationsstrecke von besonderer Bedeutung. Als Synchronisationsstrecke wird die Verbindung zwischen den Synchronisationsorten am Roboter und Montagehauptkörper bzw. Fördersystem definiert. Als Synchronisationsort werden die jeweiligen Referenzen für die eingesetzten Sensorsysteme bezeichnet. Der Synchronisationsort am Roboter ist der jeweilige TCP. Anforderungen an den Synchronisationsort am Montageobjekt sind im Folgenden aufgelistet.

- *Prozessnähe*
Eine Minimierung des Abstandes zwischen dem Synchronisationsort und dem Montageort verringert den negativen Einfluss produktinhärenter Schwingungen auf die Verfolgegenauigkeit.
- *Stabiler Fixpunkt*
Der Synchronisationsort sollte möglichst ein Punkt am Montagehauptkörper sein, der eine stabile Referenz bildet.
- *Flexibilität*
Zur Realisierung eines möglichst vielseitig einsetzbaren Synchronisationsprinzips ist im Rahmen der Synchronisation auf varianten- oder prozessspezifische Umsetzungen oder Fixpunkte zu verzichten.
- *Vermeidung von Verdeckung*
Die Möglichkeit der Verdeckung der für die Synchronisation verwendeten Referenzpunkte sollte minimiert werden. Dies ist besonders relevant für die Anordnung der Sensorik zur messtechnischen Erfassung der Posedifferenzen.
- *Direkte Erfassung der Posedifferenzen*
Bei der Erfassung der Posedifferenzen können zwei Alternativen unterschieden werden, externe und interne Erfassung. Externe, also stationäre, Meßsysteme können verwendet werden, um die Absolutlage des Endeffektors und des Montagehauptkörpers zu detektieren. Die erfassten Daten müssen daraufhin transformiert werden, um die Differenz der Systeme zueinander bestimmen zu können. Bei internen Messsystemen ist dieses am Roboter selbst angebracht und erfasst die Posedifferenzen des Montagehauptkörpers zu seiner eigenen Pose. Daher kann auf eine Transformation der Daten verzichtet werden.

5.2.2 Möglichkeiten der Synchronisationsortes

Die Auswahl des am besten geeigneten Synchronisationsortes bestimmt maßgeblich die Genauigkeit des gesamten Synchronisationsprinzips. Aufgrund der Verwendung eines positionsgeregelten Roboters wird roboterseitig immer mit dem Roboter-TCP synchronisiert. Als mögliche Synchronisationspunkte seitens des Montagehauptkörpers können grundsätzlich drei Varianten unterschieden werden.

Synchronisation von Roboter-TCP zum Fördergrundsystem

Bei den meisten der im Stand der Technik vorgestellten Systeme kommt eine Synchronisation zum Fördergrundsystem zum Einsatz, siehe Abschnitt 3.1. Dabei wird direkt am Fördersystem ein Fixpunkt gewählt und dieser mittels geeigneter Sensortechnik verfolgt. Die notwendige Sensorik wird in diesem Prinzip extern, also nicht am Robotersystem, sondern beispielsweise als zusätzliche siebente Achse, wie bei einigen beschriebenen Systemen, konzipiert.

Vorteile dieser Art der Synchronisation sind die einfache Realisierung und die hohe Flexibilität in Bezug auf Montageprozesse. Zusätzlich ist die Wahl eines stabilen Fixpunktes sehr einfach. Nachteilig erweist sich jedoch die geringe erreichbare Genauigkeit, die größtenteils aus den lediglich in Förderrichtung erfassten Positions- bzw. Geschwindigkeitsdifferenzen resultiert. Darüber hinaus können Schwingungen und somit Positionsdifferenzen, die durch in den Montagehauptkörper induzierten Anregungen ausgelöst werden, aufgrund der großen Prozessentfernung, nicht berücksichtigt werden.

Synchronisation von Roboter-TCP zum Montagehauptkörper

Die Synchronisation zu Fixpunkten am Montagehauptkörper wird zumeist bei der automatisierten getakteten Montage verwendet. Nachdem der Montagehauptkörper gespannt ist, wird die aktuelle Lage an zuvor definierten Fixpunkten vermessen und in Relation dazu der Montageprozess durchgeführt. Bei der förderbandsynchronen Montage können die Fixpunkte am Montagehauptkörper mittels externer Sensorsysteme erfasst werden. Eine Realisierung mittels interner Sensorsysteme ist prinzipiell möglich, aufgrund zu erwartender Adaptionen seitens der Roboterhardware und Prozessgestaltung jedoch sehr aufwändig.

Vorteile sind die hohe Varianten- und Prozessunabhängigkeit sowie die Verwendung von stabilen Fixpunkten. Die Verdeckung der Fixpunkte am Montage-

hauptkörper kann durch eine geeignete Prozessgestaltung und gezielte Auswahl der Fixpunkte vermieden werden. Dies ist jedoch mit einem erhöhten Aufwand bei der Prozessgestaltung verbunden. Trotz der möglichen Erfassung der Pose des Montagehauptkörpers ist die zu erreichende Genauigkeit ungenügend. Dies resultiert aus den in Abschnitt 3.3 beschriebenen in den Montagehauptkörper induzierten Schwingungen. Aufgrund dieser Schwingungen können insbesondere bei größeren Entfernungen des Montageortes zum Fixpunkt nicht detektierbare Poseabweichungen auftreten. Beispiele dafür sind der Lenkwinkel oder der Sturz bei der Radmontage bzw. auch die Positionsdifferenzen an nicht fixierten Elementen, wie der Motorhaube oder Kofferraumklappe.

Synchronisation von Roboter-TCP zu Montageort am Montagehauptkörper

Die Synchronisation des Roboters mit dem Montageort am Montagehauptkörper stellt letztlich eine Sonderform der Synchronisation des Roboters zum Montagehauptkörper dar. Als Fixpunkt wird in diesem Fall der Ort gewählt, an welchem das Bauteil montiert werden soll. Ein weiterer Unterschied zur Synchronisation zum Montagehauptkörper ist die Art der Erfassung der Posedifferenzen. Bei der Synchronisation von Roboter zu Montageort muss eine interne Prozessdatenerfassung verwendet werden. Diese ist derart im Endeffektor zu integrieren, dass eine Verdeckung des Montageortes ausgeschlossen werden kann.

Vorteile dieses Prinzips sind die unmittelbare Prozessnähe und die daraus resultierende sehr hohe Verfolgegenauigkeit. In Abhängigkeit des Montageprozesses und somit der Geometrie des Montageortes kann dieser jedoch Probleme bei der sensorischen Erfassung ergeben. Die Flexibilität eines derartigen Systems ist daher auf jeweils einen spezifischen Montagevorgang eingeschränkt. Das bedeutet, dass der umgesetzte Montagevorgang an unterschiedlichen Produkten immer nur dann durchgeführt werden kann, sofern die Fixpunkte die gleichen Charakteristika für die messtechnische Erfassung aufweisen. Die Verwendung von internen Sensorsystemen ermöglicht einen Verzicht auf Sensordatentransformationen und verringert den Kalibrationsaufwand des Systems. Ein weiterer Vorteil dieses Prinzips ist, dass neben der Realisierung der Synchronisation ein derartiges Synchronisationsprinzip den eigentlichen Montagevorgang unterstützen und kontrollieren kann. Dies resultiert aus der in Abhängigkeit von der verwendeten Prozesssensorik vorhandenen Möglichkeit, bestimmte Prozessparameter und weitere qualitative Daten während des Montagevorganges zu erfassen.

5.2.3 Bewertung und Auswahl

Zur vergleichenden Bewertung der Möglichkeiten des Synchronisationsortes werden die im Unterabschnitt 5.2.1 definierten Anforderungen herangezogen (vgl. Tabelle 5-1). Daraus ergibt sich, dass die Synchronisation von Roboter zum Montageort das einzige Prinzip darstellt, das sämtliche Posedifferenzen berücksichtigt und somit eine ausreichend hohe Verfolgegenauigkeit gewährleistet. Die Nachteile bei der Wahl eines stabilen Fixpunktes, der Verdeckung und der Flexibilität sind prozessspezifisch und können durch eine geeignete Prozessgestaltung ausgeglichen werden. Die direkte Erfassung der Posedifferenzen ohne die Notwendigkeit von Koordinatentransformationen stellt einen weiteren Vorteil dieses Prinzips dar. Der Ansatz zur Synchronisation von Roboter-TCP zum Montageort am Montagehauptkörper wird daher im Folgenden angewendet, um eine förderbandsynchrone Montage zu realisieren.

Tabelle 5-1: Vergleichende Bewertung der Möglichkeiten des Synchronisationsortes

Anforderungen	Roboter zu Fördersystem	Roboter zu Montagehauptkörper	Roboter zu Montageort
Prozessnähe	○	◐	●
Stabiler Fixpunkt	●	●	◐
Flexibilität	●	◐	◐
Vermeidung von Verdeckung	●	◐	◐
Direkte Erfassung der Posedifferenzen	○	○	●
Legende	geringer Erfüllungsgrad bezüglich der Anforderung ○	mittlerer Erfüllungsgrad bezüglich der Anforderung ◐	hoher Erfüllungsgrad bezüglich der Anforderung ●

5.3 Entwicklung der Integration von Nachgiebigkeit

5.3.1 Definition und Anforderungen

Der Ausgleich der auftretenden Posedifferenzen erfordert neben der eigentlichen Regelung durch den Roboter ein zweites, passives System. Dies resultiert aus den beschriebenen hohen Frequenzen, mit welchen die Posedifferenzen auftreten können. Da diese hochfrequenten Posedifferenzen nicht aktiv von der Steuerung des Roboters kompensiert werden können, wird eine passive Nachgiebigkeit in das System integriert. Als passive Nachgiebigkeit werden Elemente verstanden, die sich aufgrund von Kräften gezielt verformen und somit hohe Kraftspitzen für die angrenzenden Anlagenkomponenten vermeiden. Für die Realisierung dieser Nachgiebigkeit werden folgende Anforderungen definiert:

- *Prozessnähe*
Es ist ein möglichst geringer Abstand zwischen dem Montageort und der nachgiebigen Komponente anzustreben. Dies resultiert aus der Neigung des beweglichen Teils des Endeffektors zum Schwingen, deren Vermeidung somit eine zusätzliche Dämpfung erforderlich macht. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass mit zunehmender Massenträgheit des passiv beweglichen Teils des Endeffektors, welche aus der Entfernung der nachgiebigen Komponente zum Prozess resultiert, eine Vergrößerung der unregelmäßigen Prozesskräfte auftritt.
- *Ausgleich in sechs Freiheitsgraden*
Die Hauptaufgabe der Nachgiebigkeit ist der Ausgleich der Posedifferenzen in sechs Freiheitsgraden. Darüber hinaus ist eine Anordnung der nachgiebigen Komponente zu bevorzugen, die zusätzlich eine möglichst hohe Toleranz in der Translation und Rotation ermöglicht.
- *Integration*
Die passive Nachgiebigkeit muss möglichst leicht in den vorhandenen Endeffektor zu integrieren sein. Sonderkonstruktionen sind daher auszuschließen.
- *Flexibilität*
Die Flexibilität des Systems bezieht sich auf den zu realisierenden Prozess mit seinen Produktvarianten. Die Realisierung der Nachgiebigkeit sollte daher keinen Einfluss auf die Produktflexibilität haben.

5.3.2 Möglichkeiten der Integration von Nachgiebigkeit

Die Integration einer nachgiebigen Komponente kann, wie in Abbildung 5-1 dargestellt, im Flansch, in den Achsen des Roboters und den Greiffingern erfolgen.

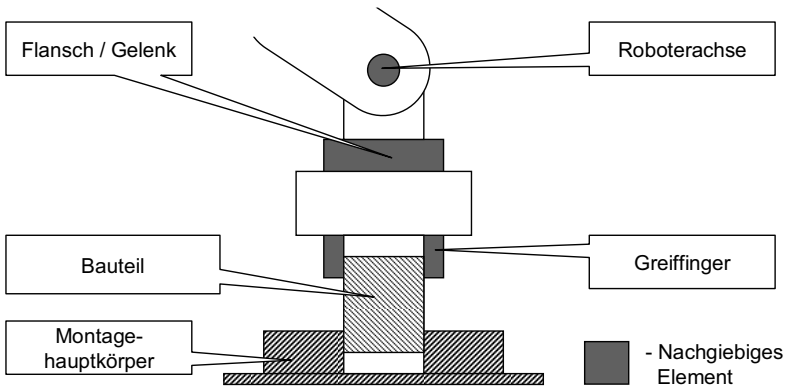


Abbildung 5-1: Möglichkeiten der Integration von Nachgiebigkeit in Anlehnung an SANTOCHI & DINI (1998)

Umsetzung in der Achse

Bei der Realisierung einer Nachgiebigkeit in den Handachsen des Roboters werden eine oder mehrere Achsen frei geschaltet. Dies bedeutet, dass sich die Achsen unter Einwirkung einer externen Kraft bewegen lassen. Sie stehen in diesem Fall jedoch nicht mehr für die Positionssteuerung des Roboters zur Verfügung. Die Umsetzung in den Handachsen ist durch eine sehr hohe Flexibilität gekennzeichnet, da die Realisierung prozess- und produktunabhängig ist. Nachgiebigkeit kann prinzipbedingt jedoch nur in den drei Handachsen erreicht werden, womit lediglich die rotatorischen, nicht aber die translatorischen Freiheitsgrade ausgeglichen werden können. Nachteilig erweisen sich zusätzlich die sehr geringe Prozessnähe und die Probleme bei der Integration des Systems in die Prozesslandschaft, da in diesem Fall eine Regelung des Robotersystems nur über die Hauptachsen möglich ist.

Umsetzung im Flansch

Die Umsetzung der Nachgiebigkeit im Flansch kann durch Verwendung flexibler Werkzeugaufhängungen erfolgen oder als konstruktive Berücksichtigung bei der Gestaltung des Endeffektors durch komplizierte Strukturen (SCHUGMANN 1990). Bei der Implementierung der Nachgiebigkeit direkt zwischen Roboterflansch und Endeffektor besteht eine starre Verbindung zwischen Endeffektor und Produkt. Dadurch wird gewährleistet, dass die Pose dieser Systeme zueinander immer gleich ist. Bei der Verwendung von in den Endeffektor integrierten Messsystemen ist dies eine notwendige Voraussetzung. Darüber hinaus ist diese Art der Integration unabhängig von Produktvarianten des zu greifenden Bauteiles. Nachteile dieser Variante sind der sich zum Roboterkoordinatensystem verschiebende TCP und das im Vergleich zu anderen Integrationsalternativen höhere Massenträgheitsmoment der gefederten Massen. Die relative Verschiebung des TCP zum Roboterkoordinatensystem resultiert aus der Nachgiebigkeit und muss bei der Positionssteuerung des Roboters berücksichtigt werden. Dafür ist es notwendig, die jeweilige Auslenkung der Nachgiebigkeit zu erfassen und dem Regelalgorithmus zur Verfügung zu stellen. Das erhöhte Massenträgheitsmoment führt einerseits zu einer verminderten Sensibilität des Systems in Bezug auf von außen einwirkende Kräfte und Momente und andererseits zu einer höheren Neigung zum Schwingen. Letzteres kann jedoch mittels zusätzlicher Dämpfung, entweder mechanisch oder regelungstechnisch, ausgeglichen werden.

Umsetzung in den Greiffingern

Die Implementierung der Nachgiebigkeit im Greiffinger kann einerseits mittels nachgiebiger Greifsysteme, wie z.B. Vakuumgreifern, oder durch eine nachgiebige Montage des Greifers am Endeffektor erreicht werden. Die Verwendung nachgiebiger Greifsysteme setzt die Möglichkeit des Greifens mittels dieser Systeme voraus, woraus sich eine Einschränkung der Anwendungsszenarien ergibt. Die nachgiebige Montage des Greifers an den Endeffektor ähnelt der Umsetzung im Flansch, wobei hier deutlich geringere Massen aufgrund der geringeren Entfernung von Montageort zu berücksichtigen sind. Ein Ausgleich in sechs Freiheitsgraden ist abhängig von der Implementierung und ist in seiner Dimensionierung limitiert. Darüber hinaus ist ein derartiges System durch eine verringerte Flexibilität gekennzeichnet, da eine Neukonstruktion des Greifsystems je nach Anwendungsszenario notwendig ist. Die Möglichkeiten der Integration der Nachgiebigkeit in den Greiffingern sind aufgrund der relativen Verschiebung des gegriffenen Bauteiles zum Endeffektor als ungenügend zu betrachten. Daraus

folgen erhöhte Anforderungen an die Werkzeuggestaltung, da somit auch die im Endeffektor integrierten Prozesswerkzeuge, wie beispielsweise Schrauber, lageflexibel eingebunden werden müssen.

5.3.3 Bewertung und Auswahl

Ein qualitativer Vergleich der beschriebenen Möglichkeiten der Realisierung einer Nachgiebigkeit ist in Tabelle 5-2 aufgeführt. Die Umsetzung im Flansch ist die einzige Variante, die eine uneingeschränkte Nachgiebigkeit in sechs Freiheitsgraden mit einer einfachen Integration in vorhandene Systeme und einer hohen Flexibilität verbindet. Daher wird im Folgenden die Realisierung der Nachgiebigkeit im Flansch weiterverfolgt.

Tabelle 5-2: Vergleichende Bewertung der Möglichkeiten zur Umsetzung von Nachgiebigkeit

Anforderungen \	Roboterachse	Flansch	Greiffinger
Prozessnähe	○	◐	●
Ausgleich in allen Freiheitsgraden	○	●	◐
Integration	◐	●	○
Flexibilität	●	●	◐
Legende	geringer Erfüllungsgrad bezüglich der Anforderung ○	mittlerer Erfüllungsgrad bezüglich der Anforderung ◐	hoher Erfüllungsgrad bezüglich der Anforderung ●

5.4 Konzeption des Synchronisationsprinzips

5.4.1 Allgemeines zum Synchronisationsprinzip

Die Minimierung von Posedifferenzen zwischen Montagehauptkörper und Roboter in sechs Freiheitsgraden ist das zentrale Element bei der Realisierung eines Robotersystems für die förderbandsynchrone Montage. Aufgrund der Analyse des Standes der Technik wird eine Regelung als grundlegendes Prinzip vorge-

schlagen. Die in Abschnitt 5.2 durchgeführte Analyse der Synchronisationsstrecke impliziert die Erfassung der Posedifferenzen durch in das Greifsystem integrierte Sensorsysteme. Als Synchronisationsorte wurden der Roboter-TCP und der Montageort des Montagehauptkörpers ausgewählt. Wie in Abschnitt 5.3 beschrieben, wird zum Ausgleich von nicht regelbaren Posedifferenzen und zur Vermeidung hoher Kontaktkräfte bei der Montage eine Nachgiebigkeit im Roboterflansch installiert. Die Auslenkung der Nachgiebigkeit wird mittels geeigneter Sensorik ebenfalls gemessen.

Wie in Abbildung 5-2 dargestellt, wird eine eingangs programmierte Bahn mittels der vorhandenen Sensoren derart korrigiert, dass eine Synchronisation von Montagehauptkörper und Roboter ermöglicht wird. Die Vorgabe von Soll-Sensorwerten erlaubt die Realisierung einer frei im Raum zu definierenden Montagebewegung.

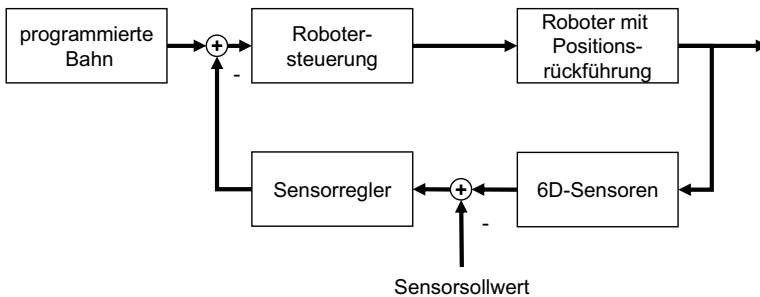


Abbildung 5-2: Allgemeine Darstellung eines Roboters mit Sensorführung

5.4.2 Funktionsweise des Synchronisationsprinzips

Wie die Abbildung 5-3 zeigt, besteht das Gesamtsystem aus einem positionsgeregelten Roboter, einem Fördersystem mit darin befindlichen Montagehauptkörper, einem Sensorsystems zur eindimensionalen Lageerfassung und einem in das Greifsystem integrierten Sensorsystem zur Erfassung der Posedifferenz zwischen Montagehauptkörper und Roboter.

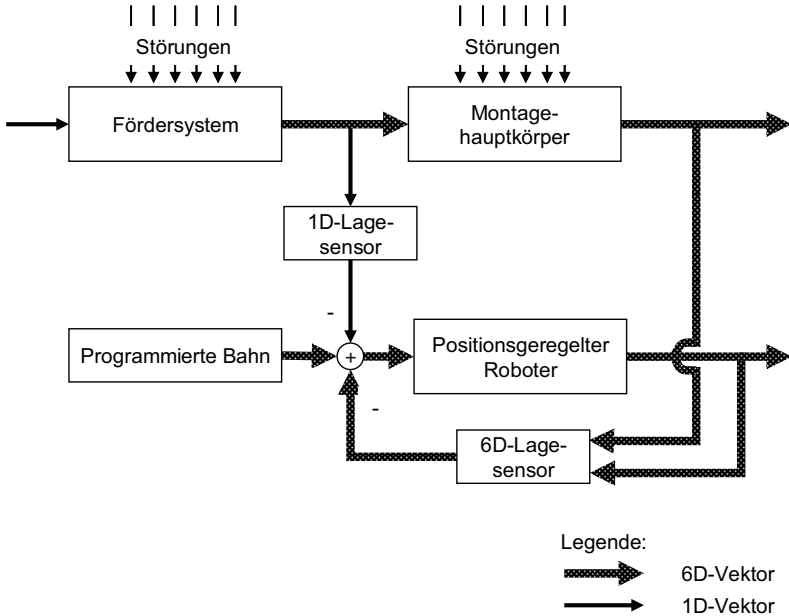


Abbildung 5-3: Funktionsweise des Synchronisationsprinzips der förderbandsynchronen Montage

Bei Vorgabe einer bestimmten Geschwindigkeit für das Förderband, kann dem Montageort am Montagehauptkörper zu jedem Zeitpunkt eine bestimmte Ist-Position und Ist-Orientierung zugeordnet werden. Die Erfassung der Posewerte des Montageortes am Montagehauptkörper erfolgt mittels des in den Endeffektor integrierten Sensorsystems zur sechsdimensionalen Poseerfassung. Durch Vergleich der Daten mit den Achswerten des Roboters und dem daraus zu berechnenden TCP können die Differenzen der Ist-Position und Ist-Orientierung zwischen den Synchronisationsorten bestimmt werden.

Die Ist-Position des Fördersystems in Förderrichtung wird mittels eines Lagesensors gemessen und mit den kommandierten Ist-Positionsdaten des Roboters in Förderrichtung verglichen. Die dadurch bestimmte Ist-Differenz der Position, welche in diesem Fall nur eine Dimension hat, ist eine weitere Eingangsgröße für die Robotersteuerung. Die Erfassung der Positionsabweichung in Förderrichtung stellt eine Hilfestellung für die Realisierung des Montageablaufes dar. Für das eigentliche Synchronisationsprinzip hat sie nur untergeordnete Bedeutung.

Anhand der Vorgabe einer Soll-Verfolgegenauigkeit, also einer definierten Soll-Positionierungsdifferenz und einer Soll-Orientierungsdifferenz zwischen Roboter-TCP und Montagehauptkörper werden unter Zuhilfenahme der jeweiligen Ist-Differenzen die Eingangsgrößen für die Robotersteuerung bestimmt. Die Werte für die Soll-Positionierungsdifferenz und die Soll-Orientierungsdifferenz sind im Normalfall für den eigentlichen Montageprozess immer als Null anzunehmen, für die Annäherung des Robotersystems an den Montagehauptkörper können auf diese Weise jedoch auch gezielt Offset-Werte definiert werden.

5.5 Entwicklung des Synchronisationslaufes

5.5.1 Allgemeiner Prozessablauf und Prozessphasen

Der Ablauf des Synchronisationsvorgangs ist entscheidend für einen erfolgreichen Montageprozess. Als Prozessablauf wird hier die iterative Abfolge der folgenden Aufgaben bezeichnet:

- Detektieren des Montagehauptkörpers im Fördersystem beim Einfahren in die Arbeitsstation,
- Regelungstechnisches Koppeln von Roboter und Montagehauptkörper und somit der Beginn der Synchronisation,
- Synchronisiertes Positionieren des Roboters mit dem Bauteil vor dem Montagehauptkörper,
- Montieren des Bauteils an den Montagehauptkörper und
- Entkoppeln des Roboters vom Montagehauptkörper und Beenden des Synchronlaufes.

Die beschriebenen Aufgaben stellen unterschiedliche Anforderungen an die eingesetzte System- und Regelungstechnik. So steigt die notwendige Positionierungs- und Orientierungsgenauigkeit innerhalb der ersten Phasen des Prozessablaufs bis zum mechanischen Kontakt stetig. Eine Differenzierung und somit Segmentierung des Prozessablaufes erscheint vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Aufgabenstellungen und der verschiedenen einzusetzenden Sensorensysteme als notwendig. Der Prozessablauf ist daher, wie in Abbildung 5-4 darge-

stellt, in drei Phasen unterteilt. Diese Phasen unterscheiden sich hauptsächlich durch die Art der Verbindung zwischen Montagehauptkörper und Roboter. In Phase 1 und Phase 2 werden diese Systeme berührungslos miteinander synchronisiert, wohingegen in Phase 3 ein mechanischer Kontakt vorhanden ist.

Weitere notwendige Maßnahmen, wie beispielsweise die Zuführung des Bauteils oder zusätzlich benötigter Montagehilfskörper, die Aufnahme des zu montierenden Bauteils durch den Roboter sowie die Fahrt des Roboters in eine Warteposition sind in diesem Prozessablauf nicht berücksichtigt, da sie vom jeweiligen Montageprozess abhängig sind und daher sehr stark variieren können.

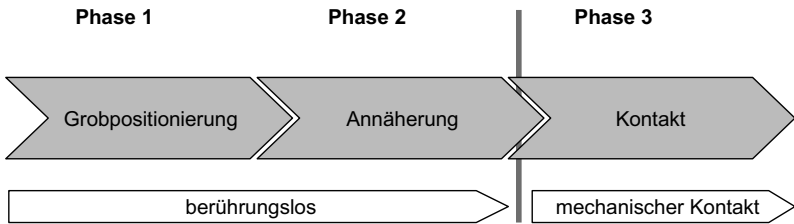


Abbildung 5-4: Phasen des Synchronisationslaufs

5.5.2 Grobpositionierungsphase

Die Grobpositionierung stellt den Beginn des Prozessablaufes dar. Diese Phase wird benötigt, um einen Startpunkt für die folgende Annäherungsphase zu erreichen. Die Hauptaufgabe besteht daher in der Synchronisation der Positionen in Förderrichtung. Daraus resultieren in Abhängigkeit der zu verwendenden Sensorik bei der Feinpositionierung nur geringe Genauigkeitsanforderungen. Relevant ist jedoch die Vorgabe einer Soll-Positionierungsdifferenz, um Berührungen der Systeme zu vermeiden. Innerhalb der Phase 1 sind folgende Aufgaben sequentiell zu erfüllen:

- Erfassung des Montagehauptkörpers bei Einfahrt in die Arbeitsstation,
- Grobpositionierung des Bauteils vor dem Montagehauptkörper,
- Aktivierung der Sensorik für die Feinpositionierung.

Das Erfassen des Montagehauptkörpers stellt die Initialisierung des Prozessablaufes dar. Die Aufgabe kann dabei sowohl mit berührungslos arbeitenden Sensoren als auch mit taktilen Systemen erfolgen.

Die Grobpositionierung mit Vorgabe einer definierten Soll-Positionierungsdifferenz dient der Positionierung des Montagepunktes am Montagehauptkörper im Messbereich der im Endeffektor integrierten Sensorsysteme. Das Erreichen der Grobposition des Roboters mit dem Bauteil vor dem Montagehauptkörper kann beispielsweise mittels des in Unterabschnitt 2.3.3 beschriebenen Conveyor-Tracking realisiert werden. In jedem Fall ist die Erfassung der groben Ist-Position des Montagehauptkörpers in Förderrichtung notwendig.

Die Aktivierung der internen Sensorik stellt den Übergang der Phase 1 zur Phase 2, der Annäherungsphase, dar.

5.5.3 Annäherungsphase

Die Annäherung erfolgt vor dem mechanischen Kontakt durch berührungslose Sensorik. In dieser Phase erfolgt der Übergang von der eindimensionalen Synchronisation in Förderrichtung zur Synchronisation in sechs Freiheitsgraden. Grundlegend lassen sich folgende Aufgaben differenzieren:

- Erfassung der Posedifferenzen zwischen Montagehauptkörper und Roboter durch berührungslose Sensorsysteme,
- Ausgleich der Orientierungsdifferenzen,
- Ausgleich der Positionsdifferenzen über definierten Bahnverlauf,
- Realisieren eines mechanischen Kontaktes.

Die innerhalb der Phase 2 zu bearbeitenden Aufgabenstellungen lassen sich zur Beschreibung trennen, stellen jedoch einen eher iterativ durchzuführenden Prozessablauf dar. Dies resultiert aus kontinuierlich auf das System einwirkende Störgrößen, wie sie in Abschnitt 3.3 beschrieben wurden.

Die Erfassung der Posedifferenzen erfolgt mittels der in den Endeffektor integrierten Messsysteme. Dabei ist bei der Gestaltung des Endeffektors und der Auswahl der zu verwendenden Sensorsysteme die im Abschnitt 5.2 abgeleitete Forderung zu berücksichtigen, dass sich der Bezugspunkt immer im Messbereich der Sensorik befinden muss. Die Erfassung sollte mittels berührungslosen Sensorsys-

temen erfolgen, wobei in Abhängigkeit vom Montageprozess verschiedene Systeme ausgewählt werden können. Die erfassten Differenzen werden der Robotersteuerung mittels geeigneter Schnittstellen übergeben und dienen der Bestimmung der notwendigen Verfahrensparameter.

Der Ausgleich der Orientierungsdifferenzen erfolgt in allen rotatorischen Freiheitsgraden. Dafür werden die gemessenen Ist-Orientierungsdifferenzen mit den Soll-Orientierungsdifferenzen verglichen und der Roboter entsprechend nachgeregelt.

Der Ausgleich der Positionsdifferenzen erfolgt prinzipiell wie bei den Orientierungsdifferenzen. Allerdings gilt es hier zu beachten, dass es eine Verringerung der Soll-Positionierungsdifferenz ohne gleichzeitigen Ausgleich der übrigen Posedifferenzen zu unerwünschten Kontakten zwischen Bauteil und Montagehauptkörper führen kann. Daher erfolgt die Annäherung des Roboters an den Montagehauptkörper auf einer prior zu bestimmenden Trajektorie. Dies ist notwendig, da bei dieser Trajektorie die Fügerichtung des im Anschluss durchzuführenden Montageprozesses zu berücksichtigen ist.

Die Realisierung des mechanischen Kontaktes nach dem oben beschriebenen Ausgleich der Posedifferenzen ist der Übergang von Phase 2 zur Phase 3.

5.5.4 Kontaktphase

Die dritte Phase des Prozessablaufes, der Kontaktphase, ist durch den mechanischen Kontakt zwischen Montagehauptkörper und Robotersystem gekennzeichnet. Diese geschlossene kinematische Kette erfordert den vollständigen Ausgleich aller Posedifferenzen. Darüber hinaus ist der eigentliche Fügeprozess durchzuführen. Die dritte Phase endet mit dem Lösen des Kontaktes und somit dem Ende der Synchronisation. Die in Phase 3 zu erfüllenden Aufgaben sind:

- Aktive Synchronisation in sechs Freiheitsgraden,
- Passiver Ausgleich von nicht regelbaren Posedifferenzen,
- Realisierung des Fügeprozesses.

Die Realisierung der aktiven Synchronisation in sechs Freiheitsgraden nach dem Herstellen einer mechanischen Verbindung zwischen Bauteil und Montagehauptkörper erfordert das kontinuierliche Messen auftretender Kräfte und Momente.

Diese Kräfte und Momente, welche aus Synchronisationsdefiziten resultieren, sind daher mittels geeigneter Sensorik zu erfassen und analog zu den Sensordaten in Phase 2 an die Robotersteuerung zu übergeben.

Auf die Notwendigkeit eines passiven Ausgleiches von nicht regelbaren Posedifferenzen, wie in Abschnitt 5.3 beschrieben, wird hier noch einmal hingewiesen.

Die eigentliche Montage durch die aktive Ausführung des Fügeprozesses ist der Kern der dritten Phase. Der Fügeprozess stellt je nach Aufgabenstellung unterschiedliche Anforderungen an die Fügeichtung, die Fügezeit und dadurch die Synchronisationszeit und die Synchronisationsgüte. Darüber hinaus sind notwendige Fügekräfte zu realisieren bzw. Kräfte und Momente, die durch den Fügeprozess in das System eingebracht werden, auszugleichen.

5.6 Anwendungsbereiche der Methode

Die vorgestellte Methode zur förderbandsynchronen Montage wurde für den Anwendungsbereich Fahrzeugendmontage entwickelt. Einschränkungen des Gültigkeitsbereiches der Methodik ergeben sich daraus jedoch lediglich bei der zu verwendenden Handhabungstechnik. Aufgrund der Synchronisation in sechs Raumfreiheitsgraden ist die Verwendung eines mindestens sechsachsigen Roboters notwendig. Darüber hinaus wurde lediglich die Synchronisation von zwei Fügepartnern zueinander betrachtet. Eine Ausweitung der Methode auf mehr als zwei Bauteile gleichzeitig wurde nicht untersucht.

Neben diesen grundsätzlichen Anforderungen ergeben sich aus den Bestandteilen der beschriebenen Methode zur förderbandsynchronen Montage folgende Einschränkungen bezüglich des Einsatzgebietes:

- *Genauigkeit*
Die Methode ist immer dann einzusetzen, wenn die hohe zu erreichende Verfolgegenauigkeit der Synchronisation für den Fügeprozess notwendig ist. Dagegen können Füge toleranzen im Bereich der kumulierten Positionier- bzw. Bahnungenaugigkeiten von Handhabungs- und Fördersystem zumeist mit dem in Unterabschnitt 2.3.3 beschriebenen Conveyor Tracking realisiert werden.
- *Synchronisationsstrecke*
Für die Umsetzung der beschriebenen Synchronisationsstrecke ist die sen-

sorische Erfassung des Montageortes am Montagehauptkörper erforderlich. Für diese Messaufgabe stehen eine Vielzahl von Messprinzipien und Sensoren zu Verfügung, so dass ein Erkennen und Nachverfolgen dieses möglich ist, siehe auch Abschnitt 6. Einschränkend für Anwendungen ist jedoch die Anordnung der Sensoren am Endeffektor. Diese sind derart zu montieren, dass eine Verdeckung des Montageortes durch das Bauteil oder den Endeffektor ausgeschlossen wird. Ist aufgrund der konstruktiven Gestaltung des Bauteils oder des Endeffektors eine kontinuierliche Messung des Montageortes nicht bis zum mechanischen Kontakt möglich, sollte der Zeitraum der Nichterfassung minimiert oder durch Hilfsmessungen angenähert werden.

- *Nachgiebigkeit*
Die Verwendung einer Nachgiebigkeit zum Ausgleich von Poseabweichungen zwischen Roboter-TCP und Montageort beeinflusst die zu realisierenden Fügeprozesse. So ist es einerseits notwendig, die Nachgiebigkeit mit einer notwendigen Steifigkeit zu versehen, so dass das Gewicht des Endeffektors als auch die Prozesskräfte ausgeglichen werden können. Andererseits sollte das System jedoch so nachgiebig sein, dass eine Beschädigung sowohl des Bauteils als auch des Montagehauptkörpers ausgeschlossen werden kann.
- *Synchronisationslauf*
Die hohe mögliche Genauigkeit der Methode wird erst durch die Kombination aller Teilprozesse des Synchronisationslaufes erreicht. Daraus resultiert der Ausschluss von Fügeprozessen, bei denen lediglich Teile des Synchronisationslaufes realisiert werden können.

Aufgrund der beschriebenen Einschränkungen bei der Anwendung der Methode können in Anlehnung an die DIN 8593 - TEIL 0 (2003) die Verfahrensgruppen Fügen durch Schweißen DIN 8593 - TEIL 6 (2003), insbesondere der Schmelzschweißverfahren, Fügen durch Urformen DIN 8593 - TEIL 4 (2003) und Fügen durch Löten DIN 8593 - TEIL 7 (2003) ausgeschlossen werden. Ein Einsatz dieser Verfahren in der Fließmontage findet jedoch nur in sehr vereinzelt Fällen statt.

Die in Fließmontagelinien häufiger eingesetzten Verfahren, wie Zusammensetzen DIN 8593 - TEIL 1 (2003), Füllen DIN 8593 - TEIL 2 (2003), An- oder Einpressen DIN 8593 - TEIL 3 (2003), Fügen durch Umformen DIN 8593 - TEIL 5 (2003) und Kleben DIN 8593 - TEIL 8 (2003), lassen sich prinzipiell mit der be-

schriebenen Methode im Fließbetrieb durchführen. Eine weitere Einschränkung des Gültigkeitsbereiches der Methode kann nur im Rahmen von konkreten Anwendungsszenarien durchgeführt werden.

5.7 Zusammenfassung

In Kapitel 5 wurde ein allgemeingültiges Synchronisationsprinzip für die förderbandsynchrone Montage erarbeitet. Der Schwerpunkt des Synchronisationsprinzips liegt auf dem Ausgleich von sämtlichen Posedifferenzen zwischen dem Roboter und dem Produkt. Ein Fortschritt gegenüber dem Stand der Technik sind die erstmalige Erfassung der Posedifferenzen und die Synchronisation in sechs Freiheitsgraden. Dadurch kann eine gegenüber bisherigen Lösungen deutlich gesteigerte Verfolgegenauigkeit erreicht werden, was zu einem erhöhten Einsatzpotential der förderbandsynchronen Montage führt. Zusammenfassend lässt sich das Synchronisationsprinzip wie folgt beschreiben:

Für die Synchronisation in allen Freiheitsgraden ist es notwendig, die Posedifferenzen zwischen dem Roboter und dem Montagehauptkörper zu erfassen. Aufgrund von relativen Schwingungen des Montagehauptkörpers zum Fördersystem und montagehauptkörpereigener Schwingungen ist es erforderlich, die Pose des Montageortes am Montagehauptkörper sensoruell zu erfassen. Nur bei einer Synchronisation von Roboter-TCP zu Montageort am Montagehauptkörper kann ein vollständiger Ausgleich der Posedifferenzen erreicht werden.

Um während des Montageprozesses unzulässige Kontaktkräfte zu vermeiden und gleichzeitig auch bei hohen Frequenzen eine ausreichende Verfolgegenauigkeit zu erreichen, wird eine Nachgiebigkeit in das Greifsystem integriert. Von den untersuchten Möglichkeiten des Einbaus eines komplimenten Systems wurde die Integration in den Roboterflansch als die am besten geeignete Variante identifiziert. Somit ist es möglich, dass nicht regelbare Posedifferenzen passiv ausgeglichen werden.

Der Erfassungsbereich der zu verwendenden Sensorsysteme und die Synchronisation in sechs Freiheitsgraden erfordern einen speziellen Synchronisationslauf. Dieser wird über eine schrittweise Annäherung der zu synchronisierenden Systeme definiert. Während der Grobpositionierung werden die Systeme bezüglich der Geschwindigkeit und Position in Förderrichtung angenähert. Die Phase der Grobpositionierung entspricht daher den Synchronisationsprinzipien des Standes

der Technik. Während der berührungslosen Feinpositionierung werden anhand von im Greifsystem integrierten berührungslosen Sensoren die Posedifferenzen erfasst und ausgeglichen. Der Montageprozess stellt die dritte Phase des Synchronisationslaufes dar. Wie in Phase 2 werden auch hier die Posedifferenzen erfasst, allerdings unter Verwendung von taktilen Sensoren.

Ein weiterer Vorteil des hier vorgestellten Synchronisationsprinzips ist neben der mit anderen Methoden bisher nicht erreichten Synchronisation in sechs Freiheitsgraden, auch die prinzipielle Übertragbarkeit auf eine Vielzahl von Montageprozessen. Das erarbeitete Prinzip kann dabei sowohl fördersystem- als auch produktflexibel eingesetzt werden.

6 Entwicklung von Möglichkeiten der Prozessdatenerfassung

6.1 Allgemeines

Die Anwendung der entwickelten Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Montage erfordert eine messtechnische Erfassung des Montagehauptkörpers sowie des Montageortes am Montagehauptkörper während der einzelnen Phasen des Synchronisationslaufes. Für messtechnische Aufgaben steht generell ein breites Spektrum an unterschiedlichen Messprinzipien und Sensoren zur Verfügung. Um das am besten geeignete Sensorsystem für den jeweiligen Anwendungsfall zu identifizieren, ist eine methodische Herangehensweise, wie sie beispielsweise von ZELLER (1995) beschrieben und in Abbildung 6-1 dargestellt ist, zielführend.

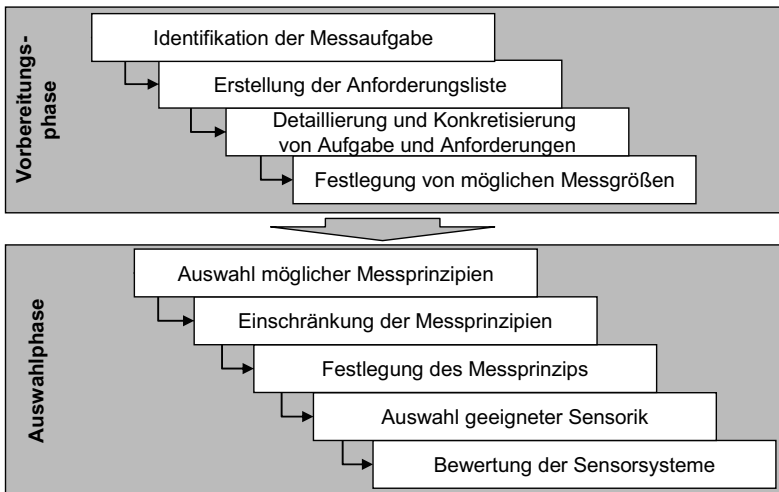


Abbildung 6-1: Methodische Vorgehensweise für die Auswahl von Sensorsystemen nach ZELLER (1995)

Danach wird der Auswahlprozess in eine Vorbereitungsphase und eine Auswahlphase untergliedert. In der Vorbereitungsphase ist die Detailierung der Anforderungen an das Sensorsystem sowie die Definition der möglichen Messgrößen

Gegenstand der Arbeiten, während in der Auswahlphase die geeigneten Sensoren und das dazu gehörende Sensorsystem bestimmt werden.

Zur Identifikation der Messaufgabe als ersten Schritt der Vorbereitungsphase ist die Analyse der notwendigen Sensorfunktionen erforderlich. Diese werden in der Anforderungsliste gesammelt und aufbereitet, auf deren Basis dann die Aufgabenstellung konkretisiert wird. Ferner kann anhand der Anforderungsliste eine Auswahl geeigneter Messgrößen getroffen werden. Grundsätzlich muss in der Vorbereitungsphase darauf geachtet werden, dass durch die Definition der Messaufgabe keine Lösungswege vorgegeben werden.

Zur Erfassung einer Messgröße können unterschiedliche Messprinzipien angewendet werden. In der Auswahlphase wird daher schrittweise ein geeignetes Messprinzip festgelegt, anhand dessen die verfügbaren Sensoren und Sensorsysteme herstellernerneutral gesucht werden können. Diese müssen anhand der Anforderungsliste bewertet und als letzter Schritt, das am besten geeignete System ausgewählt werden.

6.2 Identifikation der Messaufgabe

Die zu erwartenden Messaufgaben lassen sich in anhand des in Kapitel 5 beschriebenen Synchronisationsprinzips und den daraus resultierenden Prozessphasen in drei voneinander zu differenzierende Aufgaben unterteilen:

Erfassung des Montagehauptkörpers im Fördersystem bei Eintritt in die Anlage und Grobverfolgung dessen Position

Während der Phase der Grobpositionierung ist es notwendig, die aktuelle Position des Montagehauptkörpers zu erfassen. Die Bestimmung der Position des Montagehauptkörpers ermöglicht einerseits die Auslösung des Montageprozesses und somit den Start der Synchronisation aufgrund einer Anwesenheitskontrolle und ist gleichzeitig die Grundlage für die weiteren Synchronisationsphasen. Da während der Grobpositionierung kein Kontakt zwischen Roboter und Montagehauptkörper zu erwarten ist, kann als Messgröße die Position in Förderrichtung gewählt werden.

Berührungslose Detektion der Posedifferenzen von Montagehauptkörper und Roboter während der Annäherungsphase

Die berührungslose Erfassung der Pose des Montageortes am Montagehauptkörper sollte, wie in Abschnitt 5.2 analysiert, mittels eines in den Endeffektor integrierten Sensorsystems erfolgen. Aufgabe dieses Systems ist die Messung der relativen Differenz des Montageortes zum Roboter-TCP in sowohl den translatorischen als auch rotatorischen Freiheitsgraden. Der Messbereich des Systems sollte den Bereich von der Grobposition bis zum mechanischen Kontakt zwischen Bauteil und Montagehauptkörper abdecken.

Messung von Kräften und Momenten während der Kontaktphase

Während des Montageprozesses ist es notwendig, einerseits die Posedifferenzen zwischen Bauteil und Montagehauptkörper auszugleichen und andererseits die Kontaktkräfte zu erfassen. Der Ausgleich der Posedifferenzen sollte dabei sowohl aktiv durch den Roboter auf Basis der Sensorik als auch passiv durch die in Abschnitt 5.3 beschriebene Nachgiebigkeit erreicht werden. Die Erfassung der Kontaktkräfte während des Montageprozesses ermöglicht neben dem Ausgleich der Posedifferenzen eine Regelung des Fügeprozesses, so dass auch komplexe Fügebewegungen ausgeführt werden können.

6.3 Anforderungen an die Prozessdatenerfassung

Die Anforderungen an die Prozessdatenerfassung lassen sich folgendermaßen definieren.

- *Qualität der Messdaten*
Die Sensorsysteme sollten einerseits eine hohe Qualität der Messdaten erreichen und diese über den jeweils notwendigen Arbeitsbereich erreichen.
- *Geringe Bauabmaße*
Die Sensorsysteme sollten prozessnah positioniert werden können, um eventuelle Nachteile durch Verdeckung oder Überlagerung durch Fremdeinflüsse minimieren zu können. Daher ist eine Integration im Endeffektor notwendig. Um die Dynamik des Systems nicht negativ zu beeinflussen, sind geringe Bauabmaße und Massen notwendig.

- *Robustes Messverfahren*
Das Messverfahren muss eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber Umwelt- und Prozesseinflüssen aufweisen.
- *Verwendbarkeit der Messdaten*
Zur Minimierung von Fehlereinflüssen sollten die gemessenen Daten direkt in Steuerungs- und Regelkreisen verwendet werden können und nicht in zusätzlichen Konvertierungsschritten zur Berechnung der Stellgrößen aufbereitet werden müssen.
- *Unabhängigkeit des Messverfahrens*
Das Messverfahren kann für ein breites Spektrum an Prozessen und Materialien eingesetzt werden.
- *Technische Reife des Verfahrens*
Ausgereifte Verfahren werden bereits mit Erfolg in anderen Messaufgaben eingesetzt. Für eine schnelle Implementierung und die prozesssichere Bestimmung der gewünschten Daten ist dies eine wesentliche Eigenschaft.
- *Schnelle und einfache Kalibration des Sensorsystems*
Ein wesentliches Kriterium für die Auswahl eines Sensorsystems ist die Möglichkeit, das System vor dem Hintergrund der geforderten Produkt- und Prozessflexibilität schnell auf Variationen im Prozess zu kalibrieren.
- *Hohe Dynamik*
Die Sensoren sollten schneller als der Roboter sein, mindestens jedoch in der Nähe des IPO-Taktes des Roboters. Das bedeutet derzeit eine Abtastgeschwindigkeit von min. 40 Hz.

6.4 Berührungslose Erfassung der Posedifferenzen

6.4.1 Allgemeines

Die berührungslose Erfassung der Posedifferenzen zwischen Roboter und Montageort am Montagehauptkörper ist während der Prozessphasen der Grobpositionierung und der Annäherung notwendig. Die Messaufgaben lassen sich bezüglich der zu erfassenden Messdaten und der zu verwendenden Sensorsysteme zusammenfassen. Dies ist zulässig, da in beiden Aufgaben die Pose des Mon-

tagehauptkörpers erfasst werden soll. Unterschiede bestehen lediglich darin, dass während der Grobpositionierung nur ein Freiheitsgrad und während der Feinpositionierung alle sechs Freiheitsgrade gemessen werden müssen.

Als Messgrößen sind die Positionsabweichung zwischen Bauteil und Montagehauptkörper als Weg und die Winkelabweichung zu detektieren. Beide Messwerte sind innerhalb eines kartesischen Koordinatensystems mit dem Roboter-TCP als Koordinatenursprung zu erfassen. Die Werte sollen als relative Differenzen an die Robotersteuerung weitergegeben werden. Der Arbeitsbereich der auszuwählenden Systeme muss anhand des zu automatisierenden Montageprozesses gewählt werden, jedoch sollten üblicherweise translatorische Differenzen von min. 0,1 mm und rotatorische von min. 0,5 ° sicher detektiert werden, um die geforderte Verfolgengenauigkeit zu erreichen.

6.4.2 Möglichkeiten der Datenerfassung

Nach HECKEL (1995) und BALLANTYNE (1999) können Messsysteme zur Posebestimmung über eine Messung der Abstände oder Konturen in berührende und berührungslose Messsysteme unterschieden werden (vgl. Tabelle 6-1).

Tabelle 6-1: Aufstellung von möglichen Messprinzipien zur Posebestimmung (erweitert nach HECKEL (1995))

Berührend	Mechanisch	Taster					
		Koordinatenmessgerät					
Berührungslos	Akustisch	Ultraschall					
	Elektrisch	Kapazitiv					
		Induktiv					
	Optisch	Inkohärentes Licht	Geo-metrische Verfahren	Triangulation	aktiv	Punkt	
						Linie	
					passiv	Codiert	
						Stereobild	
					Zielmarken		
			Laufzeitmessung	Laufzeitmessung			
			Fokus	Phasenmessung			
		Fokussierverfahren					
	Kohärentes Licht	Interferometrische Verfahren	Interferometrie				
Holografische Interferometrie							
Speckle-Verfahren							

Bei der *berührenden, mechanischen* Abstandsmessung wird mittels mechanisch gekoppelter oder elektrischer Tastspitzen in Verbindung mit einer Wegmesseinrichtung der aktuelle Abstand bestimmt (EGELKAMP 1989, HALLER 1998).

Die *akustischen*, berührungslosen Messsysteme werden durchweg im Ultraschallbereich betrieben (EGELKAMP 1989) und lassen sich in das Echolot- und dem Interferenz-Prinzip einteilen (ROGOS 1989).

Elektrische Messsysteme bestimmen über eine Änderung der Induktion (BURKHARDT et al. 2004) oder der Kapazität (BERLING et al. 2005), den Abstand zwischen Sensor und Werkstück.

Optische Messverfahren besitzen den Vorteil der berührungslosen und schnellen Antastung des Werkstücks und können die dreidimensionale Form unabhängig von den Werkstoffeigenschaften bestimmen (HECKEL 1995). Ein systematischer Überblick über die verschiedenen optischen 3D-Messverfahren ist beispielsweise bei MOLITOR (1988), STRAND (1985) oder TIZIANI (1989) zu finden. Bei optischen Verfahren ist eine Untergliederung in Verfahren mit kohärentem und inkohärentem Licht möglich. Zu den kohärenten Verfahren zählen die Interferometrie (RUOFF 1989), die holografische Interferometrie (DIEDRICHS 2002) und das Speckle-Verfahren (TUTSCH ET AL. 2001). Die inkohärenten Messverfahren können in *fokussierende* auf der *Lichtlaufzeit basierende* und *geometrische Verfahren* unterteilt werden (RUOFF 1989, ERTL 1979). Die *geometrischen Verfahren* basieren auf dem Prinzip der Triangulation und lassen sich wiederum in aktive und passive Verfahren einteilen. Bei der aktiven Triangulation kommen dabei punktförmige, linienförmige und codierte Beleuchtungssysteme zur Anwendung (SEITZ et al. 1986, WOLLNACK 2001, WOLLNACK et al. 2001, MEADOWS et al. 1970, SEIB & HÖFLER 1990). Bei der passiven Triangulation wird das Bauteil von einer Stereo- oder Mehrkameraanordnung aufgenommen. Durch das Aufbringen von Zielmarken oder die modellbasierte Hinterlegung des Beobachtungsobjektes kann dieses Verfahren verbessert werden (WOLLNACK 2001, WOLLNACK et al. 2001, DEMANT et al. 1998).

6.4.3 Einschränkung der Messprinzipien

Trotz der Vielfalt an messtechnischen Alternativen zur Posebestimmung haben sich nur wenige Systeme am Markt etabliert. Auf Basis von bereits realisierten Systemen kann daher eine Vorauswahl geeigneter Systeme getroffen werden.

SANTOCHI & DINI (1998) und SAAD et al. (1999) geben einen Überblick über die in der Montage und bei der Automatisierung mit Robotern eingesetzten posebestimmenden Sensortechnologien. Für die berührungslose Detektion der Posedifferenzen von Montagehauptkörper und Roboter werden zumeist bildverarbeitende optische Systeme eingesetzt. So verwenden YOON et al. (2006) und MITTRAPIYANURUK et al. (2004) CCD-Kameras, um die Positionsdifferenzen zwischen Fördersystem und Roboter zu detektieren. Darüber hinaus werden bildverarbeitende Verfahren bei der Kalibrierung von Robotern (ARAI et al. 2005), im Rahmen der Mikromontage (HESSELBACH et al. 2006) und zum Verfahren von autonomen Robotern (CARELLI et al. 2005) eingesetzt. Neben diesen existieren jedoch weitere Verfahren zur Feinpositionierung von Robotern mittels induktiven Sensoren (SCHLICKENRIEDER 2008) oder auch mittels Triangulation (MOSANDL 2005).

6.4.4 Bewertung und Auswahl

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine Vielzahl von messtechnischen Alternativen zur Posebestimmung existiert. Aus diesen werden jedoch nur wenige in der Automatisierungstechnik eingesetzt. Die qualitative Bewertung in Tabelle 6-2 zeigt, dass die optischen, bildverarbeitenden Systeme am erfolgversprechendsten für die Anwendung in der förderbandsynchronen Montage erscheinen. Bei der beschriebenen Verwendung von bildverarbeitenden Systemen ermöglichen diese eine gleichzeitige Erfassung aller Freiheitsgrade des Montagehauptkörpers. Darüber hinaus können gleichzeitig qualitätssichernde Maßnahmen, wie beispielsweise eine Anwesenheitskontrolle durchgeführt werden.

Die letztendliche Auswahl des zu integrierenden Systems ist abhängig von dem speziellen Montageprozess und kann daher im Rahmen einer allgemeingültigen Lösung nicht erfolgen. Auf Basis von bereits realisierten Systemen kann jedoch eine Vorauswahl geeigneter Systeme getroffen werden.

Tabelle 6-2: Qualitative Bewertung der Möglichkeiten der Posebestimmung

	Akustisch	Elektrisch	Optisch
Qualität der Messdaten			
Geringe Baumaße			
Robustheit und Geschwindigkeit			
Verwendbarkeit der Messdaten			
Unabhängigkeit des Messverfahrens			
Technische Reife des Verfahrens			
Kalibrationsgeschwindigkeit			
Hohe Dynamik			
Legende	geringer Erfüllungsgrad bezüglich der Anforderung	mittlerer Erfüllungsgrad bezüglich der Anforderung	hoher Erfüllungsgrad bezüglich der Anforderung

6.5 Taktile Erfassung der Kräfte und Momente

6.5.1 Allgemeines

Die taktile Erfassung der während des Montagevorganges auftretenden Kräfte und Momente ist während der dritten Phase des Synchronisationslaufes notwendig. Unter Zuhilfenahme dieser Daten können die auftretenden Posedifferenzen ausgeglichen, der Montageprozess unterstützt und Beschädigungen der Bauteile vermieden werden.

Bei der Messung der Kräfte und Momente ist es notwendig, die Rückstellkräfte bzw. -momente der passiven Nachgiebigkeit zu berücksichtigen. Als relevante Messgrößen wurden die Kraft und das Moment identifiziert. Der Messbereich ist prozess- und produktabhängig und kann daher nur für jede Aufgabe gesondert bestimmt werden.

6.5.2 Möglichkeiten der Datenerfassung

Zur Erfassung der Messgrößen Kraft und Moment stehen unterschiedliche Messprinzipien zur Verfügung. Einen Überblick über die möglichen Verfahren zur Messung von Kräften und Momenten geben GORINEVSKY et al. (1997), RIPKA & TIPEK (2007) und WEBSTER (1999).

Tabelle 6-3 zeigt einen Überblick über die möglichen Verfahren zur Bestimmung von Kräften. Die Bestimmung von Momenten basiert auf den gleichen Wirkprinzipien, erfordert aber eine andere Anordnung der einzelnen Sensorsysteme (JUCKENACK 1994, GARSHELIS 1999).

Tabelle 6-3: Aufstellung von möglichen Messverfahren zur Messung von Kräften und Momenten

Mechanisch	Massenvergleich	Balkenwaage		
		Schnellwaage (römische Waage)		
		Zeigerwaage		
	Gewichtskraftmessung	Federwagen		
Fluidisch	Hydraulisch	Kraftmessdose / Manometer		
	Pneumatisch			
Elektrisch	Widerstandsmessung	Dehnungsmessstreifen		
		Potentiometer		
		Induktiv		
		Kapazitiv		
Magnetisch	Magneto-resistiv			
	Magneto-elastisch			
Optisch	Geometrische Verfahren	Triangulation	aktiv	Punkt
				Linie
			passiv	Stereobild
				Zielmarken
		Photoelektrisch		

Die *mechanischen Messverfahren* basieren auf dem Vergleich mit Standardgewichten oder der Auslenkung von Federelementen (BECKWIDTH et al. 2007).

Die *fluidischen Messverfahren* basieren auf der nahezu linearen Umwandlung von Kräften in Druck bei der Einwirkung auf fluidische Medien (MORRIS 1997, BECKWIDTH et al. 2007). Es werden hydraulische und pneumatische Messverfahren unterschieden.

Elektrische Messsysteme bestimmen über eine Änderung des Widerstandes, der Induktion oder der Kapazität die einwirkenden Kräfte (ELBESTAWI 1999). Zumeist werden diese Verfahren mit Piezosystemen oder Dehnungsmessstreifen eingesetzt (BECKWIDTH et al. 2007).

Die *magnetischen Messverfahren* detektieren die Auswirkung der Kraft auf das magnetische Feld. Das Prinzip der magnetoresistiven Verfahren basiert auf der Änderung des Widerstandes von Metallen, wenn diese sehr stark abgekühlt einem Magnetfeld ausgesetzt werden (ELBESTAWI 1999). Magnetoelastische Sensoren nutzen die stressinduzierten Änderungen in den Eigenschaften des magnetisierten Materials (BARBATO & BRAY 1994).

Die *optischen Verfahren* basieren auf der Messung der Auslenkung von elastischen Körpern. Dafür können alle eingangs beschriebenen geometrischen Verfahren genutzt werden (MIGEON & LENEL 2007).

6.5.3 Einschränkung der Messprinzipien

Die Messung von Kräften und Momenten während des Montageprozesses ist in einer Vielzahl von Anwendungen realisiert (GULDNER et al. 2003). Die umgesetzten Beispiele reichen dabei von der Führung entlang eines Bauteils mit definiertem Anpressdruck (LANGE & HIRZINGER 1996) über die Montage von Kuppungen (ARAI et al. 2006) bis zu dem Fügen von Zylindern in Motorblöcke (JÖRG et al. 2000). Darüber hinaus ist die kraft-momentenüberwachte Regelung einer der Bausteine der Mensch-Roboter-Kooperation (LU & CHUNG 2005, KRÜGER et al. 2005).

Im Bereich der Robotik haben sich so genannte 6-Komponenten-Kraft-Momenten-Sensoren (KMS) durchgesetzt. Dabei können zwei gängige Funktionsprinzipien unterschieden werden (GORINEVSKY et al. 1997). KMS mit hoher Steifigkeit basieren auf vier Verformkörpern, die kreuzförmig angeordnet sind. An ihnen sind Dehnmessstreifen angebracht, mit denen die Verformung und somit über das Hook'sche Gesetz auch Kräfte und Momente gemessen werden können. Mit Hilfe einer Kalibrierungsmatrix lassen sich die Messwerte der Dehnmessstreifen in die 6 kartesischen Komponenten von Kraft und Moment überführen. Bei nachgiebigen KMS ist die Verformung aufgrund von einwirkenden Kräften und Momenten größer. Sie wird durch mehrere Federelemente realisiert, die zwischen den Montageplatten angebracht sind. Die Messung der Auslenkun-




















gen erfolgt optisch durch so genannter PSD-Elemente (Position Sensitive Detector). Daraus können dann wieder die kartesischen Kräfte und Momente berechnet werden.

6.5.4 Bewertung und Auswahl

Zur Bestimmung des am besten geeigneten Verfahrens zur Messgrößenerfassung wurde eine Bewertung der nach der Einschränkung verbliebenen Messprinzipien gemäß der Anforderungsliste durchgeführt und in Tabelle 6-4 dargestellt. Dabei wurden bei den elektrischen Prinzipien der starre und bei den optischen Prinzipien der nachgiebige KMS als Beispiel herangezogen.

Aufgrund der Möglichkeit der Integration der Nachgiebigkeit direkt in den Sensor sind nachgiebige KMS zu bevorzugen. Zusätzlich werden bei nachgiebigen KMS Posedaten gemessen, die erst durch eine Transformation in Kräfte und Momente überführt werden. Da bei dem beschriebenen Synchronisationsprinzip jedoch eine Positionsregelung implementiert wird, kann auf diese Transformation verzichtet werden.

Tabelle 6-4: Qualitative Bewertung der Möglichkeiten der Kraft-Momenten-Messung

	Widerstandsmessung	Photoelektrisch	
Qualität der Messdaten			
Geringe Baumaße			
Robustheit und Geschwindigkeit			
Verwendbarkeit der Messdaten			
Unabhängigkeit des Messverfahrens			
Technische Reife des Verfahrens			
Kalibrationsgeschwindigkeit			
Hohe Dynamik			
Legende	geringer Erfüllungsgrad bezüglich der Anforderung 	mittlerer Erfüllungsgrad bezüglich der Anforderung 	hoher Erfüllungsgrad bezüglich der Anforderung 

6.6 Zusammenfassung

In Kapitel 6 wurden die Möglichkeiten der Prozessdatenerfassung untersucht. Dafür wurden eingangs die Messaufgaben erörtert und entsprechende Anforderungen abgeleitet. Mithilfe dieser Anforderungen wurde die Vielfalt der möglichen Messprinzipien für die Erfassung der Posedifferenz sowie der Kräfte und Momente während des Montagevorganges bewertet und eine Auswahl vorgenommen.

Für die berührungslose Erfassung der Posedifferenzen während der Feinpositionierung erweisen sich die optischen Verfahren als optimal. Dies liegt an der Möglichkeit der gleichzeitigen Bestimmung aller notwendigen Freiheitsgrade und der hohen Produkt- und Prozessflexibilität. Darüber hinaus unterstreicht der vielfache Einsatz von bildverarbeitenden Systemen in der Robotik deren Eignung.

Die Messung von Kräften und Momenten wird derzeit im Bereich der Robotik vorwiegend mittels KMS durchgeführt. Diese basieren entweder auf elektrischen Prinzipien und verwenden Dehnmessstreifen oder auf optischen Verfahren mittels Positionsdetektoren. Letztere werden im Bereich der Montage vorwiegend eingesetzt, da sie gleichzeitig eine Nachgiebigkeit im starren Gesamtsystem darstellen. Dadurch können, wie in den Anforderungen definiert, unerwünscht hohe Kontaktkräfte vermieden werden.

Als Schlussfolgerung ergibt sich, dass für die förderbandsynchrone Montage bildverarbeitende Sensoren und weiche KMS auszuwählen sind. Eine weitergehende Spezifizierung der Prozessdatenerfassung kann aufgrund der zu erwartenden großen Unterschiede bezüglich der Messbereiche nur für einzelne, konkrete Anwendungen erfolgen.

7 Aufbau einer Pilotanlage

7.1 Allgemeines

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode zur Synchronisation eines Handhabungsgerätes zu einem kontinuierlich bewegten Montageobjekt in sechs Freiheitsgraden wurde anhand eines prototypischen Versuchsaufbaus getestet. Aufgrund der wirtschaftlichen und technischen Anforderungen erfolgte der Aufbau der Pilotanlage weitgehend aus am Markt erhältlichen und bereits erprobten Standardkomponenten.

Als Handhabungsgerät wurde ein 6-Achsen-Knickarm-Roboter in Verbindung mit einer Linearachse verwendet. Dieser ermöglicht zum einen den Ausgleich sowohl von Positions- als auch von Orientierungsdifferenzen und stellt andererseits den derzeitigen Stand der Technik in der Automobilindustrie dar. Damit ist eine prinzipiell aufwandsarme Integration in vorhandene Anlagentechnik gewährleistet.

Als Montageprozess für die Validierung wurde der Prozess der Radmontage an eine Fahrzeugkarosserie gewählt. Die Montage eines Rades erfordert aufgrund der Passung E8-H7 eine maximale Fügetoleranz von 0,13 mm. Darüber hinaus sind die Räder durch eine hohe Zahl an Varianten bezüglich der Geometrie und der Optik gekennzeichnet. So ist es das Ziel, sowohl Aluminium- als auch Stahlfelgen in den Dimensionen von 6,5 J16 bis 8 J18, was einer Reifendimension von 195/55 R16 bis 225/40 R18 entspricht, zu montieren.

Neben diesen hohen Genauigkeitsanforderungen und der Variantenvielfalt der Bauteile ist die Radmontage durch weitere Besonderheiten gekennzeichnet. So muss während der Montage, bzw. der Synchronisation, die Geometrie des Fahrwerkes, also Dreh- und Lenkwinkel sowie Sturz detektiert werden. Bei diesen Kriterien kann es auch während der Montage des Rades durch einwirkende Kräfte zu Lageänderungen kommen, die kontinuierlich berücksichtigt werden müssen.

Beim Verschrauben des Rades ist zu beachten, dass ein vorgegebener Schraubzyklus mit den Teilzyklen Vorspannen, Lösen sowie drehwinkel- und drehmomentgesteuertem Endanziehen eingehalten werden muss. Die Gesamttaktzeit des

Systems darf ein Maximum von 1 Minute nicht überschreiten, da dies der benötigten Taktzeit der manuellen Montage entspricht.

7.2 Komponenten der Anlage

7.2.1 Allgemeines

Der prototypische Versuchsaufbau für die automatisierte förderbandsynchrone Montage besteht, wie in Abbildung 7-1 zu sehen, aus folgenden Komponenten:

- Fördersystem mit Portal und Laufkatze sowie dem Montagehauptkörper,
- Roboter mit Lineareinheit und Steuerung,
- Endeffektor,
- sonstige Einrichtungen, wie Rad- und Schraubenzuführung, Steuerungen.

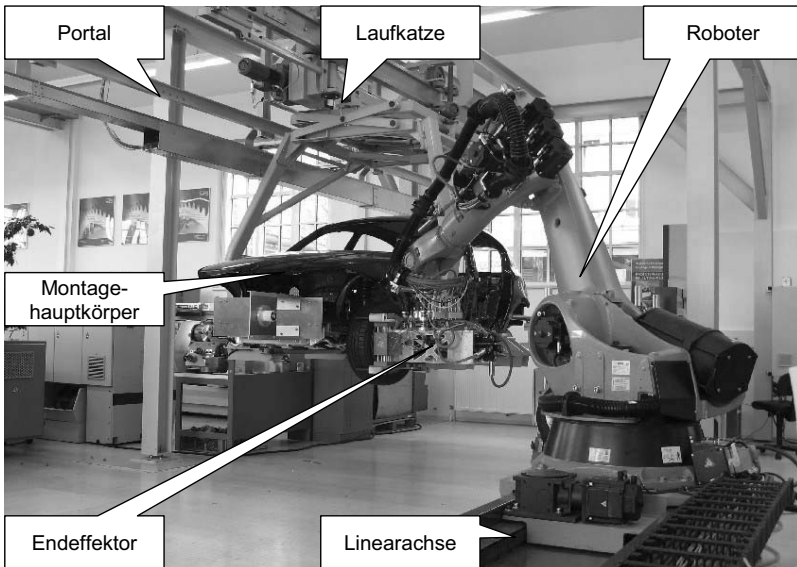


Abbildung 7-1: Aufbau der Pilotanlage

7.2.2 Fördersystem mit Fahrzeug

Das Fördersystem ist eine EHB, wie sie in Unterabschnitt 3.2.3 beschrieben wurde. Aufgrund zusätzlicher Adaptionen kann diese auch in der Höhe (z-Achse) variiert werden. Dieses verursacht eine erhöhte Schwingungsneigung durch den verlängerten Hebel um die Aufhängung der Laufkatze an der Schiene. Darüber hinaus wurden die Motoren (EURODRIVE 2004) mit Schrittgebern vom Typ SICK-AV1H (STEGMANN 2006) ausgestattet, um ein Conveyor-Tracking zu ermöglichen.

Die Verfahrensgeschwindigkeit des Fördersystems beträgt 6 m/min (0,1 m/s) und der Versuchsaufbau verfügt über eine Verfahrlänge von 9 m bei 0,5 m möglicher Höhendifferenz. Die Steuerung des Fördersystems wurde, abgesehen von der Einbindung in die Not-Aus-Regelkreise, nicht verändert. Der Montagehauptkörper ist ein Fahrzeug der Marke BMW, Modell E81.

7.2.3 Roboter mit Linearachse

Als Handhabungssystem wurde ein 6-Achsen-Knickarmroboter vom Typ KUKA KR180-2 Serie 2000 (KUKA ROBOTER 2004) ausgewählt. Zusätzlich wird eine 5000 mm lange Linearachse vom Typ KUKA KL1500/2 (KUKA ROBOTER 2005) und eine KR C2-Steuerung eingesetzt. Die Linearachse gewährleistet eine uneingeschränkte Bewegung des Roboters über den gesamten Montageablauf hinweg. Die Positionswiederholgenauigkeit des Roboters mit Linearachse wird vom Hersteller mit $\pm 0,2$ mm angegeben.

Die Steuerung des Industrieroboters ist PC-basiert, über die Programmiersprache KUKA Robot Language (KRL) frei programmierbar und für Hard- und Softwareerweiterungen prinzipiell offen. Über die roboterinternen Ein- und Ausgänge können externe Sensoren und Aktoren an die Robotersteuerung angeschlossen werden. Hierfür stehen die gängigen Bussysteme INTERBUS, PROFIBUS und DeviceNet zur Verfügung (KUKA ROBOTER 2006b). Die Bedienung und Programmierung des Roboters erfolgt über das KUKA Control Panel (KCP).

7.2.4 Sonstige Einrichtungen

Neben den beschriebenen Komponenten wurden für die Realisierung des Montageprozesses eine Rad- und eine Schraubenübergabestation aufgebaut. Diese er-

wiesen sich als notwendig, um eine für den automatisierten Prozess hinreichende Positionier- und Orientierungsgenauigkeit der zuzuführenden Bauteile zu gewährleisten.

7.3 Entwicklung des Endeffektors

7.3.1 Anforderungen

Der Endeffektor ist das eigentliche Werkzeug des Montagesystems. Daher ist dieser unter Berücksichtigung des jeweiligen Montageprozesses und der -produkte zu konstruieren. Die Anforderungen an den Endeffektor für die im Rahmen dieser Arbeit zu realisierende Radmontage sind:

- *Integration der notwendigen Sensorik*
Die Integration der Sensorik beinhaltet die Positionierung der für die Bildverarbeitung notwendigen Kamera und eines KMS, so dass hohe Messgenauigkeiten erreicht werden können.
- *Bildverarbeitung*
Das Bildverarbeitungssystem muss die Fahrzeugachse zuverlässig erkennen. Daher sollte sie in einem Abstandsbereich von 100 mm bis 500 mm mit einer Messgenauigkeit von ± 5 mm und $\pm 10^\circ$ im Fernbereich sowie $\pm 0,1$ mm und $\pm 0,5^\circ$ im Nahbereich arbeiten können.
- *Kraft-Momenten-Sensorik*
Die an den KMS gestellten Anforderungen sind die zuverlässige Messung von Kräften und Momenten während des Montagevorganges und der Ausgleich von nicht regelbaren, hochfrequenten Posedifferenzen. Die translatorische Nachgiebigkeit sollte im Bereich des Montagepunktes bei etwa ± 3 mm, die rotatorische bei $\pm 3^\circ$ liegen.
- *Geringe Masse*
Eine Minimierung der Masse des Endeffektors ist aufgrund der möglichst hohen Dynamik des Gesamtsystems anzustreben.
- *Hohe Steifigkeit*
Die Steifigkeit des Endeffektors sollte möglichst hoch sein, um negative

Beeinflussungen des Montageprozesses durch Eigenschwingungen zu minimieren.

- *Kompakter Aufbau*

Der kompakte Aufbau des Endeffektors ist aufgrund der daraus resultierenden verringerten Momente am Roboterflansch, der verringerten Massträgheit und der minimierten Kollisionsgefahr mit dem Montagehauptkörper notwendig.

- *Zentraler Schwerpunkt*

Ein zentraler Schwerpunkt des Endeffektors begünstigt die Genauigkeit des am Roboterflansch angeordneten KMS. Darüber hinaus ist bei einer zentralen Anordnung des Schwerpunktes die Auslenkung der nachgiebigen Elemente minimiert.

7.3.2 Aufbau des Endeffektors

Zur Realisierung des Montageprozesses unter Berücksichtigung der in Kapitel 5 beschriebenen Synchronisationsmethode und der in Kapitel 6 ausgewählten Prozesssensorik muss der Endeffektor folgende Komponenten beinhalten:

- Mehrspindelschrauber
- KMS mit Verstärkung
- Gehäuse
- Bildverarbeitungssystem
- Greifsystem

Der Mehrspindelschrauber besteht aus fünf Einbauschraubspindeln vom Typ EST-BG2. Die Schrauber verfügen über ein max. Drehmoment von 160 Nm und sind sowohl drehwinkel- als auch drehmomentgesteuert. Die Steuerung der Schraubsystems wird von einer *flexE05*-Schraubersteuerung (EST 2006) übernommen, welche über Profibus mit der Robotersteuerung verbunden ist.

Als KMS kommen zwei kompakte Systeme vom Typ Schunk FTC 50 (SCHUNK 2005a) zum Einsatz. Der Messbereich des Sensors beträgt ± 300 N und 7-15 Nm. Aufgrund der deutlichen höheren Kräfte und Momente wurde der Sensor extern

verstärkt. Die Beschreibungen des Funktionsprinzips und der notwendigen Adaption werden in Unterabschnitt 7.3.4 vorgestellt.

Das Gehäuse des Endeffektors dient der Aufnahme der einzelnen Komponenten. Darüber hinaus wurde es hinsichtlich eines geringen Massenträgheitsmomentes und der Lage des Schwerpunktes optimiert. Notwendig ist diese Maßnahme, um eine hohe Messgenauigkeit der Sensorik und eine hohe Dynamik des Robotersystems zu gewährleisten.

Das Bildverarbeitungssystem besteht aus einer CCD-Kamera des Typs Sony XC-HR57 (SONY 2004) und einer ringförmigen Platine mit lichtemittierenden Dioden (LED) zur Beleuchtung. Die Bildverarbeitung ist PC basiert und kommuniziert über DeviceNet mit der Robotersteuerung. Eine Beschreibung des Aufbaus, des Funktionsprinzips und der Einbindung in die Systemlandschaft erfolgt in Unterabschnitt 7.3.3.

Das Greifsystem übernimmt das eigentliche Greifen der Räder. Es besteht aus zwei pneumatischen Zweifinger-Parallelgreifern vom Typ Schunk PSH 52 (SCHUNK 2005b) mit einer Greifkraft von je 1760 N bei 6 bar. Die Auswahl erfolgte aufgrund des Hubs von bis zu 128 mm. Dieser Hub ist notwendig, um die unterschiedlichen Raddurchmesser zuverlässig handhaben zu können. Das Greifen der Räder erfolgt an der Lauffläche, um Beschädigungen an der Felge zu vermeiden und eine freie Sicht der Bildverarbeitung durch die Felge zu ermöglichen. Der Aufbau des Endeffektors für die förderbandsynchrone Radmontage ist in Abbildung 7-2 dargestellt.

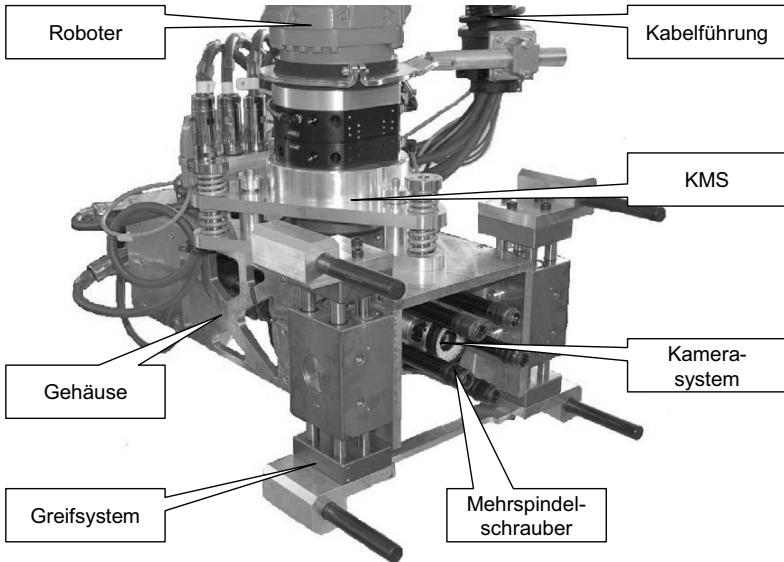


Abbildung 7-2: Aufbau des Endeffektors für die förderbandsynchrone Radmontage

7.3.3 Integration des Bildverarbeitungssystems

Der Aufbau und die verwendeten Komponenten des Bildverarbeitungssystems sind in Abbildung 7-3 und die Integration des Systems in den Endeffektor in Abbildung 7-4 dargestellt.

Kern der Bildverarbeitung ist eine CCD-Kamera vom Typ Sony XCHR57 (SONY 2004) mit einer VGA Auflösung (648 x 494 Pixel) und einer Aufnahmegeschwindigkeit von 60 Vollbildern pro Sekunde. Die Kamera ist zentrisch angeordnet und kann somit durch das Achsloch der Felge schauen. Dadurch ist gewährleistet, dass die Kamera bis zum mechanischen Kontakt der Felge mit der Achse die Posedifferenzen messen kann. Da die Kamera 100 mm hinter der Felge positioniert ist, reicht ein Öffnungswinkel von 40 Grad, um die Radnabe in maximaler Größe zu sehen.

Die Beleuchtung in Form eines Rings von lichtemittierenden Dioden (LED) ist konzentrisch um das Objektiv der Kamera angebracht. Die Öffnung des Rings

für die Kamera wurde minimiert, um trotz geringer Einbaumaße zwischen den Einbauschraubspindeln eine möglichst große Leuchtfläche zu erhalten.

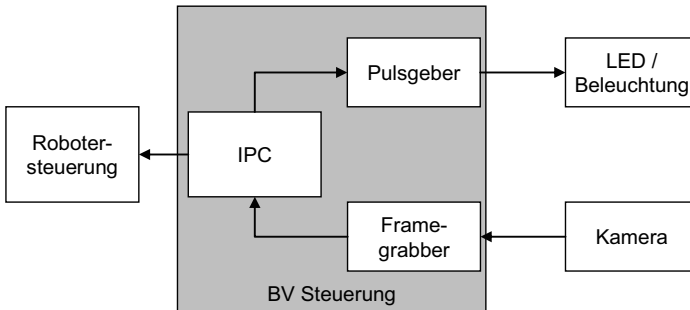


Abbildung 7-3: Aufbau des Bildverarbeitungssystems

Die Kommunikation zwischen dem Industrie-PC (IPC) und der Robotersteuerung erfolgt über das Ethernetprotokoll UDP. Die Pulsgeber für die Laser und die Beleuchtung werden über digitale I/O der Bildverarbeitungssteuerung getriggert.

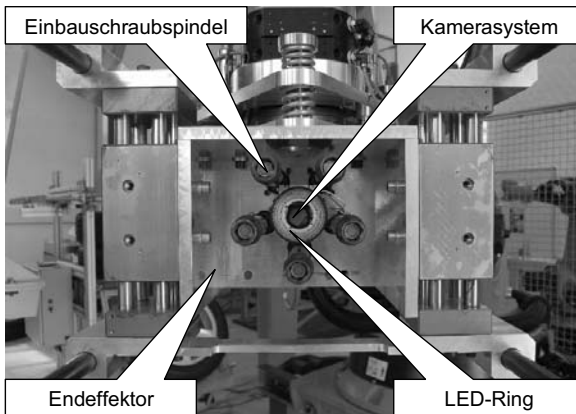


Abbildung 7-4: Integration des Bildverarbeitungssystems in den Endeffektor

7.3.4 Integration des Kraft-Momenten-Sensors

Die Messung der Kräfte und Momente wird von einem nachgiebigen KMS vom Typ Schunk FTC 50 (SCHUNK 2005a) übernommen. Dieser Sensor besteht aus einem optischen Messelement, welches sechs kreisförmig angeordnete Messein-

heiten mit jeweils einer LED, einer Schlitzblende und einem Positionsdetektor (PSD), sowie mehreren Federpaketen bzw. Elastomeren als Verbindungselemente beinhaltet. Bei der Auslenkung der Sensors verschiebt sich der Lichtspalt derart auf den einzelnen horizontal bzw. vertikal angeordneten PSDs, dass eine Berechnung der durch die einwirkenden Kräfte und Momente hervorgerufenen Änderung des TCP ermöglicht wird (GREWE et al. 2001). Der Sensor verfügt über eine Nachgiebigkeit von $\pm 1,5$ mm in der Translation und $\pm 1,5^\circ$ in der Rotation sowie einen Messbereich von $\pm 1,0$ mm und $\pm 1,0^\circ$. Der Messbereich des Sensors beträgt ± 300 N und 7-15 Nm bei einer Abtastrate von 1 kHz. Der Sensor kann mittels DeviceNet an den Roboter angeschlossen werden.

Im Gegensatz zur üblichen Kraft-Momenten-Messung, bei der die Lagedifferenz über eine Steifigkeitsmatrix in Kräfte und Momente umgerechnet wird, kann die Lagedifferenz zur Lageregelung direkt ausgewertet werden. Kalibrierungenauigkeiten oder die Hysterese des Sensors können daher vernachlässigt werden.

Aufgrund des Eigengewichtes des Greifsystems und dem Gewicht des Rades war es notwendig, die Steifigkeit des KMS zu erhöhen. Die maximalen Kräfte und Momente des zur Verfügung stehenden Sensors reichen mit Werten von max. 400 N und 25 Nm für die angestrebte Radmontage nicht aus und mussten daher erhöht werden. Für die Radmontage werden Nachgiebigkeiten von ± 2 mm am Endeffektor-TCP, prozessbedingte Kräfte und Momente von mindestens 1200 N in z-Richtung bzw. 1000 Nm als M_y und M_z erwartet.

Für die Erhöhung der maximalen Amplitude der Nachgiebigkeit des Sensors wurden zwei Sensoren in Reihe verbaut. Dadurch kann bei entsprechendem Hebel eine Nachgiebigkeit von ± 17 mm am Endeffektor-TCP erreicht werden. Darüber hinaus wird das Sensorpaket durch externe Federpakete und Anschläge derart verstärkt, dass dennoch der gesamte Messbereich genutzt werden kann. Die externen Federn sind in ihrer Vorspannung verstellbar, so dass auch bei unterschiedlich schweren Rädern der TCP auf die Nulllage des Sensors justiert werden kann, vgl. Abbildung 7-5. Für das Anwendungsbeispiel Radmontage wurde die Vorspannung so eingestellt, dass sämtliche zu Verfügung gestellten Räder ohne weitere Anpassungen gegriffen und montiert werden können.

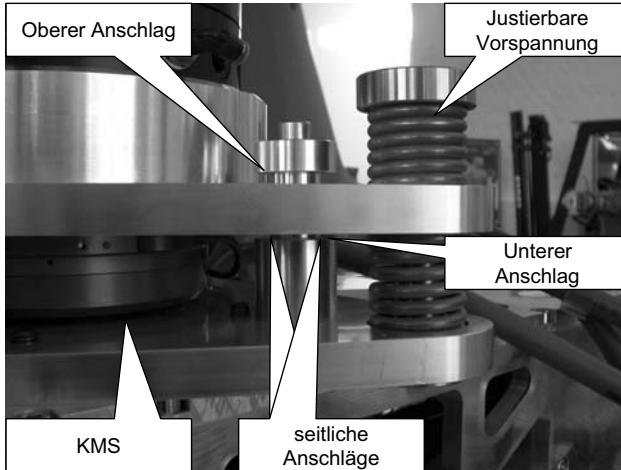


Abbildung 7-5: Adaption des KMS

7.4 Adaption der Robotersteuerung

7.4.1 Anforderungen

Die Steuerung eines Robotersystems für die förderbandsynchrone Montage muss eine Vielzahl von Funktionen erfüllen. Eine hohe Verfolgegenauigkeit kann nur erreicht werden, wenn der Roboter in die Lage versetzt wird, mit einer möglichst hohen Bahngenaugigkeit und Positioniergenauigkeit zu verfahren. Darüber hinaus ist es notwendig, die regelungstechnische Totzeit des Steuerungssystems zu minimieren, um den Nachlauf des Roboters zum Montagehauptkörper ebenfalls so gering wie möglich zu halten.

Im Folgenden werden die Anforderungen an die Robotersteuerung zusammengefasst.

- *Verwendung von Standardkomponenten*
Da das zu entwickelnde System flexibel eingesetzt werden soll, ist es notwendig, Standardkomponenten und -technologien bei der Steuerung und der Sensorintegration zu verwenden.

- *Hohe Positionier- und Bahnengenauigkeit*
Eine hohe Positionier- und Bahnengenauigkeit ist erforderlich, um einerseits den Montagevorgang zu ermöglichen und andererseits die von der Sensorik vorgegebenen Relativposen ohne weitere Regelungsschleifen zu erreichen.
- *Modularer Aufbau*
Ein modularer Aufbau der Steuerung ermöglicht die Anpassung des Systems an weitere Montageaufgaben oder auch den Austausch einzelner Hardwarekomponenten.
- *Integration der Sensorik*
Aufgrund der vorgestellten Synchronisationsmethode ist die Einbindung und Auswertung verschiedener Sensorsysteme und eine damit verbundene schnelle Datenverarbeitung essentiell.

7.4.2 Struktur der Robotersteuerung

Das Steuerungssystem für die förderbandsynchrone Montage basiert auf der adaptiven Steuerung nach LANGE (2003). Abbildung 7-6 zeigt den Aufbau der verwendeten Steuerung. Die Module Rückwärtstransformation (RWT), Roboter mit Regelung (RR) und Vorwärtstransformation (VWT) entsprechen einem normalen Industrieroboter. Das zusätzliche Modul Positionsvorsteuerung (PVS) wird von LANGE (2003) erstmals beschrieben. Aufgrund der Nachgiebigkeit des Endeffektors wurde der Steuerungsarchitektur weiterhin das Modul Endeffektorvorsteuerung (EVS) hinzugefügt.

Die Verwendung von Vorsteuerungen im Gegensatz zu Regelungen ist immer dann vorteilhaft, wenn die wesentlichen Regeldifferenzen gut präzifizierbar sind. Eine Messwertrückführung kann nur bereits aufgetretene Regeldifferenzen reduzieren, nicht aber verhindern, dass sie entstehen.

Die Positionsvorsteuerung nach LANGE (2003) ist eine Vorsteuerung der Achspositionen. Sie führt aufgrund der Kompensation von dynamischen Verzögerungen zu einer Minimierung von kartesischen Bahnfehlern. Damit wird die programmierte Trajektorie in eine fiktive Bahn modifiziert, deren Verarbeitung durch die industrielle Steuerung und den realen Roboter gerade die Ausführung der Soll-Trajektorie ergibt. Das bedeutet, dass die Soll-Trajektorie für die Motorposition exakt ausgeführt werden kann. Dies ist möglich, indem aktuelle und zu-

künftige Werte der Soll-Trajektorie in ein aktuelles Bewegungskommando umgerechnet werden. Dazu werden die Soll-Positionen der einzelnen Achsen für die jeweils nächsten etwa 0,2 Sekunden ausgewertet. Die so adaptierte Robotersteuerung erlaubt eine prädiktive Regelung, da die Vorsteuerung die aktuellen Bahnpunkte aufgrund zukünftiger Soll-Bahnpunkte bestimmt. Nur dadurch ist eine Kompensation der dynamischen Fehler möglich.

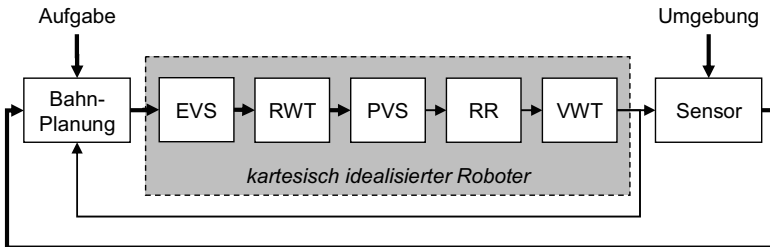


Abbildung 7-6: Aufbau der adaptierten Steuerung (EVS – Endeffektorvorsteuerung, RWT – Rückwärtstransformation, PVS – Positionsvorsteuerung, RR – Roboter mit Regelung, VWT – Vorwärtstransformation)

Die Endeffektorvorsteuerung ist eine Schwingungsdämpfung des Endeffektors. Sie ist aufgrund der in den Endeffektor eingebauten Nachgiebigkeit und der daraus resultierenden Neigung zum Schwingen notwendig. Das zur Schwingungsdämpfung verwendete Input Shaping ist ein lineares Steuerungsverfahren, bei der jeder Positionssprung durch mehrere kleinere Sprünge ersetzt wird. Dadurch schwingt der TCP nach dem letzten Sprung bei Erreichen der Soll-Position nicht. Abbildung 7-7 zeigt die Aufteilung einer Sprungfunktion in zwei kleinere und zeitlich versetzte Sprünge (A_0 ; A_1), wodurch eine schwingungsfreie Antwort als Summe der schwingenden einzelnen Sprungantworten (A_0+A_1) entsteht. Bei Systemen mit großen Abtastperioden, wie Robotersteuerungen sie darstellen, ist es jedoch notwendig, die Impulssequenz als ein Vielfaches der Abtastperiode zu bestimmen. Bei dem von KAMEL et al. (2008a) entwickelten Verfahren werden darüber hinaus Zeitverschiebungen berücksichtigt, so dass auch bei Rampen, z.B. Beschleunigungsrampen, keine bleibende Regelabweichung entsteht. Bei entsprechender Kenntnis der Trajektorie können die kommandierten Signale zeitlich so angelegt werden, dass eine Verzögerung ausgeschlossen ist. Zusätzlich werden die Parameter dahingehend optimiert, dass die Regelfehler auch schon vor dem letzten Teilsprung gering sind (KAMEL et al. 2008b).

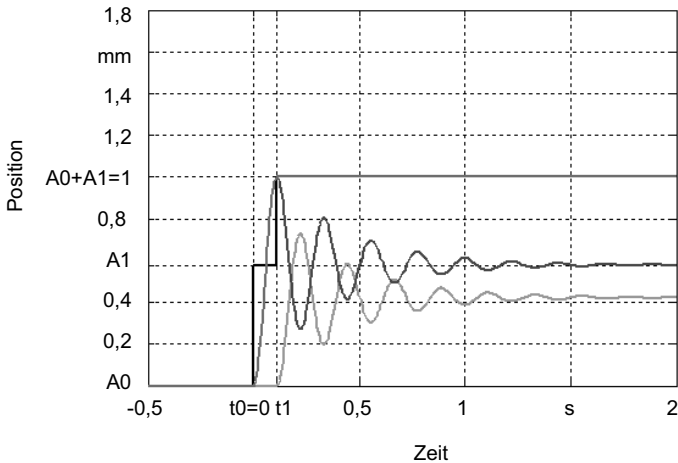


Abbildung 7-7: Anwendung von Input Shaping bei einem Sprung

Insgesamt beschreibt das Input Shaping eine kartesische Vorsteuerung, bei der die jeweils folgenden 0,1 bis 0,2 Sekunden der Soll-Bewegung bekannt sein müssen.

Die gesamte Regelung ist als reine Lageregelung ausgelegt. Dies ist möglich, da sämtliche Sensoren Posedaten als Messgrößen zur Verfügung stellen. Daher kann trotz Verwendung eines KMS auf eine Kraftregelung verzichtet werden. Die Berechnung der Soll-Bahn wird in Abschnitt 8.1 erläutert.

7.4.3 Integration der Sensorik

Für die Realisierung der förderbandsynchronen Montage ist neben der Auswahl geeigneter Sensorsysteme auch deren möglichst effiziente Anbindung an die Robotersteuerung notwendig. Bei der Pilotanlage wurden daher für jede Sensorart geeignete Übertragungssysteme ausgewählt. In Abhängigkeit der jeweils verwendeten Sensorik kommen die Bussysteme Profibus DP und DeviceNet zum Einsatz. Die Bildverarbeitung ist mittels Ethernet unter Benutzung des UDP-Protokolls angeschlossen. Abbildung 7-8 zeigt die Anbindung der einzelnen Systeme.

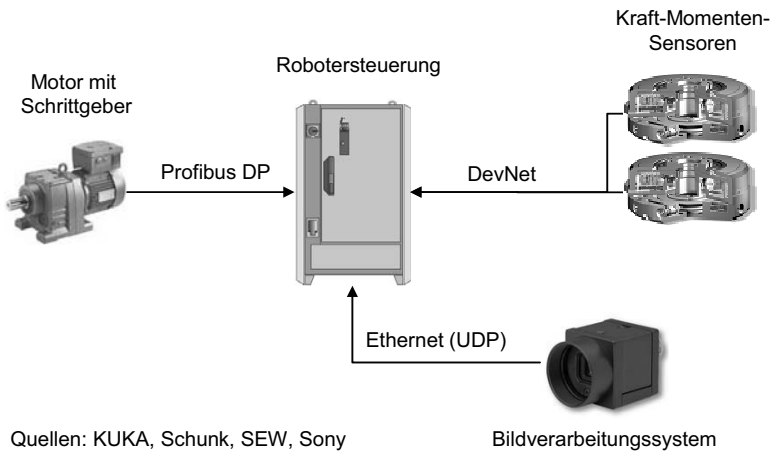


Abbildung 7-8: Anbindung der Sensorsysteme an die Robotersteuerung

Die Einbindung der Sensordaten in die Steuerung erfolgt im Bahnplanungsmo-
dul, siehe Abbildung 7-6. Innerhalb des Moduls werden die vorverarbeiteten
Sensordaten mittels einer Sensorfusion zusammengefasst in die Robotersteuer-
ung integriert. Die Sensorfusion selbst wird durch ein Kalman Filter realisiert,
bei dem die Sensorkorrektur durch alle verfügbaren Sensorwerte mit ihren im
jeweiligen Zustand vorhandenen Genauigkeiten geschätzt wird, siehe auch
LANGE (2003). Mithilfe der fusionierten Sensordaten wird daraufhin die Soll-
Bahn modifiziert, siehe Abschnitt 8.2.

7.5 Zusammenfassung

Der prototypische Versuchstand, der im Rahmen der vorliegenden Arbeit aufge-
baut wurde, besteht aus einer KFZ Karosserie, die sich in einer EHB befindet,
und einem 6-Achsen-Knickarm-Roboter, welcher auf einer Lineareinheit mon-
tiert ist.

Die Demonstration der Funktionalität der förderbandsynchronen Montage erfolgt
anhand der Montage eines Rades im Fließbetrieb. Dabei wurde der gesamte
Montageprozess, von der Zuführung des Rades über die Erkennung des Fahrzeu-
ges, die Positionierung und Orientierung des Rades, die Synchronisation und
letztendlich die Montage prototypisch umgesetzt.

Bei der Entwicklung des Systems wurde besonderes Augenmerk auf den Endeffektor gelegt. In diesem sind sowohl die für den Montageprozess relevanten Komponenten, wie Greifer des Rades und Schraubspindeln zum Einschrauben der Radschrauben als auch die notwendige Prozesssensorik untergebracht. Als Sensorsysteme wurden ein Kamerasystem und Kraft-Momenten-Sensorik in den Endeffektor integriert. Die Kraft-Momenten-Sensorik wurde darüber hinaus über externe Federpakete derart verstärkt, dass die zu erwartenden Prozesskräfte aufgenommen werden können.

Neben der Entwicklung der mechanischen Komponenten waren Adaptionen an der Robotersteuerung notwendig. Daher wurde die Steuerung um mehrere Vorsteuerungsmodule erweitert, die die Bahnfehler des Roboters minimieren und das Schwingen des nachgiebigen Endeffektors vermeiden. Darüber hinaus wurden die einzelnen Sensorsysteme über Bussysteme und Ethernet in die Steuerung integriert.

8 Betrieb der Pilotanlage

8.1 Allgemeines

In Kapitel 7 wurde beschrieben, aus welchen Komponenten die Pilotanlage für die förderbandsynchrone Montage realisiert wurde. Für die Umsetzung einer möglichst hohen Verfolgegenauigkeit zwischen Roboter und Montagehauptkörper sind jedoch neben den eingesetzten Komponenten die Berechnung der vom Roboter zu fahrenden Bahn und die Ausgestaltung des gesamten Montageablaufes notwendig.

Die Berechnung der Soll-Trajektorie erfolgt im Bahnplanungsmodul der in Abschnitt 7.4 beschriebenen Adaption der Robotersteuerung. Als Eingangsgrößen stehen die Sensordaten und der vorab programmierte Montageablauf zur Verfügung. Die jeweilige Soll-Trajektorie ergibt sich aus der Korrektur der programmierten Bahn aufgrund der Sensordaten. Um die beschriebenen Vorsteuerungen benutzen zu können, ist darüber hinaus eine Prädiktion der Bahn notwendig.

Der Montageablauf wurde in Abschnitt 5.5 als Synchronisationslauf hergeleitet. Um diesen anhand eines konkreten Anwendungsbeispiels umzusetzen, sind die jeweiligen Sensorsysteme für die Bahnplanung zu aktivieren und gegeneinander zu gewichten. Darüber hinaus sind während der einzelnen Prozessphasen unterschiedliche Sensorparameter notwendig.

8.2 Bestimmung der Soll-Bahn

8.2.1 Allgemeiner Ablauf

Aufbauend auf der in Abschnitt 7.4 beschriebenen Adaption der Robotersteuerung kann die Soll-Trajektorie des Roboters berechnet werden (LANGE et al. 2008a). Voraussetzung für die Berechnung ist das Vorhandensein einer programmierten Referenz, welche die zu korrigierende Soll-Bahn darstellt. Durch das somit gesicherte Vorliegen einer Folge von Soll-Positionen zu den einzelnen Abtastschritten ist das Geschwindigkeitsprofil gegeben.

Die Bestimmung der Soll-Bewegung des Roboters setzt sich in jedem Abtastschritt aus folgenden Teilschritten zusammen:

- Auslesen der programmierten Soll-Position aus der Referenztrajektorie
- Korrektur der Soll-Position durch Sensorwerte
- Bestimmung der Trajektorie der Endeffektorlage

Für die Bestimmung der Soll-Position wird weiterhin angenommen, dass die Sensor-Soll-Werte auf eine nominelle Objektbahn bezogen sind. Diese Vorgabe ermöglicht ein definiertes Annähern an das Objekt, indem eine anfänglich vorgegebene Posedifferenz im Laufe des Programms reduziert wird. Die Sensor-Soll-Werte werden implizit definiert als die Werte, die von der programmierten Referenzbahn aus gemessen werden, wenn das Zielobjekt in der nominellen Objektlage ist. Dabei sind sowohl die Soll-Bahn als auch die Objektbahn in jedem Abtastschritt durch alle sechs Freiheitsgrade vorgegeben.

8.2.2 Programmierung der Referenztrajektorie

Die Programmierung von Montageaufgaben für die förderbandsynchrone Montage, wie sie in LANGE et al. (2008c) beschrieben ist, kann grundsätzlich bei Stillstand des Fördersystems erfolgen. Die Förderbewegung wird dann nach dem Teach-In Prozess ergänzt.

Beim Teach-In eines Punktes der Roboterbahn ist es notwendig, zu diesem Punkt auch die aktuelle Auslenkung des Sensors sowie die Position der Fördereinrichtung festzuhalten. Erst dies erlaubt die spätere Berechnung eines Punktes der Referenztrajektorie.

Zusätzlich ist eine Ablaufsteuerung erforderlich, in der z. B. definiert ist, welcher Teil der Bahn förderbandsynchron ist und welcher die statische Aufnahme des Bauteils oder Montagehilfskörpers betrifft. Außerdem beschreibt die Ablaufsteuerung, welche Posekomponenten sensorgestützt korrigiert sowie welche Sensoren wann für die Sensorkorrektur genutzt werden sollen. In der Ablaufsteuerung erfolgt auch die Definition der Annäherungsbewegung durch die Vorgabe von zeitabhängigen Sensor-Soll-Werten für die Position und Orientierung.

Für die Definition der Annäherungsbewegung wird angenommen, dass die Annäherung des TCP an das Objekt in z-Richtung des TCP-Koordinatensystems

erfolgt, siehe Abbildung 8-1. Bei der Bestimmung des Kontaktpunktes ist zu berücksichtigen, dass aufgrund des nachgiebigen Endeffektors eine gewisse Sollauslenkung notwendig ist, um die jeweils notwendige Prozesskraft sicherstellen zu können. Implizit ergibt sich somit für jeden Zeitpunkt der Roboterbahn ein Sollabstand zum Montageobjekt, der die Sollbewegung des Roboters definiert.

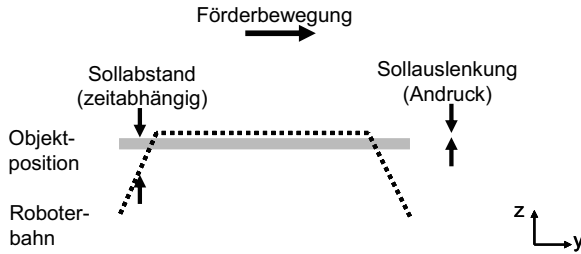


Abbildung 8-1: Modell zur Bestimmung der nominellen Objekttrajektorie (LANGE et al. 2008c)

Das endgültige Roboterprogramm enthält dann neben der Roboterbewegung und der Ablaufsteuerung auch die nominelle Objekttrajektorie. Die Definition des Objektes ist sensorunabhängig.

8.2.3 Korrektur der Soll-Position aufgrund von Sensorwerten

Die programmierte Referenzbahn wird während des Synchronlaufes mit Hilfe der erfassten Sensordaten korrigiert, siehe auch LANGE et al. (2008a). Dabei sind immer sämtliche vorhandenen Sensorsysteme aktiv. Die Berücksichtigung einzelner Sensorsysteme für die jeweilige Phase der Montageaufgabe ist im Anwenderprogramm definiert. Darüber hinaus werden spezifische und aktuelle Genauigkeiten der Sensorsysteme bei der Filterung berücksichtigt. Dadurch kann bei gleichzeitiger Aktivierung mehrerer Sensorsysteme trotz deren unterschiedlicher Genauigkeiten eine stabile Steuerung des Gesamtsystems realisiert werden. Die Berechnung der geschätzten Objektlagen und somit der Korrekturwerte verläuft je nach Art des Sensors.

Bei der Verwendung des Encoders steht der Sensorwert direkt für die geschätzte Objektposition. Der Wert ist jedoch aufgrund der Schwingungen oder durch einen Offset fehlerbehaftet. Daher wird, sofern weitere Sensordaten verfügbar sind, der jeweils aktuelle Fehler ermittelt und zukünftig addiert. Auf diese Art kann

der Encoder auch nach der Grobpositionierung noch verwendet werden, z. B. um während des Rückzugs des Roboters vom Band noch einen ggf. auftretenden Band-Stopp zu erkennen.

Das Bildverarbeitungssystem berechnet als Bildinformation die Objektlage bezüglich der Kameralage. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die jeweilige Kameralage die um die Auslenkung des Kraftsensors korrigierte und um die Rechenzeit der Bildverarbeitung verzögerte Ist-Position der Kamera ist. Da die Bildinformation nicht den aktuellen Zustand widerspiegelt, ist es erforderlich, den Korrekturwert zu präzisieren. Darüber hinaus steht die Sensorinformation aufgrund der Rechenzeit nicht in jedem Abtastschritt zur Verfügung.

Während des mechanischen Kontaktes kann die Lageabweichung ebenfalls durch Addition von Auslenkung und Ist-Position bei als starr angenommenem Endeffektor bestimmt werden. Daher wird in dieser Phase eine fiktive Lage des TCP als Ist-Lage angenommen. Diese ergibt sich aus der Messung der Auslenkung des KMS vor dem mechanischen Kontakt. Diese Auslenkung berücksichtigt Einflüsse wie beispielsweise das Gewicht des Endeffektors, Hysterese oder andere Störungen auf dem Sensor.

8.2.4 Bestimmung der Trajektorie der Endeffektorlage

Durch die Überlagerung der Referenztrajektorie mit Hilfe der Sensorkorrektur wurde die aktuelle Soll-Lage des Roboter-TCP bestimmt. Für das Verfahren müssen daher die zukünftigen Soll-Werte berechnet werden. Dies erfolgt durch eine Prädiktion der zukünftigen Sensorkorrektur (LANGE et al. 2008a).

Die Prädiktion ist im einfachsten Fall durch die Addition des Geschwindigkeitsfehlers der Fördereinrichtung möglich. Sie wird durch Differenzbildung aus den ermittelten Solllagen bestimmt, wobei bei Nutzung der Bildverarbeitung nur die Abtastschritte mit neuen Informationen betrachtet werden. Sofern bei der Sensorfusion ein Modell der Bewegung des Montagehauptkörpers existiert, kann dieses auch zur Prädiktion ausgenutzt werden. Alternativ kann eine Extrapolation nach LANGE & HIRZINGER (2005) erfolgen.

Die zu bestimmende Soll-Trajektorie muss darüber hinaus aufgrund der zu geringen Dynamik des Industrieroboters geglättet werden. Dies resultiert aus Rampen der Sensorkorrektur als auch schwankenden Sensorwerten, welche gegebenenfalls hohe Beschleunigungen der Soll-Trajektorie ergeben. Die dafür notwen-

dige Trajektorienglättung wurde von LANGE et al. (2006) vorgestellt, welche ähnlich einer Impedanzregelung die Beschleunigungsspitzen der Sensorkorrektur verschleift.

Mithilfe der Glättung werden die jeweils nächsten etwa 0,5 Sekunden der Soll-Bewegung gefiltert. Dadurch werden die von der Vorsteuerung benötigten zukünftigen Abtastschritte ohne Beschleunigungsspitzen vorgegeben. Dies ergibt auch die Verzögerung, bis zu der die Regelung auf unvorhergesehene Änderungen der Soll-Bahn vollständig reagiert hat. Real erfolgt die Reaktion schneller, sofern die Beschleunigungsgrenzen des Roboters dies zulassen.

Vorteil des Glättungsalgorithmus ist es, dass dadurch keine ausführbaren, d. h. bezüglich der Zeit stetig differenzierbare, Trajektorien vorgeben werden müssen, da die Differenzierbarkeit durch die Glättung gewährleistet wird. Die am realen System nur begrenzt ausführbaren Beschleunigungen werden durch die Vorgabe von entsprechend großen Impedanzen eingehalten.

8.3 Realisierung Montageprozess

8.3.1 Montageablauf

Der im prototypischen Versuchsaufbau realisierte Montageablauf ist in Abbildung 8-2 ersichtlich. Er lässt sich in einen nicht synchronisierten und einen synchronisierten Bereich unterteilen. Im nicht synchronisierten Bereich werden die notwendigen Bauteile aufgenommen. Er endet mit der Fahrt des Roboters auf die Warteposition. Der synchronisierte Bereich ist in die im Abschnitt 5.5 beschriebenen Teilprozesse Grobpositionierung, Annäherung und mechanischer Kontakt untergliedert. Die Realisierung dieser Teilprozesse wird in den folgenden Unterabschnitten 8.3.2 bis 8.3.4 beschrieben.

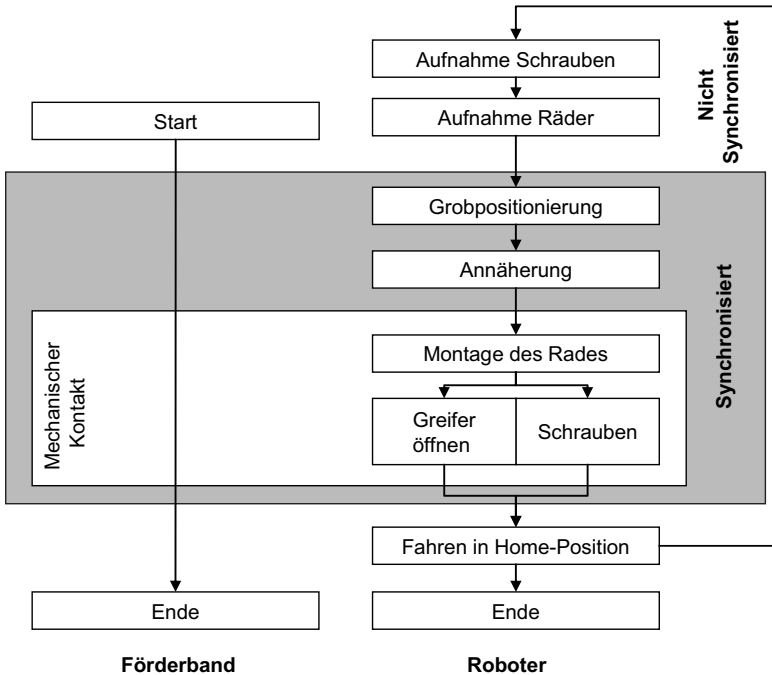


Abbildung 8-2: Montageablauf der Radmontage in der Pilotanlage

8.3.2 Grobpositionierungsphase

Die erste Phase der synchronisierten Fahrt von Roboter und Montagehauptkörper beginnt mit der Einfahrt des Montagehauptkörpers in die Montagestation. Die Lagererkennung des Fahrzeuges kann mittels verschiedener Systeme erfolgen. Im Versuchsaufbau ist diese Phase über die in den Motoren des Förderers eingebauten Weggeber realisiert.

Dies wird durch die in den meisten Robotersteuerungen integrierte Funktion des Conveyor-Tracking unterstützt. Die Genauigkeit ist allerdings, wie in Abschnitt 3.1 erläutert, nicht ausreichend, so dass mit diesem Verfahren nur die Startwerte für die Annäherungsphase ermittelt werden.

Für das Conveyor-Tracking werden die Weggeber mit einem Signal pro Umdrehung ausgelesen, was einer Genauigkeit von 1,8 mm entspricht. Diese Daten

werden dem Roboter mittels ProfiBus DP übertragen. Auf deren Basis erfolgt eine Synchronisation in Förderrichtung, bis die optischen Sensoren die Radnabe erkennen.

8.3.3 Annäherungsphase

Die berührungslose Annäherung erfolgt vor dem mechanischen Kontakt und wird durch bildverarbeitende Sensorik, im Fall der Radmontage durch eine zentral im Endeffektor positionierte Kamera, unterstützt. Die Verfolgung der Achse erlaubt eine fortwährende Korrektur der relativen Pose des Rades bezüglich der Fahrzeugachse. Dies ist notwendig, um z. B. Lenkwinkel, Sturz des Rades und Schwankungen der Karosserie im Fördersystem zu erkennen.

Die zu detektierenden Merkmale für Bildverarbeitung ändern sich während der Annäherung aufgrund des sich einengenden Bildes. Detektiert werden jeweils die Position und Orientierung (Drehwinkel, Lenkwinkel, Sturz) der Schraubenlöcher in der Bremsscheibe und der Achse, siehe Abbildung 8-3. Gleichzeitig erfolgt die Bestimmung des Abstandes des Roboter-TCP zur Achse.

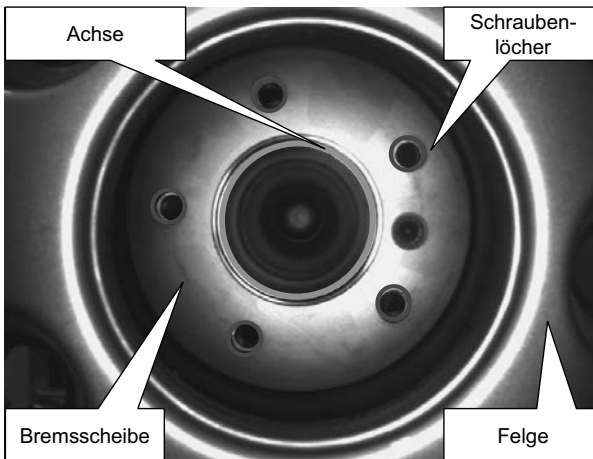


Abbildung 8-3: Merkmale der Bildverarbeitung während der Feinpositionierung

Nach der Aufzeichnung der Bilddaten durch die Kamera wird in einem ersten Schritt zunächst eine konturbasierte Modellsuche durchgeführt, welche das Prüfenster (ROI) der darauf folgenden Suche positioniert. Dieser Schritt entfällt,

nachdem die Kontur einmalig gefunden ist, und wird durch ein Verfolgen ersetzt, bzw. erfolgt erneut, wenn die Verfolgung abreißt.

Im zweiten Schritt erfolgt eine Konturextraktion mit anschließender Filterung der Konturen. Die verbleibenden Konturen werden mit Ellipsen abgeglichen und nach Größe und Qualität der Ellipse sortiert. Die Größe und Position einer Ellipse wird für die Untersuchung des nächsten Bildes gespeichert. Aus den ermittelten Daten über die Ellipse wird die Position der Bremsscheibe bestimmt.

An Hand der Größe der gefundenen Ellipse (Achszapfen) wird im dritten Schritt mit a priori Wissen eine Region ausgewählt, in der die Schraublöcher erwartet werden. Die gespeicherten Konturen aus Schritt 2 werden in diesem Bereich nach Ellipsen durchsucht, deren Größe wiederum mit Hilfe von a priori Wissen eingeschränkt werden kann.

Die gefundenen Ellipsen aus Schritt 3 werden in Schritt 4 untersucht, ob sie in das erwartete Muster der Radnabe passen. Als Muster ist ein Pentagon mit einem extra Punkt, welche die Schraube zur Befestigung der Bremsscheibe, siehe Abbildung 8-3, darstellt, hinterlegt. Alle unpassenden Ellipsen werden aussortiert.

Der fünfte Schritt stellt die Bestimmung der Rotation des Drehwinkels mit Hilfe des berechneten Pentagons dar.

Im sechsten Schritt werden die verbliebenen Schraublöcher mit einer Kantenanastastung vermessen. Aus ihrer Position und der Position des Achszapfens wird das Vorzeichen der Verkippung der Bremsscheibe bestimmt. Anschließend wird aus dem Winkel und dem Verhältnis der Halbachsen der Ellipse, die dem Achszapfen zugeordnet ist, die Richtung und Ausmaß der Verkippung der Bremsscheibe bestimmt.

Diese, in LANGE et al. (2008b) beschriebene, Vorgehensweise berechnet die Positions- und Orientierungsdaten, welche an die Robotersteuerung übermittelt werden und somit die Nachführung des Roboters ermöglichen.

8.3.4 Kontaktphase

Die taktile Feinpositionierung und -orientierung startet, sobald ein mechanischer Kontakt hergestellt ist. Die Posedifferenz zwischen dem Roboterflansch und dem durch Kräfte bzw. Momente ausgelenkten Endeffektor wird durch den nachgie-

bigen KMS gemessen. Die Berechnungen der jeweiligen Relativpose basieren auf der Annahme, dass alle Kräfte und Momente jeweils am TCP des Endeffektors angreifen. Die auf den Endeffektor einwirkenden Kräfte werden, wie in Abbildung 8-4 dargestellt, am KMS in Kraft- und Momentenkomponenten zerlegt gemessen.

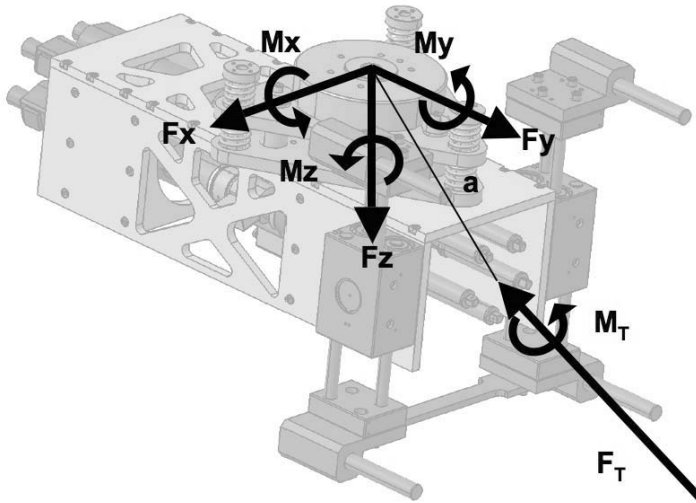


Abbildung 8-4: Bestimmung der Kräfte und Momente am Endeffektor

Die Rücktransformation der gemessenen Kräfte (\vec{F}_S) und Momente (\vec{M}_S) in die tatsächlich am TCP einwirkenden Kräfte (\vec{F}_T) und Momente (\vec{M}_T) erfolgt durch eine Transformation mit:

$$\begin{bmatrix} \vec{F}_T \\ \vec{M}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^S R_T & 0 \\ {}^S P_T^x \cdot {}^S R_T & {}^S R_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{F}_S \\ \vec{M}_S \end{bmatrix} \quad (4)$$

Dabei repräsentiert die Matrix ${}^S R_T$ die Rotation und der Matrix ${}^S P_T^x$ die Verschiebung des Endeffektorkoordinatensystems gegenüber dem Sensorkoordinatensystem.

Nachdem das Rad auf die Fahrzeugachse montiert ist, wird der Schraubvorgang durchgeführt. Dabei durchlaufen die fünf Einbauschraubspindeln einen definierten Ablauf bestehend aus dem Anziehen der Schrauben, dem nochmaligen Lösen und dem nach finalem Drehwinkel und Drehmoment überwachten Anziehen. Das

Drehmoment am Ende des Schraubvorganges beträgt $M=120$ Nm. Während des Schraubens wird der Greifer geöffnet, um mögliche Verspannungen zwischen den Einbauschraubspindeln zu vermeiden.

Den letzten Schritt des Montageablaufes stellt das Zurückfahren des Endeffektors aus dem Arbeitsraum dar. Der Vorgang kann daraufhin für das hintere Rad wiederholt werden.

8.4 Zusammenfassung

In Kapitel 8 wird beschrieben, wie die Vorgaben, die sich aus der Methode der förderbandsynchronen Montage ergeben, mithilfe des Pilotsystems umgesetzt wurden. Besondere Berücksichtigung finden dabei die Bestimmung der Soll-Bahn und der Prozessablauf.

Die Bestimmung der Soll-Bahn für den Roboter erfolgt im umgesetzten Pilotsystem durch die Vorgabe einer Referenzbahn, welche unter Zuhilfenahme von Sensordaten korrigiert wird. Dafür werden die einzelnen Sensordaten gewichtet fusioniert. Die für das Input Shaping notwendige Prädiktion der Trajektorie erfolgt durch eine Fortschreibung der bekannten Soll-Bahn unter der Annahme einer konstanten Geschwindigkeit. Dies geschieht über eine Extrapolation der jeweiligen Ist-Geschwindigkeit.

Die Realisierung des Montagevorganges orientiert sich an dem erarbeiteten Prozessablauf. Während der berührungslosen synchronisierten Grobpositionierung wird die Ist-Position des Fördersystems durch Schrittgeber in den Motoren des Fördersystems bestimmt und der Roboter unter Verwendung des Conveyor Tracking nachgeführt. Die berührungslose Annäherung, welche die nächste Prozessphase darstellt, wird mithilfe des Bildverarbeitungssystems umgesetzt. Die Kamera detektiert definierte Parameter, wie die Achse und die Schraublöcher, errechnet aus diesen Daten die jeweiligen Posen im Kamerakoordinatensystem und sendet diese Daten als Relativposen an die Robotersteuerung. Nach dem folgenden mechanischen Kontakt werden die Bewegungen des Roboters mit der Kraft-Momenten-Sensorik geregelt und der Schraubvorgang durchgeführt.

9 Bewertung des Systems

9.1 Allgemeines

Bei der Bewertung des Pilotsystems zur förderbandsynchronen Montage sind sowohl technische als auch wirtschaftliche Aspekte zu berücksichtigen.

Im Rahmen der technischen Bewertung wird die Genauigkeit des realisierten Systems analysiert. Die Bestimmung erfolgt anhand der in Unterabschnitt 4.1.2 definierten Verfolgegenauigkeit. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Bestimmung innerhalb der jeweiligen Prozessphasen vorzunehmen ist. Daher wird bei der technischen Bewertung die Verfolgegenauigkeit während der Grobpositionierung, die Verfolgegenauigkeit bei der Annäherung und dem mechanischen Kontakt unterschieden. Die Verfolgegenauigkeit stellt die Relativpose von Roboter zu Montagehauptkörper dar, wohingegen die Montagegenauigkeit die zu fügende Passung angibt.

Die wirtschaftliche Bewertung analysiert die entwickelte Methode und das System mit Hilfe der Methoden der Investitionsrechnung, um im Vergleich mit den Realisierungsalternativen die wirtschaftlichste Variante zu wählen und die finanziellen Vorteile der förderbandsynchronen Montage zu bestimmen. Die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit erfolgt dabei sowohl monetär als auch nicht monetär.

9.2 Technische Bewertung

9.2.1 Aufbau des Messsystems

Die Ermittlung der Verfolgegenauigkeit erfolgt in sechs Freiheitsgraden unter Vorgabe einer definierten Soll-Positionierungsdifferenz und einer Soll-Orientierungsdifferenz zwischen dem Montagehauptkörper und dem Roboterwerkzeug während der synchronisierten Bewegung. Für die Messung dieser Kenngröße war daher ein geeignetes Messsystem zu entwickeln, das folgende Anforderungen erfüllt:

Erreichbare Messgenauigkeit

Die angestrebte Verfolgegenauigkeit des Montagesystems liegt bei 0,2 mm und 1°. Die geforderte Genauigkeit des Prüfstandes ergibt sich somit nach SCHÖNFELDER (1993) zu 0,05 mm und 0,25°.

- *Messbereich*
Der Bereich, in dem das Messsystem gültige Daten liefern soll, beträgt in Montagerichtung min. 80 mm, senkrecht dazu min. 20 mm. Des Weiteren ist der Messbereich so auszulegen, dass Winkelabweichungen von $\pm 5^\circ$ um jede Achse gültige Werte liefern.
- *Zeitliche Auflösung*
Die zeitliche Auflösung des Prüfstandes ist so zu wählen, dass innerhalb des Interpolationstakts des Robotersystems mindestens zwei Messwerte ermittelt werden. Daraus ergibt sich eine maximale Messdauer von 6 ms bzw. eine Abtastgeschwindigkeit von 167 Hz.
- *Keine Rückwirkung auf das Montagesystem*
Der Prüfstand darf keine Rückwirkung auf das Montagesystem haben. Vor allem die im Endeffektor des Montagesystems integrierten Sensoren dürfen durch das Messsystem nicht gestört werden. Diese Anforderung ergibt sich aus der Übertragbarkeit der Messdaten auf den tatsächlichen Montageprozess.

Die Erfassung der Posedaten erfolgt über drei Ebenen, welche senkrecht aufeinander stehen und eine dreiseitige Pyramide bilden. Das gesamte Messsystem besteht aus zwei Komponenten: Einer Messstation an der Fahrzeugkarosserie und der Referenzpyramide am Endeffektor. Auf der Messstation befinden sich die Sensoren und die Fahrzeugachse. Die Sensoren wurden so orientiert, dass ihre Messrichtung senkrecht zur Ausgangsposition der jeweiligen Messebene steht. Die Referenzpyramide enthält einen Felgeneinsatz, um einen vollständigen Montageprozess durchführen zu können. Für das Messsystem werden potentiometrische Weggeber der Firma Burster vom Typ 8712 (BURSTER PRÄZISIONSMESSTECHNIK 2008) mit einem Messweg von 100 mm verwendet. Die Messdaten werden mittels eines Analog/Digital-Wandlers vom Typ NI 2615 mit 8-kanaligem Eingang und einer Abtastfrequenz von 250 kHz bei einer Auflösung von 16 bit gewandelt.

Die Montage der Referenzpyramide erfolgt stirnseitig am Endeffektor des Roboters. Sie ersetzt für die Messläufe das Rad, da sie für die Sensorik des Endeffek-

tors die gleichen Eigenschaften aufweist. Die Messstation wird auf Höhe der Fahrzeugachse in der Verlängerung der Crashbox des Fahrzeuges an einer Hilfskonstruktion montiert. Abbildung 9-1 zeigt das Prüfsystem am Versuchsaufbau.



Abbildung 9-1: a) Messstation am Fahrzeug, b) Referenzpyramide am Endeffektor

Die Bestimmung der Messwerte für die Verfolgetgenauigkeit erfolgt auf Basis der in Unterabschnitt 4.1.2 beschriebenen Vorgehensweise. Die Prüfläufe erstrecken sich über eine Messlänge von je 1 m. Zur Auswertung der Abweichungen vom Sollwert (0) wurde der Mittelwert des gesamten Wertebereiches gebildet. Die dargestellten Abweichungen repräsentieren somit die Abweichungen von diesem Mittelwert. Die Ergebnisse sind neben den abgebildeten Messschrieben (Abbildung 9-2 bis Abbildung 9-6) tabellarisch im Anhang gelistet. Für die Darstellung der Verfolgetgenauigkeit wird in den folgenden Unterabschnitten das in Abbildung 3-11 definierte Koordinatensystem verwendet. Daraus resultiert, dass die Orientierungen dem Lenkwinkel (a), dem Drehwinkel (b) und dem Sturz (c) der Fahrzeugachse entsprechen.

9.2.2 Verfolgetgenauigkeit in der Grobpositionierungsphase

Die Phase der Grobpositionierung wird, wie in Unterabschnitt 8.3.2 beschrieben, mit der Funktion Conveyor-Tracking der Robotersteuerung realisiert. Das Conveyor-Tracking ermöglicht eine Synchronisation in lediglich einem Freiheitsgrad. Die in Abbildung 9-2 dargestellten Orientierungsdifferenzen stellen daher keine Regelgrößen für das Robotersystem dar, da sie von der in dieser Phase verwendeten Sensorik nicht erfasst werden können. Die Differenzen betragen

unter 1° und können vernachlässigt werden. Eine Ungenauigkeit beim Programmieren der Bahn, welche eine konstante Abweichung darstellt, würde in der Grafik durch einen diagonalen Verlauf der Messwerte ersichtlich sein.

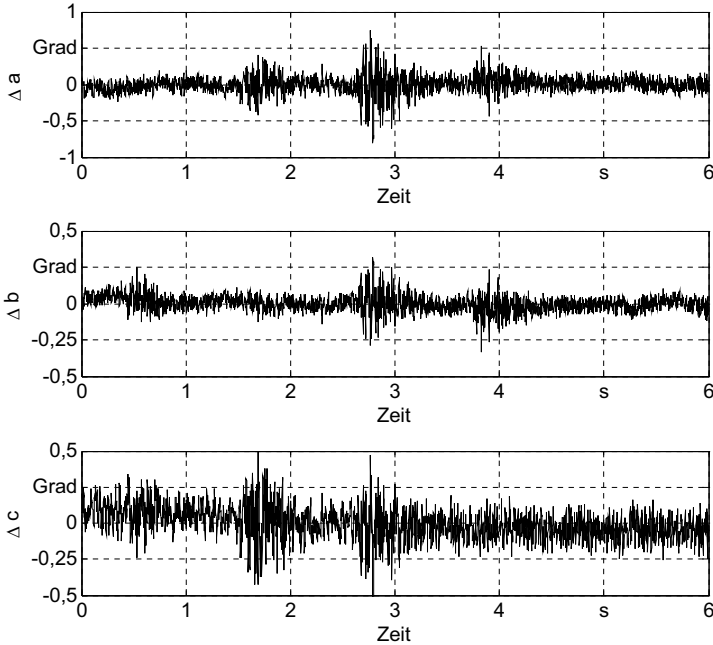


Abbildung 9-2: Messschrieb eines Prüflaufes mit den Orientierungsdifferenzen Δa , Δb , Δc während der Grobpositionierungsphase

Die Werte der Positioniergenauigkeit (Abbildung 9-3) zeigen in allen Achsen ein deutliches Driften über die Zeit. Das führt dazu, dass die Werte nicht um den Sollwert schwanken, sondern diagonal über den Messbereich verlaufen. Ein Nulldurchgang liegt nur vor, weil die Abweichungen zu dem Mittelwert über den Messlauf dargestellt sind. Eine Aussage über die durchschnittliche Abweichung kann mit Hilfe des verwendeten Messsystems und der Auswertung nicht gemacht werden. Gründe für das Driften können sein:

- ein Schleppfehler des Roboters in Förderrichtung (x),
- ein ungenaues Teachin der Bahn oder eine ungenaue Ausrichtung der Koordinatensysteme von Roboter und Fördersystem in Montagerichtung (y) oder

- ein ebenfalls ungenaues Teachen in der Höhe (z) sowie eine veränderliche Höhe der Laufschiene. Messungen über einen längeren Weg zeigen einen Wechsel vom konstant steigenden zum fallenden Verlauf für z, was die These der variierenden Höhe der Laufschiene stützt.

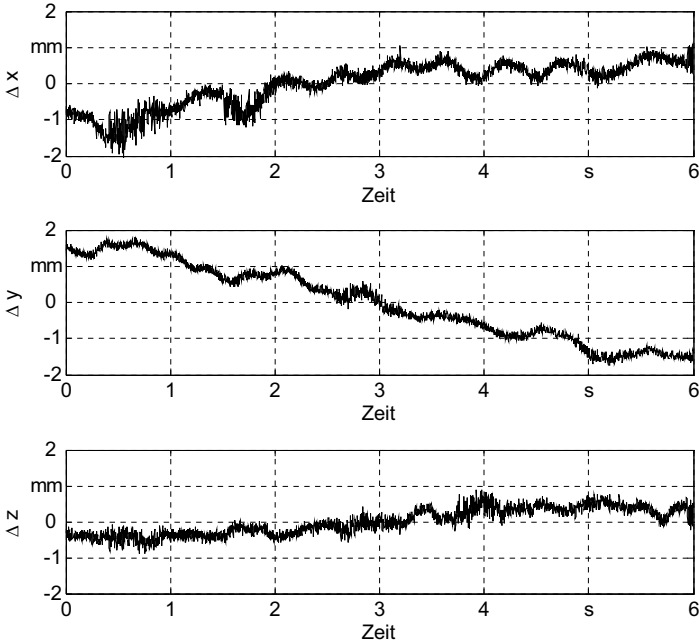


Abbildung 9-3: Messschrieb eines Prüflaufes zur Positioniergenauigkeit während der Grobpositionierungsphase

Die Positions-Verfolgegenauigkeit VG_P während der Grobpositionierungsphase ist in Abbildung 9-4 anhand eines Prüflaufes graphisch dargestellt. Die Messergebnisse sämtlicher Prüfläufe zeigen einen ähnlichen u-förmigen Verlauf. Gründe dafür sind die Drift der einzelnen Werte und deren Nulldurchgang aufgrund der Mittelwertbildung, die sich hier deutlich niederschlägt. Die Auswertung der durchgeführten Prüfläufe ergibt eine Positions-Verfolgegenauigkeit von bis zu $VG_P=3,96$ mm, siehe Anhang. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Positions-Verfolgegenauigkeit als die maximale Abweichung innerhalb eines Prüflaufes berechnet wird. Diese Genauigkeit entspricht dem derzeitigen Stand der Technik und ist für die Erfassung des Montageortes am Montagehauptkörper mittels des optischen Sensorsystems hinreichend genau.

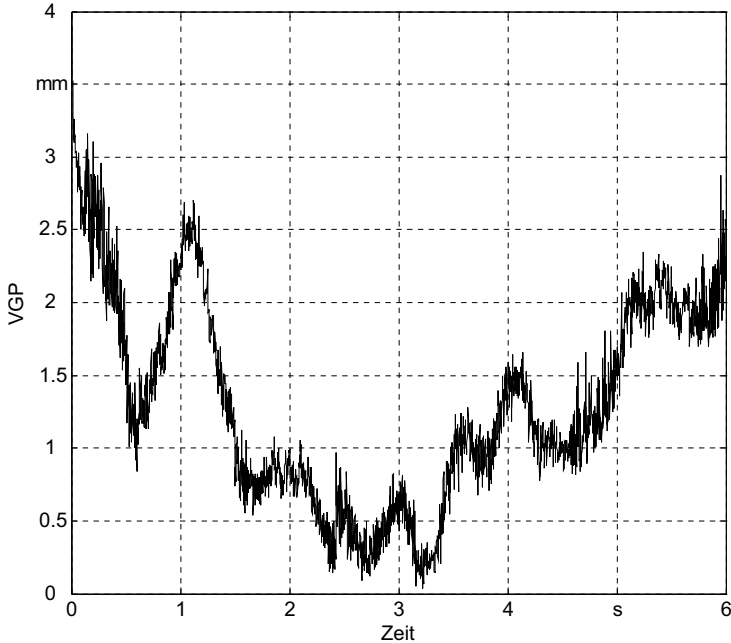


Abbildung 9-4: Messschrieb eines Prüflaufes mit der Verfolgegenauigkeit VG_P während der Grobpositionierungsphase

9.2.3 Verfolgegenauigkeit in der Annäherungsphase

Die Phase der Feinpositionierung ist von einem Annäherungsprozess des Roboters an die Fahrzeugachse geprägt. Die Messung beginnt in einem Abstand der Kamera von der Radnabe von etwa 600 mm.

Die Abbildung 9-5 zeigt den Messschrieb eines Prüflaufes zur Bestimmung der Orientierungs-Verfolgegenauigkeiten. Die Auswertung der Messwerte ergibt durchschnittliche Orientierungs-Verfolgegenauigkeiten von $VG_a=0,64^\circ$, $VG_b=0,27^\circ$ und $VG_c=0,4^\circ$. Diese sind deutlich unter der definierten Anforderung von 1° und ermöglichen somit ein zuverlässiges Ausgleichen der Orientierungsdifferenzen von Montagehauptkörper und Bauteil.

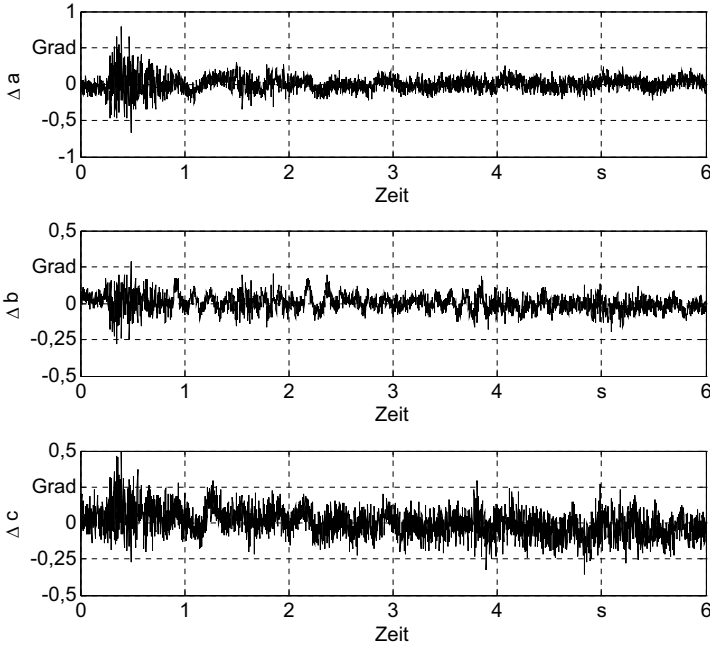


Abbildung 9-5: Messschrieb eines Prüflaufes mit den Orientierungsdifferenzen Δa , Δb , Δc während der Annäherungsphase

Die in Abbildung 9-6 dargestellten Positioniergenauigkeiten in der Annäherungsphase zeigen im Gegensatz zur Abbildung 9-3 keine Drift. Dies lässt darauf schließen, dass aufgrund der Bildverarbeitung alle systematischen Offsets, wie Höhenverlauf oder ungenaue Programmierung, ausgeglichen werden. Die vorhandenen Schwankungen um den Sollwert von bis zu 1,7 mm in Förderrichtung (x), 1,3 mm in Montagerichtung (y) und 1,2 mm in der Höhe (z) resultieren aus der Trägheit des Robotersystems. Da diese Werte jedoch die durchschnittlichen Maxima aller Prüfläufe darstellen und nicht die mittlere Abweichung können Fügetoleranzen von ± 1 mm realisiert werden, was einer durchschnittlichen Montageschräge entspricht.

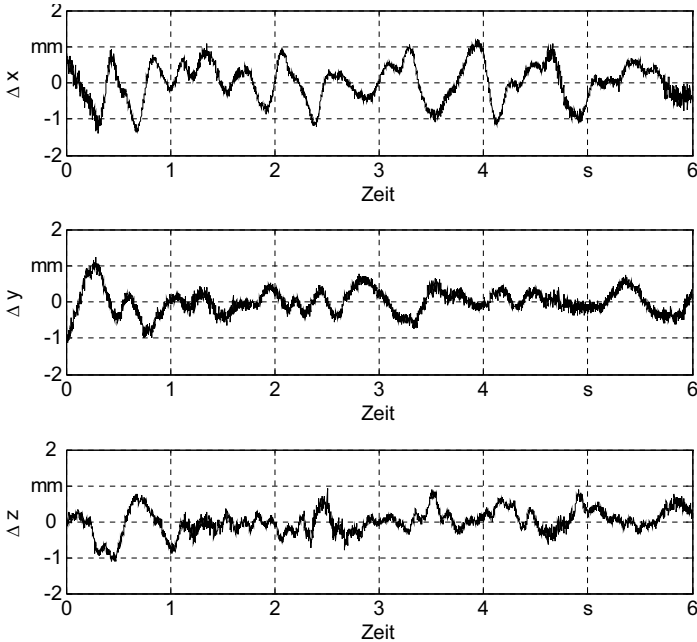


Abbildung 9-6: Messschrieb eines Prüflaufes zur Positioniergenauigkeit während der Annäherungsphase

Die Positions-Verfolgegenauigkeit VG_p während der Annäherungsphase ist in Abbildung 9-7 anhand eines Prüflaufes graphisch dargestellt. Die Auswertung aller durchgeführten Prüfläufe ergibt eine durchschnittliche Positions-Verfolgegenauigkeit von $VG_p=2,2$ mm. Es ist deutlich ersichtlich, dass es bei der sensorgeführten Annäherungsphase zu keiner Drift und demzufolge u-förmigen, sondern zu einem linearen Verlauf der VG_p kommt. Dies resultiert aus dem schon erwähnten Ausgleich von systematischen Offsets durch die Sensorik. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die vorhandenen Schwingungen im Bereich von ca. 2 Hz und höher zu finden sind, welche nach der in Unterabschnitt 3.4.4 beschriebenen Analyse der Roboterdynamik nicht aktiv vom Robotersystem ausgeglichen werden können.

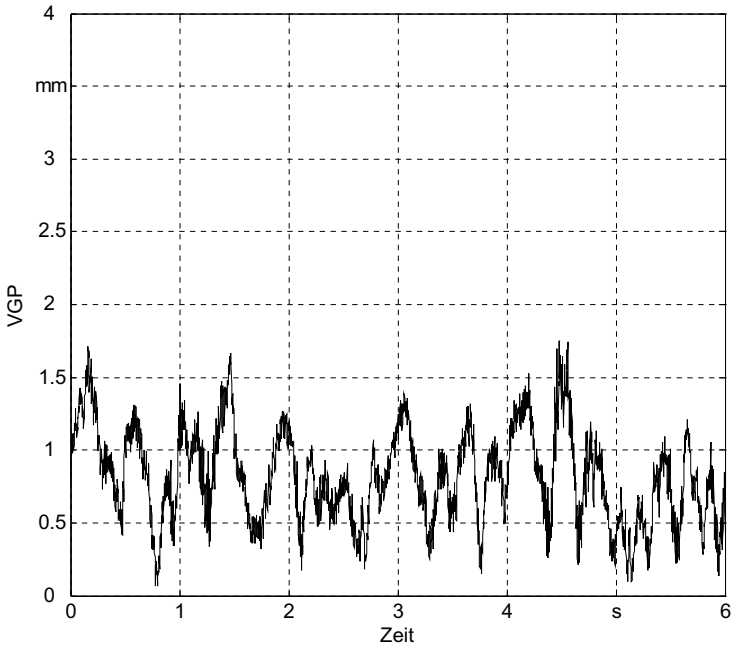


Abbildung 9-7: Verfolgegenauigkeit VG_P während der Annäherungsphase

Abbildung 9-8 zeigt Kamerabilder der Annäherung an die mit unbekannter Geschwindigkeit bewegte Radnabe. Man erkennt deutlich die gleichzeitige Anpassung der Orientierung und der Positionierung. Kurz vor dem Kontakt wird die Bewegung abgebremst, um die Kontaktkräfte zu minimieren.

Die Messergebnisse der Montageversuche zeigen, dass die Bildverarbeitung den Roboter hinreichend genau der Fahrzeugachse nachführt. Beim Eintreten des Kontakts am Ende der bildgestützten Annäherungsphase wird die sich durch die maximale Auslenkung des nachgiebigen KMS von ± 2 mm bzw. $\pm 2^\circ$ ergebende Genauigkeitsanforderung für die resultierenden Lagefehler zuverlässig unterschritten.

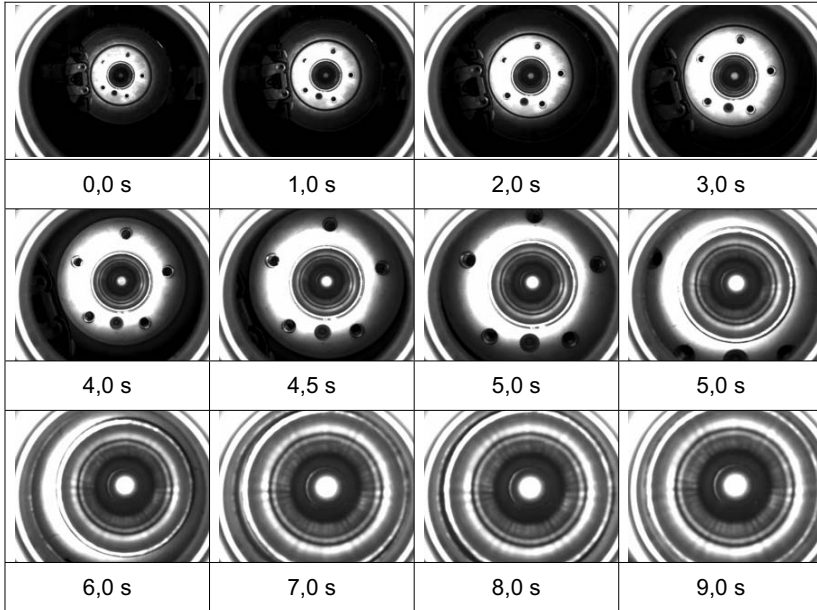


Abbildung 9-8: Bilder der robotergeführten Kamera während der Annäherung an die Radnabe am bewegten Band

9.2.4 Verfolgengenauigkeit in der Kontaktphase

Der im Endeffektor integrierte KMS ermöglicht neben der passiven Synchronisation des Roboters ab dem Moment des Kraftschlusses zwischen Rad und Achse auch das gezielte Nachstellen des Roboters, um eng tolerierte Passungen zu fügen. Die Montagegenauigkeit wird allerdings auch durch andere Faktoren unterstützt. Neben der reinen Verfolgengenauigkeit des Systems kommt insbesondere einer montagegerechte Produktgestaltung, wie beispielsweise dem Vorhandensein von Montageschrägen, Bedeutung zu.

Die aus der starren Verbindung von Roboter und Montagehauptkörper resultierenden Kräfte und Momente bleiben während des gesamten Montagevorganges gering. Dementsprechend sind auch die Auslenkungen des Sensors weit unterhalb der Grenzen von ± 2 mm bzw. $\pm 2^\circ$. Die durch die Passung (E8/h7) zwischen Nabe und Felge geforderte Genauigkeit von 0,13 mm wird somit gewährleistet.

Die Taktzeit eines Montagesystems ist die Zeit, die für die vollständige Ausführung einer Montagetätigkeit benötigt wird. Die Taktzeit für den in Unterabschnitt 8.3.1 beschriebenen Montageablauf beträgt insgesamt 54 s für die Montage von Vorder- und Hinterrad. Dies berücksichtigt nicht die im Falle einer Industrialisierung mögliche weitere Parallelisierung von Teilprozessen. Die vom Pilotsystem benötigte Zeit für die Teilprozesse Radaufnahme, Synchronisieren und Montieren eines Rades beträgt 12 s.

9.2.5 Sicherheit

Die Gewährleistung einer hohen Sicherheit von Montageanlagen beinhaltet, wie in Abschnitt 4.1.4 beschrieben, die Berücksichtigung der möglichen Auswirkungen sowohl auf den Mensch als auch das Produkt. Da bei automatisierten Montageanlagen derzeit eine Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine zumeist ausgeschlossen ist, wird diese hier nicht weiter betrachtet. Dennoch wird das Thema Sicherheit in Bezug auf Beschädigungen des Produktes und insbesondere die Zuverlässigkeit und somit Prozesssicherheit des Systems behandelt.

Bei Störungen während der Montage am bewegten Band muss vor allem verhindert werden, dass es zu Kollisionen zwischen gebremsten und weiterhin bewegten Teilen kommt, da solche Folgefehler mit erheblichen Kosten verbunden sind. Dabei muss unterschieden werden, ob die Fördersystem anhält oder ob das Robotersystem bzw. eine Komponente ausfällt. Ein Stop des Fördersystems kann entweder durch eine Notsituation oder ein kontrolliertes Stillsetzen ausgelöst werden. Letzteres ist insbesondere bei Elektrohängebahnen möglich, da diese jeweils unabhängige Fördersysteme darstellen und somit ein begrenztes Zwischenpuffern ermöglichen.

Ein Stillsetzen des Fördersystems wird durch steuerungstechnische Maßnahmen beim Roboter behandelt und bewirkt ein synchrones Anhalten des Roboters und Montagehauptkörpers. Dies ist möglich, da die Pose des Montagehauptkörpers kontinuierlich gemessen wird und ein Stillsetzen des Fördersystems lediglich zu einem Nachlauf gegenüber der Soll-Position führt, welcher dem Roboter als Regeldifferenz übertragen wird, so dass dieser die Bewegung nachführt. Aufgrund der sensoriiellen Überwachung der Pose des Montagehauptkörpers während des gesamten Synchronisationslaufes kann unabhängig von einem Stillsetzen des Fördersystems der Montageprozess ausgeführt werden.

Bei einem Not-Aus der Montageanlage kann ein Fördersystem im Allgemeinen nicht so schnell abbremsen wie ein Roboter. Daher wurden Maßnahmen getroffen, die ein beschädigungsloses Stillsetzen des Gesamtsystems ermöglichen. Diese Maßnahmen betreffen zum einen konstruktive Anpassungen des Endeffektors als auch angepasste Reaktionsstrategien während der einzelnen Prozessphasen des Synchronisationslaufes.

Die konstruktiven Maßnahmen betreffen die Gestaltung des Endeffektors. Wie in Abschnitt 7.3 beschrieben, wurde der KMS adaptiert, so dass auch deutlich höhere Kräfte und Momente gemessen werden können. Aufgrund der seitlichen Anschläge des adaptierten Systems kann im Bereich des Endeffektors mit einer translatorischen Nachgiebigkeit von ± 17 mm ausgegangen werden. Das bedeutet, dass eine durch das unterschiedliche Abbremsverhalten der Systeme ausgelöste Positionsdifferenz ausgeglichen werden kann.

Während der Grobpositionierung beträgt der Abstand zwischen Roboter und Montagehauptkörper mindestens 600 mm, so dass bei einem Not-Aus kein physikalischer Kontakt entstehen kann. In der Phase der Annäherung sind die Systeme einander derart angenähert, dass eine Beschädigung nicht ausgeschlossen werden kann. Daher wird der Roboter bahntreu auf einer Trajektorie in Förderrichtung abgebremst. Die Vorgabe eines so genannten weichen Abbremsens ermöglicht einen Ausgleich der Positionsdifferenzen. Aufgrund der während der Kontaktphase und insbesondere während des Schraubprozesses bestehenden kinematischen Kette zwischen Roboter und Fördersystem ist ein bahntreues, weiches Abbremsen des Roboters in Förderrichtung erforderlich. Darüber hinaus erfolgt während des Schraubprozesses das Öffnen des Greifers, um Kraftspitzen zu vermeiden.

Das implementierte Robotersystem zur förderbandsynchronen Montage ermöglicht somit einen schädigungslosen Ausgleich von Positionsdifferenzen während des Abbremsvorganges sowohl beim Stillsetzen als auch bei einem Not-Stop.

9.3 Wirtschaftliche Bewertung

9.3.1 Allgemeines

Unter einer Investition versteht man sowohl die Kapitalverwendung für den zielgerichteten Einsatz finanzieller Mittel zur Beschaffung von Gütern des Struktur-

vermögens als auch die Durchführung einer Finanzanlage (WÖHE 1984). Dabei ist in den seltensten Fällen die Möglichkeit der Kapitalverwendung auf ein Projekt beschränkt, so dass eine Investitionsentscheidung notwendig ist, welche die konkurrierenden Projekte gegeneinander abwägt und deren unterschiedliche Realisierungsmöglichkeiten vergleicht. Ein Hauptkriterium dieser Auswahl ist die Wirtschaftlichkeit des Investitionsprojektes im Sinne eines finanziell rentablen Kapitaleinsatzes. Für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der möglichen Investitionen müssen Investitionsrechnungen durchgeführt werden, in welche die relevanten Kenngrößen der Investition einfließen. Bei Investitionen in Produktionsanlagen können mehrere Investitionsarten in Abhängigkeit vom Status quo unterschieden werden, siehe Abbildung 9-9.

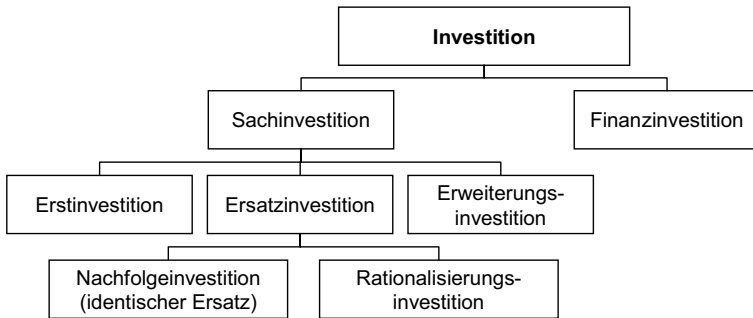


Abbildung 9-9: Investitionsarten (PERRIDON & STEINER 1997, HOFFMEISTER 2000)

Bei der hier zu treffenden Investitionsentscheidung zwischen einer manuellen, automatisierten getakteten oder automatisierten förderbandsynchronen Montage wird von einer Erst- bzw. Ersatzinvestition ausgegangen. Bei der Analyse der Wirtschaftlichkeit einer Erst- oder Nachfolgeinvestition kann ein isolierter Vergleich durchgeführt werden. Dabei werden die Kosten für jede Investition oder für jede Realisierungsvariante separat aufgestellt und verglichen. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass der Neuerwerb feststeht und nur verglichen wird, welche Lösung die größte relative Wirtschaftlichkeit aufweist. Für die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit einer Rationalisierungsinvestition ist eine Gewinnrechnung notwendig, da die Wirtschaftlichkeit immer im Vergleich zu einer Finanzinvestition bestimmt wird.

Neben den reinen monetären Kosten sind bei einer Investitionsentscheidung jedoch auch nicht monetäre Aspekte zu berücksichtigen. Im Rahmen dieser Bewer-

tung wird daher eine Nutzwertanalyse der zu betrachtenden Realisierungsalternativen durchgeführt.

9.3.2 Realisierungsalternativen

Manuelle Montagesysteme zur Radmontage

Die manuelle Montagestation, wie sie in Abbildung 9-10 dargestellt ist, entspricht dem aktuellen Stand der Technik in der Automobilendmontage.

Bei der manuellen Radmontage werden sämtliche Arbeitsschritte von Mitarbeitern durchgeführt. Zur Unterstützung des Mitarbeiters sind ein Handhabungsgerät zur Radpositionierung sowie ein Mehrspindelschrauber mit Drehmomentenregelung vorhanden. Beide sind an Balancern aufgehängt und werden vom Werker in die jeweilige Position geschoben. Die Taktlänge beträgt etwa 6 m und die Taktzeit aktuell 60 s.

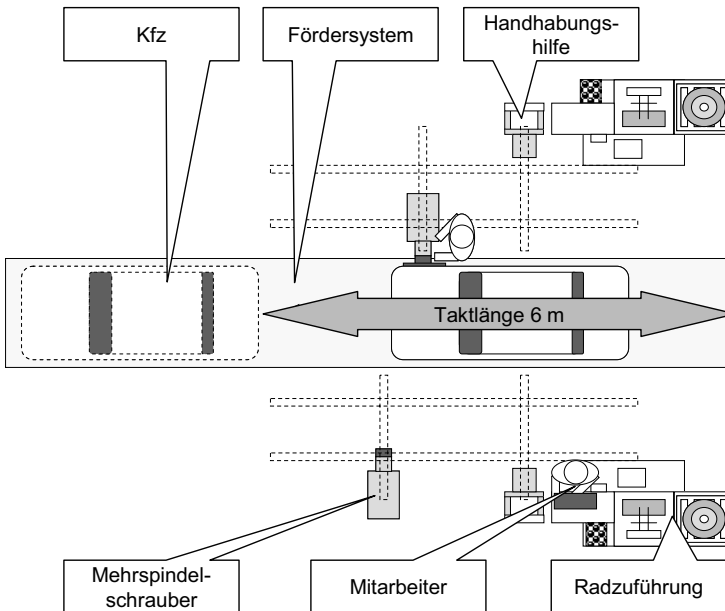


Abbildung 9-10: Integration der manuellen Montagesysteme

Förderbandsynchrone Radmontage

Da die automatisierte förderbandsynchrone Anlage in die bestehende Produktionslinie integriert werden soll, kann das Montageumfeld von der manuellen Montage übernommen werden, siehe Abbildung 9-11. Im Gegensatz zur manuellen Montage können jedoch mehr Vorgänge parallel durchgeführt werden. Dies erlaubt eine Trennung der Montagevorbereitung und der Montage der Räder, was zu einer Taktzeitreduzierung führt. Die Montagevorbereitung findet dann außerhalb der eigentlichen Roboterzelle statt und umfasst die Schrauben- und Radzufuhr. Da das Fördersystem mit nahezu konstanter Geschwindigkeit fährt, kommt eine Verringerung der Taktzeit einer Reduzierung des Platzbedarfes der Montagestation gleich. Mit der realisierten Pilotanlage ist eine Taktzeit von 45 s bei einer Taktlänge von 5 m erreichbar.

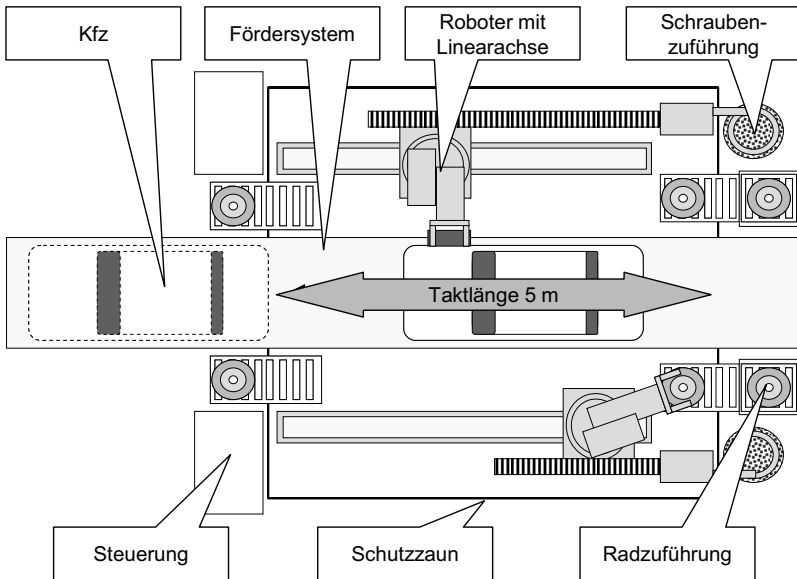


Abbildung 9-11: Integration der förderbandsynchronen Montage

Getaktet automatisierte Radmontage

Die automatisierte, getaktete Montage, siehe Abbildung 9-12, ist dadurch gekennzeichnet, dass sich das Montageobjekt in Ruhe befindet. Die somit notwendige Entkopplung des Fahrzeuges vom Fördersystem kann entweder mittels geeigneter Pufferstrecken oder einer Entnahme des Fahrzeuges vom Fördersystem

erreicht werden. In beiden Fällen ist das Fahrzeug an der Montagestation zu spannen, so dass die Pose des Montageortes fixiert ist.

Aufgrund der Automatisierung kann die Taktzeit der automatisierten, getakteten Radmontage mit ebenfalls 45 s angenommen werden. Die Taktlänge der getakteten Montagestation beträgt jedoch ca. 12 m, da aufgrund der notwendigen Puffer eine Taktzeitverringerung nicht zu einer Reduzierung der Taktlänge führt.

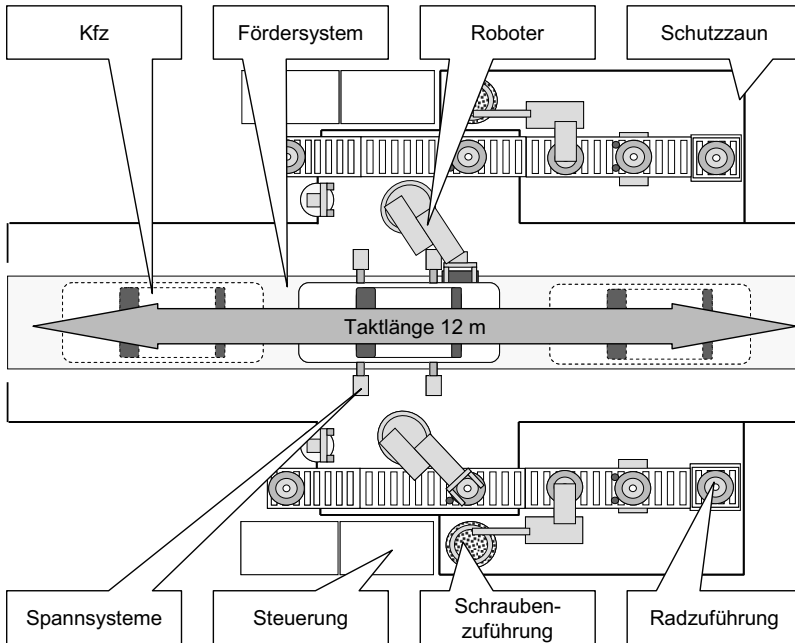


Abbildung 9-12: Integration der taktgebundenen Automatisierung

9.3.3 Investitionsrechnung

Die Investitionsrechnungsverfahren lassen sich je nach Berücksichtigung der zeitlichen Dimension von Erträgen und Aufwendungen nach PERRIDON & STEINER (1997) in statische und dynamische Verfahren einteilen (Abbildung 9-13). Bei allen Investitionsrechenmodellen handelt es sich um eindimensionale Zielsysteme mit dem alleinigen Ziel der Wirtschaftlichkeit, welche mit Hilfe verschiedener Kriterien beurteilt wird.

Die statischen Verfahren sind dadurch gekennzeichnet, dass sie Änderungen im Zeitablauf der in die Rechnung eingehenden Größen außer Acht lassen und stattdessen eine Durchschnittsbetrachtung anstellen. Der Betrachtungszeitraum ist bei den statischen Verfahren auf ein Jahr beschränkt, so dass sich exakte Vergleichsgrößen ermitteln lassen. Für die restliche Nutzungsdauer werden die gleichen Werte angenommen, so dass diese Verfahren schnell und einfach durchzuführen sind. Ziel der dynamischen Modelle dagegen ist der Vergleich von Investitionsalternativen über den gesamten Investitionszeitraum bis zur Desinvestition, um eine größere Vergleichbarkeit zwischen Modell und Realität herzustellen. Deshalb werden im Rahmen der hier durchzuführenden Untersuchung nur dynamische Verfahren verwendet.

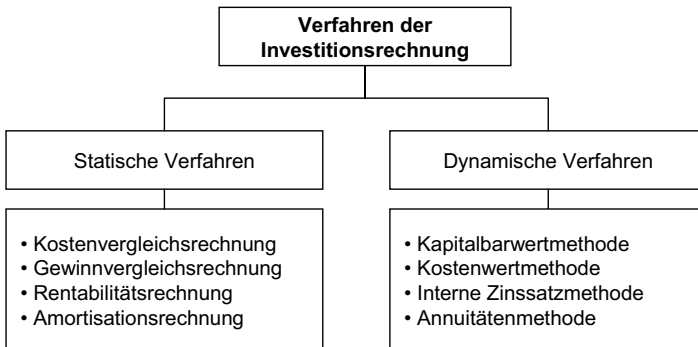


Abbildung 9-13: Verfahren der Investitionsrechnung

Zur Bestimmung des wirtschaftlich optimalen Montagesystems ist es erforderlich, die Zahlungsströme, die durch eine Investition ausgelöst werden, zu erfassen und in der Investitionsrechnung vergleichend zu bewerten. Diese Zahlungsströme werden für die Untersuchung allein aus den anfallenden Kosten ermittelt, da die Erlöse nicht exakt bestimmbar sind und somit zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit nicht zur Verfügung stehen.

Bestimmung des Wiederbeschaffungswertes

Den ersten Schritt bei der Durchführung eines Investitionsrechenverfahrens stellt die Erhebung des Wiederbeschaffungswertes der jeweiligen Anlage dar. Dafür wurden in Form von Expertengesprächen und Recherchen Kostendaten für die einzelnen Teilsysteme der Montagealternativen erhoben. Tabelle 9-1 zeigt detailliert die einzelnen Teilsysteme mit den jeweiligen Kosten. Den Berechnungen

liegt ein Gesamtsystem zugrunde, bei dem eine gleichzeitige beiderseitige Montage der Räder möglich ist.

Bei der Betrachtung der Beschaffungskosten ist die hohe Kapitalbindung bei den automatisierten Systemen gegenüber der manuellen Montage ersichtlich. Darüber hinaus zeigt sich, dass die automatisierte getaktete Montage aufgrund der notwendigen Adaption des Fördersystems und der zusätzlichen Ausstattung mit Spannsystemen für das Fahrzeug die Kosten einer förderbandsynchronen Montageanlage übertrifft.

Tabelle 9-1: Beschaffungskosten der Realisierungsalternativen

System / Subsystem	förderband-synchron	getaktet auto-matisiert	manuell
Roboter KR 180-2000 + Steuerung	121.600,00 €	116.600,00 €	0,00 €
Linearachse KL 1500	114.000,00 €	114.000,00 €	0,00 €
Kabelverlegung	3.000,00 €	3.000,00 €	0,00 €
Sicherheitstechnik	7.500,00 €	13.500,00 €	0,00 €
Fördersystem	37.000,00 €	74.000,00 €	37.000,00 €
Fixierung	0,00 €	40.000,00 €	0,00 €
Balancer	0,00 €	0,00 €	20.000,00 €
Greifer	10.000,00 €	20.000,00 €	20.000,00 €
Mehrspindelschrauber + Steuerung	126.000,00 €	126.000,00 €	126.000,00 €
Visionsystem	55.000,00 €	0,00 €	0,00 €
KMS	13.500,00 €	0,00 €	0,00 €
Greifzylinder	6.500,00 €	0,00 €	0,00 €
Hardwarekosten (HK)	494.100,00 €	507.100,00 €	203.000,00 €
Aufschlag Steuerungs- und Programmierungskosten (33% HK)	163.053,00 €	167.343,00 €	66.990,00 €
Aufschlag Aufbaukosten (20% HK)	98.820,00 €	101.420,00 €	40.600,00 €
Aufschlag Inbetriebnahme-kosten (5% HK)	24.705,00 €	25.355,00 €	10.150,00 €
Beschaffungskosten	780.678,00 €	801.218,00 €	320.740,00 €

Auf Basis der Beschaffungskosten für die Realisierungsalternativen kann im Folgenden die Investitionsrechnung durchgeführt werden. Dafür wurden die in Tabelle 9-2 aufgeführten Annahmen getroffen.

Tabelle 9-2: Annahmen für Zahlungsreihen

Variantspezifische Annahmen			
	förderband-synchron	getaktet auto-matisiert	manuell
Invest	780.678,00 €	801.218,00 €	320.740,00 €
Sachgemeinkosten	3.000,00 €	3.000,00 €	500,00 €
Instandhaltungskosten	10.000,00 €	10.000,00 €	2.000,00 €
Arbeitsplätze	0	0	2
Raumkosten	28.000,00 €	67.200,00 €	24.000,00 €

Varianteunabhängige Annahmen		
Schichten	3	
Bruttomitarbeiterbedarf	1,2	pro Arbeitsplatz
Lohnkosten Montagearbeiter	45.000,00 €	
Jährliche Lohnerhöhung	3%	
Anteil der Ersatzteilerstaustattung	5%	des Invest
Abschreibungszeitraum	5	Jahre
Kalkulationszinssatz	20%	
Zinssatz für Zahlungsreihen	20%	
Liquidationsüberschuss	0	

Kostenwertmethode

Bei der Bestimmung der wirtschaftlichen Eignung der Realisierungsalternativen im Falle einer Erst- oder Nachfolgeinvestition kann davon ausgegangen werden, dass keine Erträge oder Kosteneinsparungen berücksichtigt werden müssen. Es kann also ein isolierter Vergleich der möglichen Montagevarianten anhand der jeweiligen Kostenentwicklung mit Hilfe einer dynamischen Kostenwertmethode durchgeführt werden. Der Kostenwert K_0 wird durch

$$K_0 = I_0 + \sum_{t=1}^{T_{AB}} K_t \cdot \frac{1}{(1+i)^t} \quad (5)$$

berechnet, wobei I_0 der Invest zum Zeitpunkt t_0 , T_{AB} die Anzahl der Perioden, K_t die Kosten pro Periode t und i der Zinssatz ist.

Der Kostenwert K_0 enthält keine direkte Aussage über die Wirtschaftlichkeit einer Anlage, ermöglicht aber den dynamischen Vergleich von Investitionsalternativen. Es gilt diejenige Alternative als relativ vorteilhaft, die den geringsten Kostenwert besitzt.

Die Gegenüberstellung der Kostenwerte in Abbildung 9-14 zeigt deutlich die hohe Kapitalbindung der automatisierten Varianten, welche aber jedoch aufgrund der geringen Personalkosten zu einer nahezu stagnierenden Zahlungsreihe führt. Im Gegensatz dazu weist die Steigung der Kostenwertkurve der manuellen Montage auf die Bedeutung der Lohnkosten hin. Eine detaillierte Darstellung der Kostenwerte befindet sich in Anhang B.

Es kann geschlussfolgert werden, dass die förderbandsynchrone Montage der manuellen Variante aus finanzieller Sicht über den Betrachtungszeitraum überlegen ist. Dies gilt jedoch nur, wenn es sich um eine notwendige Investition handelt, das heißt Alternativinvestitionen nicht berücksichtigt werden müssen.

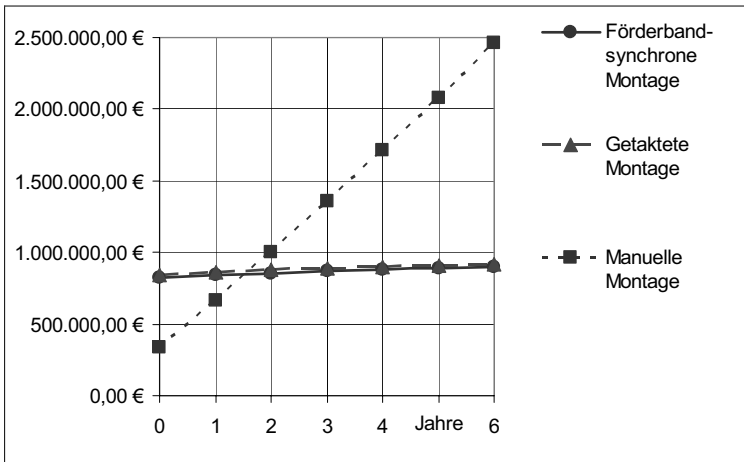


Abbildung 9-14: Kostenwerte der Realisierungsalternativen über den Betrachtungszeitraum

Kapitalbarwert

Die Kapitalbarwertmethode ermöglicht den Vergleich von Alternativinvestitionen, welcher gerade bei Rationalisierungsprojekten von Bedeutung ist, da hier, aufgrund des limitierten Etats, nur eine begrenzte Anzahl an Investitionen getätigt werden können.

Bei der Kapitalbarwertmethode dient der erzielte Gewinn G , der durch die jährlichen Erlöse E_t abzüglich der Kosten K_t errechnet wird, als Vergleichskriterium. Aus diesem wird durch Abzinsung mit dem Kalkulationszinssatz i der Kapitalwert C_0 ermittelt.

$$C_0 = G_0 + \sum_{t=1}^{T_{AB}} G_t \cdot \frac{1}{(1+i)^t} = -I_0 + \sum_{t=1}^{T_{AB}} (E_t - K_t) \cdot \frac{1}{(1+i)^t} \quad (6)$$

Ist der Kapitalbarwert positiv ($C_0 > 0$), so ist die Verzinsung des jeweils gebundenen Kapitals höher als der Kalkulationszinssatz und das Projekt ist damit vorteilhaft.

Mithilfe der Kapitalbarwertmethode kann die Wirtschaftlichkeit einer Automatisierung unter dem Gesichtspunkt der Rationalisierung gegenüber der internen Kapitalverzinsung bestimmt werden. Die Wirtschaftlichkeit der Investition wird ermittelt, indem der Invest zum Kalkulationszinssatz verzinst wird. Dabei wird für Rationalisierungsprojekte ein Kalkulationszinssatz (i) von 20% angenommen. Darüber hinaus werden die Erlöse über einen Kostenvergleich mit dem manuellen Radanbau ermittelt. Abbildung 9-15 zeigt die Kapitalwerte der Realisierungsalternativen über den Betrachtungszeitraum jeweils mit und ohne Verzinsung des eingesetzten Kapitals. Eine detaillierte Darstellung ist im Anhang B vorhanden.

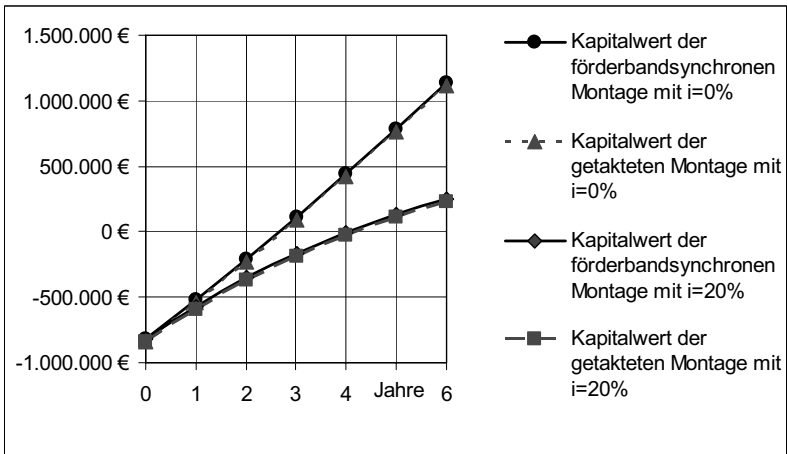


Abbildung 9-15: Kapitalwerte der Realisierungsalternativen über den Betrachtungszeitraum

Der negative Kapitalwert in den ersten vier Jahren deutet an, dass eine Rationalisierung bestehender Anlagen durch eine Automatisierung finanziell nicht sinnvoll ist, da das gebundene Kapital eine niedrigere Verzinsung als der vorgegebene Kalkulationszinssatz erfährt. Erst bei einer Laufzeit von mehr als vier Jahren

ist die automatisierte Montage der manuellen überlegen. Der interne Zinsfuß der förderbandsynchronen Montage liegt bei 31,5%.

9.3.4 Nutzwert

Die Nutzwertanalyse besteht aus einem hierarchisch gegliederten Zielsystem mit einer ebenfalls hierarchisch abgestuften Gewichtung. Dabei werden die Bewertungskriterien zu Gruppen zusammengefasst und entsprechenden Oberbegriffen oder Hauptkriterien zugeordnet. Darauf hin erhalten die Oberbegriffe eine Gewichtung g_i und zusätzlich jedes Kriterium einer Gruppe eine Gewichtung g_n . Damit ergibt sich der Nutzwert, indem die Wertungen P_n der einzelnen Kriterien mit ihrer Gewichtung und der Gewichtung der Oberbegriffe multipliziert und zu einem Gesamtwert aufsummiert werden.

$$N = \sum g_i \cdot \left(\sum P_n \cdot g_n \right) \quad (7)$$

Die Nutzwertanalyse wurde mit Hilfe einer Befragung in der Automobilindustrie untersucht. Dafür wurden in einem ersten Schritt die Bewertungskriterien festgelegt und ein Analyseverfahren ausgewählt. Danach erfolgte die eigentliche Bewertung der einzelnen Montagevarianten anhand dieser Kriterien. Die Befragung wurde allgemeingültig durchgeführt, d.h. ohne direkten Bezug zur Radmontage.

Bei der Identifizierung der Bewertungskriterien wurde einerseits auf Checklisten (ERLENSPIEL 1995, WARNECKE & SCHRAFT 1984) zurückgegriffen und diese anhand von Expertengesprächen erweitert. Die definierten Bewertungskriterien und Ergebnisse der Nutzwertanalyse gehen aus Tabelle 9-3 hervor. Die Bewertung erfolgte mit Zahlen von 1 bis 6, wobei 1 für einen sehr hohen Erfüllungsgrad steht. Die Gewichtung der einzelnen Bewertungskriterien zueinander wurde durch paarweise Vergleiche festgelegt.

Tabelle 9-3: Nutzwertanalyse der Manuellen Montage (m), förderbandsynchronen Montage (syn) und getaktet automatisierten Montage (g)

	Bewertung			Ge- wicht	gewichtete Bewertung		
	m	syn	g		m	syn	g
Verfügbarkeit				17,6%			
Verfügbarkeit des Werkzeuges	1,8	3,9	3,5	6,5%	0,11	0,25	0,23
Instandhaltung	1,9	4,1	3,8	3,0%	0,06	0,12	0,11
Notfallstrategien / Redundanz	1,9	4,0	4,0	4,0%	0,07	0,16	0,16
Bedienbarkeit	3,0	1,8	1,8	4,1%	0,12	0,07	0,07
Belastung der Mitarbeiter	3,3	1,1	1,1	14,9%	0,49	0,17	0,17
Integrierbarkeit der Station in die Montagelinie				11,7%			
Mobilität der Station / Anschluss an die Montagelinie	2,0	4,1	5,1	2,4%	0,05	0,10	0,13
Platzbedarf	1,8	3,4	5,1	2,3%	0,04	0,08	0,12
Montagegeschwindigkeit / Taktzeitänderung	2,4	2,9	3,1	3,9%	0,09	0,11	0,12
Logistikaufwand	1,9	3,4	3,4	3,0%	0,06	0,10	0,10
Installationsaufwand				8,3%			
Installationsaufwand	2,1	4,8	4,9	1,8%	0,04	0,09	0,09
Anlernen der Mitarbeiter	2,5	3,3	3,4	2,2%	0,05	0,07	0,07
Testaufwand des Montageplatzes	1,4	4,4	4,4	1,5%	0,02	0,07	0,07
Verfügbarkeit der Anlage beim Anlauf	1,5	4,1	4,0	2,7%	0,04	0,11	0,11
Flexibilität des Montageprozesses	1,8	3,1	3,5	12,5%	0,22	0,39	0,44
Qualitätssicherung				15,8%			
Positioniergenauigkeit / Prozesssicherheit	2,1	2,5	2,4	7,4%	0,16	0,19	0,18
Messwerterfassung	1,8	1,4	1,4	4,5%	0,08	0,06	0,06
Dokumentation	1,8	1,5	1,5	3,8%	0,07	0,06	0,06
Prestige	3,9	1,1	1,9	3,4%	0,13	0,04	0,06
Know-how Zugewinn	4,1	1,3	1,8	7,5%	0,31	0,09	0,13
Unabhängigkeit vom Arbeiter / Arbeitsmarkt	4,6	2,5	2,5	8,3%	0,38	0,21	0,21
					Nutzwert		
Gesamt	47,3	58,5	62,4	100,0 %	2,60	2,54	2,68

Es zeigt sich, dass durch eine förderbandsynchrone Montage nur ein geringfügig höherer Nutzen erzielt wird als mit der getakteten Montage. Bei der Integrierbarkeit der Montagestation hat die getaktete Lösung jedoch deutliche Defizite.

Die manuelle Montage wird aufgrund der Flexibilität der menschlichen Arbeitskraft in den meisten Kriterien besser eingestuft. Jedoch besteht der Bedarf, den Menschen zu entlasten und die Qualitätssicherung zu verbessern.

Daraus ergibt sich für die förderbandsynchrone Montage, dass diese immer dann sinnvoll einsetzbar ist, wenn die bisherige Arbeit eine hohe Belastung für den Mitarbeiter bedeutet, sehr personalintensiv ist oder eine hohe Prozesssicherheit erfordert. Der Prozess sollte so gestaltet werden können, dass er keine hohen Ansprüche an die Flexibilität der Arbeitsstation stellt. Um eine hohe Verfügbarkeit zu garantieren, sollten die Arbeitsschritte ersatzweise manuell durchführbar sein.

9.4 Zusammenfassung

Die Bewertung der Methode und des Systems zur förderbandsynchronen Montage wurde im Hinblick auf sowohl die technische als auch die wirtschaftliche Effizienz untersucht.

Für die technische Bewertung wurde eingangs ein geeignetes Messsystem entwickelt, um die Verfolgegenauigkeit messen zu können. Daraufhin wurden Versuchsläufe für die Grob- und Feinsynchronisation durchgeführt. Die Montagegenauigkeit wurde mithilfe des Montageprozesses „Radmontage“ ermittelt. Die Auswertung der Messungen ergab, dass das realisierte Pilotsystem in der Annäherungsphase eine Positions-Verfolgegenauigkeit VG_p von 2,2 mm erreicht. Die realisierte Montagegenauigkeit beträgt 0,13 mm. Damit ist die hier umgesetzte förderbandsynchrone Montage dem aktuellen Stand der Technik deutlich überlegen.

Für die wirtschaftliche Bewertung wurden die Realisierungsalternativen „manuelle“ sowie „automatisierte getaktete Radmontage“ als Vergleichswerte herangezogen. In einem ersten Schritt wurden die notwendigen Investitionskosten ermittelt. Daraufhin wurden die dynamischen Investitionsrechenmethoden Kosten- und Kapitalbarwertmethode zur Beurteilung sowohl einer Erst- als auch Rationalisierungsinvestition durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die förderbandsynchrone Montage preiswerter zu realisieren ist als die Realisierungsalternativen

und somit bei einer Erstinvestition zu wählen ist. Mithilfe der Kapitalbarwertmethode wurde festgestellt, dass die Wirtschaftlichkeit einer Automatisierung unter dem Gesichtspunkt der Rationalisierung erst nach einer Laufzeit von vier Jahren gegeben ist. Die nicht monetären Kriterien wurden mit einer Nutzwertanalyse bewertet. Es zeigt sich, dass durch die förderbandsynchrone Montage besonders in den Kriterien Integrierbarkeit in vorhandene Montagesysteme und Flexibilität der getakteten Automatisierung überlegen ist. Die manuelle Montage übertrifft sie insbesondere bei der Entlastung des Menschen und der Qualitätssicherung.

10 Zusammenfassung und Ausblick

10.1 Zusammenfassung

Die Fließlinie ist eine der effizientesten Organisationsformen der Montage. Sie bietet eine Reihe von Vorteilen, wie beispielsweise die Vermeidung von Taktzeitverlusten und damit die Reduktion von Durchlaufzeiten. Die wirtschaftlichen Vorteile einer Automatisierung sind hingegen derzeit durch die Notwendigkeit der Synchronisation von Handhabungsgerät und Produkt limitiert. Die förderbandsynchrone Montage kombiniert jedoch die hohe und reproduzierbare Qualität der automatisierten Montage mit der Flexibilität der manuellen Fließmontage.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, einen Roboter mit dem im Fördersystem geförderten Bauteil derart zu synchronisieren, dass eine automatisierte Montage im Fließbetrieb durchgeführt werden kann.

Die Analyse der betrachteten Fördersysteme ergab, dass zusätzlich zu den bekannten Positionsdifferenzen in Förderrichtung weitere Abweichungen der Lage und Orientierung in den bisher nicht betrachteten Freiheitsgraden vorhanden sind. Da diese zu Posedifferenzen von mehreren Millimetern und Grad führen, ist eine Synchronisation in allen sechs Freiheitsgraden erforderlich. Darüber hinaus zeigte sich, dass die aktuelle Robotertechnik diese Schwingungen der Fördersysteme aufgrund zu geringer Regelgeschwindigkeiten nicht auszugleichen vermag.

Aufbauend auf diesen Analysen wurde eine Methode zur Synchronisation eines Roboters mit dem zu fördernden Bauteil entwickelt. Eckpunkte dieser Methode sind die Auswahl der Synchronisationsstrecke, die Trennung von regelbaren und nicht regelbaren Frequenzen und die Entwicklung eines Synchronisationslaufes für die Realisierung von Montageprozessen.

Die Synchronisationsstrecke ist die Verbindung der Synchronisationsorte am Roboter und Montageobjekt. Aus den Untersuchungen ergab sich, dass eine Synchronisation zwischen Roboter-TCP und Montageort am Montageobjekt am zielführendsten ist. Mithilfe dieser Synchronisationsstrecke können sämtliche Posedifferenzen berücksichtigt und somit eine ausreichend hohe Verfolgegenauigkeit gewährleistet werden.

Die Trennung von regelbaren und nicht regelbaren Frequenzen im Laufverhalten der Fördersysteme erfolgt durch die Integration nachgiebiger Elemente in den Endeffektor. Dadurch wird sichergestellt, dass auch bei geringeren Regelgeschwindigkeiten der Robotersteuerung ein Synchronlauf garantiert werden kann. Die Nachgiebigkeit wurde im Roboterflansch umgesetzt, um eine uneingeschränkte Nachgiebigkeit in sechs Freiheitsgraden mit einer aufwandsarmen Integration in vorhandene Systeme sowie einer hohen Flexibilität zu verbinden.

Das dritte Element der Synchronisationsmethode bildet der Synchronisationslauf. Dieser wird über eine schrittweise Annäherung der zu synchronisierenden Systeme definiert. Während der Grobpositionierungsphase werden die Systeme bezüglich der Geschwindigkeit und Position in Förderrichtung angenähert. Diese Phase entspricht daher den Synchronisationsprinzipien des Standes der Technik. Während der Annäherungsphase werden mithilfe von im Endeffektor integrierten berührungslosen Sensoren die Posedifferenzen erfasst. Die Kontaktphase stellt die dritte Phase des Synchronisationslaufes dar. Wie in der Annäherungsphase werden auch hier die Posedifferenzen erfasst, allerdings unter Verwendung von taktilen Sensoren.

Im Fortgang der Arbeit wurden die für eine allgemeingültige Realisierung eines Systems zur förderbandsynchronen Montage notwendigen berührungslosen und taktilen Posensensoren beschrieben, analysiert und bewertet.

Die Methode zur förderbandsynchronen Montage wurde in einer industrienahen Pilotanlage umgesetzt. Dafür standen eine Elektrohängebahn als Fördersystem und ein Industrieroboter als Handhabungsgerät zur Verfügung. Letzterer wurde im Verlauf der Arbeit durch die Integration prozessspezifischer Sensorik und Aktorik sowie angepasster Steuerungstechnik optimiert. Es wurde darüber hinaus ein Endeffektor entwickelt, der sowohl die notwendige Prozesstechnologie als auch die beschriebene Sensorik und Nachgiebigkeit integrieren kann.

Die Steuerungstechnik des Roboters wurde durch die Integration von Vorsteuerungen optimiert. Diese minimieren die Bahnfehler des Roboters durch Kompensation von dynamischen Verzögerungen, ermöglichen ein schwingungsfreies Verfahren des Endeffektors und verarbeiten die zur Verfügung stehenden Sensorsignale.

Innerhalb der technischen Bewertung des Systems wurde anhand der Pilotanlage dargelegt, dass durch die Anwendung der Methode die notwendige Verfolgengenauigkeit erreicht und die Taktzeiten verringert werden können. Eine wirtschaft-

liche Bewertung des realisierten Systems am Anwendungsbeispiel belegt, dass trotz der zusätzlichen Investition in Sensorik und Adaption der Steuerung eine im Vergleich zum bestehenden Stand der Technik kostengünstigere Produktion möglich ist.

10.2 Ausblick

Aus der im Rahmen der Arbeit entwickelten Methode und deren Umsetzung in einer Pilotanlage ergeben sich interessante Ansätze für weitere Forschungsarbeiten. Grundsätzliches Ziel sollte die Ausweitung des Bereiches der regelbaren Frequenzen sein, so dass auch hochfrequente Systeme ausgeglichen werden können. Dies würde die Anwendungsgebiete vervielfachen und somit weiteren Industriebranchen Nutzen bringen. Um dies zu erreichen, sind die Verarbeitungszeiten der Sensorik und der Steuerung zu minimieren.

Im Bereich der Bildverarbeitung zur berührungslosen Posemessung sind schnellere Systeme sowohl in der Hard- als auch Software zu entwickeln. Die Aufnahmefrequenzen der Kameras sind zu erhöhen und die Übertragungszeiten zum Bildverarbeitungsrechner zu minimieren. Darüber hinaus trägt eine optimierte und vereinfachte Algorithmik der Bildauswertung zu einer Geschwindigkeitssteigerung des Gesamtsystems bei.

Auf Seiten des Roboters ergeben sich interessante Aufgabenstellungen in der Verringerung der Reaktionszeit durch geringere Steuerungstakte und eine Minimierung der Trägheit des Roboterarms.

Besondere Aufmerksamkeit sollte der Realisierung einer Mensch-Roboter-Kooperation bei Robotern hoher Traglast gewidmet werden. Die derzeit notwendige Trennung der Arbeitsplätze von Mensch und Roboter erfordert den Einsatz von trennenden Schutzeinrichtungen. Diese führen jedoch dazu, dass ein Verweilen des Mitarbeiters auf dem Förderband, zum Beispiel aufgrund von Nacharbeit oder bei variierenden Arbeitsinhalten, nicht möglich ist. Daher können derzeit auch bei Verwendung von förderbandsynchroner Automatisierungstechnik die Vorteile der kombinierten Fließmontage, wie sie heute in der Automobilendmontage eingesetzt wird, nicht vollständig ausgeschöpft werden. Die Möglichkeit manueller Arbeiten am Montageobjekt bei gleichzeitiger automatisierter Montage durch den Roboter würde somit zu deutlichen Effizienzsteigerungen führen.

11 Literaturverzeichnis

ABB FLEXIBLE AUTOMATION GMBH 1998

ABB Flexible Automation GmbH: Produktspezifikation Conveyor Tracking. Västerås: 1998.

ADEPT 2006

Adept: AdeptSight™ 2.0. Livermore, CA: 2006.

ANDREASEN & AHM 1988

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

ANGELES 2003

Angeles, J.: Fundamentals of Robotic Mechanical Systems. 2. Aufl. Berlin, New York: Springer 2003.

ARAI et al. 2005

Arai, T.; Maeda, Y.; Kikuchi, H.; Sugi, M.: Automated Calibration of Robot Coordinates for Reconfigurable Assembly Systems. Annals of the CIRP 51 (2005) 1, S. 5-8.

ARAI et al. 2006

Arai, T.; Yamanobe, N.; Maeda, Y.; Fujii, H.; Kato, T.; Sato, T.: Increasing Efficiency of Force-Controlled Robotic Assembly. Annals of the CIRP 55 (2006) 1, S. 7-10.

ARNOLD 2004

Arnold, D.: Technische Logistiksysteme. In: Arnold, D. et al. (Hrsg.): Handbuch Logistik. 2., aktualisierte und korrigierte Aufl. Berlin; Heidelberg; New York; Hongkong; London; Mailand; Paris; Tokio: Springer 2004.

ASTRÖM & WITTENMARK 1995

Aström, K. J.; Wittenmark, B.: Adaptive Control. 2. Aufl. Addison-Wesley 1995.

BALLANTYNE 1999

Ballantyne, W. J.: Distance. In: Webster, J. G. (Hrsg.): The measurement, instrumentation, and sensors handbook [electronic resource]. 1. Aufl. Boca Raton, Fla.: CRC Press published in cooperation with IEEE Press 1999.

BARBATO & BRAY 1994

Barbato, G.; Bray, A.: Sensors for Measuring Force. In: Göpel, W. et al. (Hrsg.): Sensors - A Comprehensive Survey - Volume 7 Mechanical Sensors. Weinheim: VHC Verlagsgesellschaft mbH 1994, S. 437-482.

BECKWIDTH et al. 2007

Beckwith, T. G.; Marangoni, R. D.; Lienhard V, J. H.: Mechanical Measurements. 6. Aufl. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall 2007.

BERLING et al. 2005

Berling, B.; Heinrich, B.; Thrun, W.; Vogt, W.: Kaspers/Küfner Messen - Steuern - Regeln. 8. überarbeitete und ergänzte Auflage. Wiesbaden: Friedrich Vieweg & Sohn 2005. (Elemente der Automatisierungstechnik)

BONGARDT 2004

Bongardt, T.: Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern. Diss. Technische Universität München (2003). München: Urz 2004. (iwb-Forschungsberichte 184)

BURKHARDT et al. 2004

Burkhardt, T.; Feinäugle, A.; Fericean, S.; Forkl, A.: Lineare Weg- und Abstandssensoren. Landsberg: moderne industrie 2004. 271).

BURSTER PRÄZISIONSMESSTECHNIK 2008

Burster Präzisionsmesstechnik: Potentiometrische Wegtaster Typen 8712 und 8713. Gernsbach: 2008.

CARELLI et al. 2005

Carelli, R.; Soria, C. m.; Morales, B.: Vision-Based Tracking Control for Mobile Robots. In: Proceedings of the 12th International Conference on Advanced Robotics ICAR '05; Seattle / USA July 18-20, 2005. 2005, S. 148-152.

CRAIG 2005

Craig, J. J.: Introduction to Robotics Mechanics and Control. Pearson Prentice Hall 2005.

CURCHILL 1988

Curchill, S. W.: Viscous Flows - The Practical Use of Theory. Boston: Butterworth Publishers 1988.

DEMANT et al. 1998

Demant, C.; Streicher-Abel, B.; Waszkewitz, P.: Industrielle Bildverarbeitung: Wie optische Qualitätskontrolle wirklich funktioniert. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1998.

DENKENA & DRABOW 2005

Denkena, B.; Drabow, G.: Gestaltung und Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Betriebsmitteln. In: Wiendahl, H. P. et al. (Hrsg.): Planung modularer Fabriken- Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. München: Hanser 2005.

DIEDRICHS 2002

Diedrichs, R.: Nondestructive Testing Encyclopedia - Holographic NDT. <<http://www.ndt.net/article/az/other/hndt.htm>> (30.04.2002).

DIN 8593 - TEIL 0

DIN 8593 - Teil 0: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth

DIN 8593 - TEIL 1

DIN 8593 - Teil 1: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 1: Zusammensetzen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth

DIN 8593 - TEIL 2

DIN 8593 - Teil 2: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 2: Füllen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth

DIN 8593 - TEIL 3

DIN 8593 - Teil 3: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 3: Anpressen, Einpressen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth

DIN 8593 - TEIL 4

DIN 8593 - Teil 4: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 4: Fügen durch Urformen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth

DIN 8593 - TEIL 5

DIN 8593 - Teil 5: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 5: Fügen durch Umformen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth

DIN 8593 - TEIL 6

DIN 8593 - Teil 6: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 6: Fügen durch Schweißen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth

DIN 8593 - TEIL 7

DIN 8593 - Teil 7: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 7: Fügen durch Löten - Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth

DIN 8593 - TEIL 8

DIN 8593 - Teil 8: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 8: Kleben - Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth

DIN 15201 TEIL 1

DIN 15201 Teil 1: Stetigförderer Benennungen. Berlin: Beuth

DIN 55350-11:2007-03

DIN 55350-11:2007-03: Begriffe zum Qualitätsmanagement - Teil 11: Ergänzung zu DIN EN ISO 9000:2005. Berlin: Beuth

DIN EN 60204-1 VDE 0113-1:2007-06

DIN EN 60204-1 VDE 0113-1:2007-06: Sicherheit von Maschinen - Elektrische Ausrüstung von Maschinen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Berlin: Beuth (Deutsche Fassung EN 60204-1:2006)

DIN EN ISO 9283

DIN EN ISO 9283: Industrieroboter - Leistungskenngrößen und zugehörige Prüfmethode. Berlin: Beuth

DIN EN ISO 9787

DIN EN ISO 9787: Industrieroboter - Koordinatensysteme und Bewegungsnotenkaturen. Berlin: Beuth

DIN EN ISO 12100-1

DIN EN ISO 12100-1: Sicherheit von Maschinen - Grundbegriffe, allgemeine Gestaltungsleitsätze - Teil 1: Grundsätzliche Terminologie, Methodologie (ISO 12100-1:2003). Berlin: Beuth

DIN EN ISO 12100-2

DIN EN ISO 12100-2: Sicherheit von Maschinen - Grundbegriffe, allgemeine Gestaltungsleitsätze - Teil 2: Technische Leitsätze (ISO 12100-2:2003). Berlin: Beuth

DIN EN ISO 13849-1

DIN EN ISO 13849-1: Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen, Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze. Berlin: Beuth

DIN EN ISO 13850

DIN EN ISO 13850: Sicherheit von Maschinen - Not-Halt, Gestaltungsleitsätze. Berlin: Beuth

DIN IEC 61508

DIN IEC 61508: Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme. Berlin: Beuth

DIRNDORFER 1993

Dirndorfer, A.: Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage. Diss. Technische Universität München (1993). Berlin [u.a.]: Springer 1993. (iwb-Forschungsberichte 63)

DUDEN 2001

Duden: Das Fremwörterbuch. Mannheim: Brockhaus 2001.

EGELKAMP 1989

Egelkamp, B.: Prozeßadaptierte Geometrievermessung mit visuellen Sensorsystemen, dargestellt am Beispiel des Walzrundes. Diss. Ruhr-Universität Bochum (1989). 89.1).

ELBESTAWI 1999

Elbestawi, M. A.: Force Measurement. In: Webster, J. G. (Hrsg.): The measurement, instrumentation, and sensors handbook [electronic resource]. 1. Aufl. Boca Raton, Fla.: CRC Press published in cooperation with IEEE Press 1999.

ERLENSPIEL 1995

Erlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung: Methoden für Prozessorganisation, Produkterstellung und Konstruktion. München: Hanser 1995.

ERTL 1979

Ertl, F.: Aufbau und Untersuchung eines berührungslos optisch arbeitenden Längenmessverfahrens für den Einsatz in der Fertigung. Diss. TH Darmstadt (1979). 1979.

EST 2006

EST: Beschreibung Profibusschnittstelle. Oberkochen: 2006.

EURODRIVE 2004

Eurodrive, S.: Bauformen, technische Daten und Maßblätter Drehstrommotoren. Bruchsal: 2004.

FANUC ROBOTICS 2008

FANUC Robotics: LINE TRACKING_J521. Neuhausen a. d. F.: 2008.

FELDMANN & SLAMA 2001

Feldmann, K.; Slama, S.: Highly flexible Assembly – Scope and Justification. Annals of the CIRP 50 (2001) 2, S. 489-498.

GAIROLA 1985

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

GARSHELIS 1999

Garshelis, I. J.: Torque and Power Measurement. In: Webster, J. G. (Hrsg.): The measurement, instrumentation, and sensors handbook [electronic resource]. 1. Aufl. Boca Raton, Fla.: CRC Press published in cooperation with IEEE Press 1999.

GORINEVSKY et al. 1997

Gorinevsky, D. M.; Formalsky, A. M.; Schneider, A. Y.: Force Control of Robotic Systems. Routledge US: CRC Press 1997.

GREWE et al. 2000

Grewe, J.; Meusel, P.; Jörg, S.; Hirzinger, G.: Sensorgeführte Montage am bewegten Objekt mittels nachgiebigem Kraft-Momenten-Sensor. VDI Berichte (2000) 1552, S. 151-157.

GREWE et al. 2001

Grewe, J.; Hirzinger, G.; Koeppe, R.; Strobl, C.; Willberg, B.: Compliant-Force-Torque-Sensor. 10th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD2001). Wien.

GULDNER et al. 2003

Guldner, J.; Stelter, J.; Verl, A.: Kraft-/Momentenregelung für Industrieroboter zur Durchführung komplexer Montageaufgaben - Feinfühler Tastsinn für starke Maschinen. Werkstattstechnik 93 (2003) 9, S. 632-635.

HALLER 1998

Haller, T.: Erfassen und Verarbeiten komplexer Geometrien in Meßtechnik und Flächenrückführung. Diss. Universität Stuttgart (1998). Berlin: Springer 1998. (ipa-iao Forschung und Praxis 277).

HECKEL 1995

Heckel, W.: Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (1994). München: Carl Hanser 1995. (Fertigungstechnik Erlangen 43).

HESSELBACH et al. 2006

Hesselbach, J.; Schöttler, K.; Tutsch, R.; Berndt, M.: Assembly of Hybrid Microsystems Using an Assembly System with 3D Optical Sensor. Annals of the CIRP 55 (2006) 1, S. 11-14.

HILDEBRAND 2001

Hildebrand, T.: PLUG+PRODUCE -Interaktives Modulkonzept für wandlungsfähige Fabrikstrukturen. Vernetzt Planen und Produzieren 4. Dresden 21.09.2001, S. 177-180.

HOFFMEISTER 2000

Hoffmeister, W.: Investitionsrechnung und Nutzwertanalyse: eine entscheidungsorientierte Darstellung mit vielen Beispielen und Übungen. Stuttgart; Berlin; Köln: Kohlhammer 2000.

HUANG et al. 2007

Huang, T.; Wang, P. F.; Mei, J. P.; Zhao, X. M.; Chetwynd, D. G.: Time Minimum Trajectory Planning of a 2-DOF Translational Parallel Robot for Pick-and-place Operations. *Annals of the CIRP* 56 (2007) 1, S. 365-368.

IBG TECHNOLOGY 2006

IBG Technology: Vollautomatische Radmontage im Takt- und Fließbetrieb. Lübeck: 2006.

JÖRG et al. 2000

Jörg, S.; Langwald, J.; Stelter, J.; Hirzinger, G.; Natale, C.: Flexible Robot-Assembly using a Multi-Sensory Approach. *Proc. IEEE International Conference on Robotics&Automation*. San Francisco, CA April 2000, S. 3687-3694.

JUCKENACK 1994

Juckenack, D.: Sensors for Measuring Torque. In: Göpel, W. et al. (Hrsg.): *Sensors - A Comprehensive Survey - Volume 7 Mechanical Sensors*. Weinheim: VHC Verlagsgesellschaft mbH 1994, S. 482-512.

JÜNEMANN & SCHMIDT 1999

Jünemann, R.; Schmidt, T.: *Materialflußsysteme*. 2. Aufl. Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hongkong; London; Mailand; Paris; Singapur; Tokio: Springer 1999.

KAMEL et al. 2008a

Kamel, A.; Lange, F.; Hirzinger, G.: New Aspects of Input Shaping Control to Damp Oscillations of a Compliant Force Sensor. *ICRA 2008*. Pasadena.

KAMEL et al. 2008b

Kamel, A.; Lange, F.; Hirzinger, G.: Vibration reduction of a compliant force/torque sensor using an industrial-robots-suited command preshaping control scheme. *MOVIC 2008*. München.

KOETHER 2001

Koether, R.: *Technische Logistik*. 2. Aufl. München; Wien: Hanser 2001.

KORTE 2005

Korte, H. H.: Wandlungsfähige Betriebsmittel, Herausforderung an die Hersteller. In: Wiendahl, H. P. et al. (Hrsg.): *Planung modularer Fabriken- Vorgehen und Beispiele aus der Praxis*. München: Hanser 2005.

KRÜGER et al. 2005

Krüger, J.; Nickolay, B.; Heyer, P.; Seliger, G.: Image based 3D Surveillance for flexible Man-Robot-Cooperation. Annals of the CIRP 54 (2005) 1, S. 19-22.

KUKA ROBOTER 2004

KUKA Roboter: Spezifikation KR 150 -2, 180-2, 210-2, 240-2 de/en/fr. Augsburg: 2004.

KUKA ROBOTER 2005

KUKA Roboter: Technical Data KL 1500/2 floor. Augsburg: 2005.

KUKA ROBOTER 2006a

KUKA Roboter: KUKA Conveyor Tech 3.1. Augsburg: 2006a.

KUKA ROBOTER 2006b

KUKA Roboter: KUKA Roboter Steuerung (KR C). Augsburg: 2006b.

KURFESS 2005

Kurfess, T. R.: Robotics and Automation Handbook. CRC Press 2005.

KURTH 1983

Kurth, F. (Hrsg.): Stetigförderer. 4. stark überarbeitete Aufl. Berlin: VEB Verlag Berlin 1983. (Fördertechnik)

LANGE 2003

Lange, F.: Adaptive vorausplanende Steuerung für schnelle sensorbasierte Roboterbewegungen. Diss. Universität Karlsruhe (2003).

LANGE & HIRZINGER 1996

Lange, F.; Hirzinger, G.: Learning Force Control with Position Controlled Robots. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Minneapolis / USA April 1996.

LANGE & HIRZINGER 2005

Lange, F.; Hirzinger, G.: Stability Preserving Sensor-Based Control for Robots with Positional Interface. IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA2005. Barcelona / Spanien April 2005.

LANGE et al. 2006

Lange, F.; Hirzinger, G.; Frommberger, M.: Impedance-based Smoothing for Visual Servoing along Edges. Joint Conference on Robotics ISR2006. München May, 2006.

LANGE et al. 2008a

Lange, F.; Kamel, A.; Hirzinger, G.; Werner, J.: Sensorfusion und Regelung eines Roboters am kontinuierlich bewegten Band. In: VDI Fachtagung Automation 2008; Baden Baden 3.-4. 6. 2008. 2008a.

LANGE et al. 2008b

Lange, F.; Strobl, K. H.; Langwald, J.; Jörg, S.; Hirzinger, G.; Gruber, B.; Klein, J.; Werner, J.: Kameragestützte Montage von Rädern an kontinuierlich bewegte Fahrzeuge. In: VDI Fachtagung ROBOTIK 2008; München 11.-12. 6. 2008. 2008b.

LANGE et al. 2008c

Lange, F.; Frommberger, M.; Jörg, S.; Langwald, J.; Kamel, A.; Meusel, P.; Willberg, B.; Hirzinger, G.; Werner, J.: Montage am kontinuierlich bewegten Band - Sensorkonfiguration und Programmierung. In: VDI Fachtagung ROBOTIK 2008; München 11.-12. 6. 2008. 2008c.

LOTTER et al. 1998

Lotter, B.; Hartel, M.; Menges, R.: Manuelle Montage - wirtschaftlich gestalten. Renningen-Malmsheim: expert 1998. (Kontakt & Studium 569)

LU & CHUNG 2005

Lu, S.; Chung, J. H.: Collision Detection Enabled Weighted Path Planning: A Wrist and Base Torque/Torque Sensors Approach. In: Proceedings of the 12th International Conference on Advanced Robotics ICAR '05; Seattle / USA July 18-20, 2005. 2005, S. 165-170.

MARTIN 1978

Martin, H.: Förder- und Lagertechnik. 1. Aufl. Braunschweig: Vieweg 1978.

MATT 2002

Matt, D.: Planung autonomer, wandlungsfähiger Produktionsmodule. ZWF - Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (2002) 4, S. 1-5.

MAURER et al. 2005

Maurer, A.; Lang, N.; Bühl, P.; Charpilo, N.: Current and Future Trends in the Global Robotics Industry: Summary of Key Findings of a Global Market Study. Munich: 2005.

MCKERROW 1995

McKerrow, P. J.: Introduction to Robotics. Addison Wesley 1995.

MEADOWS et al. 1970

Meadows, D. M.; Johnson, W. O.; Allen, J. B.: Generation of Surface Contours by Moiré-Patterns. Applied Optics 9 (1970) 942-947.

MIGEON & LENEL 2007

Migeon, A.; Lenel, A.-E.: Pressure Sensors. In: Ripka, P. et al. (Hrsg.): Modern Sensors Handbook. London: ISTE 2007.

MILBERG 1987

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

MITTRAPIYANURUK et al. 2004

Mittrapiyanuruk, P.; DeSouza, G. N.; Kak, A. C.: Calculating the 3D-Pose of Rigid Objects Using Active Appearance Models. In: Proceedings of the Int. Conference in Robotics and Automation. 2004.

MOLITOR 1988

Molitor, M.: Berührunglose optoelektronische Messautomaten für die Geometrierfassung an Werkstücken. Diss. RWTH Aachen (1988). Düsseldorf: VDI 1988. (VDI Fortschrittsberichte, Reihe 8, Nr. 173).

MORRIS 1997

Morris, A. S.: Measurement and Calibration Requirements - For Quality Assurance to ISO 9000. Chichester: John Wiley & Sons 1997. (Wiley Series in Quality and Reliability Engineering)

MOSANDL 2005

Mosandl, T.: Qualitätssteigerung beim automatisierten Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme. Diss. Technische Universität München (2004). München: Herbert Utz 2005. (*iwb* Forschungsberichte 189).

MOTOMAN 2003

Motoman: Motoman demonstrates high-speed small parts handling with integrated vision system and conveyor tracking. Dayton, Ohio: 2003. (Motoman Press Release)

MÜLLER 1990

Müller, J.: Arbeitsmethoden der Technikwissenschaften: Systematik, Heuristik, Kreativität. Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokyo; Hong Kong: Springer 1990.

NEUHAUSEN 2001

Neuhausen, J.: Gestaltung modularer Produktionssysteme für Unternehmen der Serienproduktion. Diss. RWTH Aachen (2001). Aachen: 2001.

ORTEGA & SPONG 1989

Ortega, R.; Spong, M. W.: Adaptive Motion Control of Rigid Robots: A Tutorial. *Automatica* 25 (1989) 6, S. 877-888.

PARK & LEE 1991

Park, T. H.; Lee, B. H.: An Approach to Robot Motion Analysis and Planning for Conveyor Tracking. In: Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation Volume 1. 1991, S. 70-75.

PAUL 1981

Paul, R. P.: Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control. MIT-Press 1981.

PEINEMANN 1995

Peinemann, F. W.: Neuronale Regelungskonzepte zur sensomotorischen Koordination von Industrierobotern. Diss. VDI 1995. (Fortschritt Berichte, Reihe 8. Bd. 542).

PERRIDON & STEINER 1997

Perridon, L.; Steiner, M.: Finanzwirtschaft der Unternehmung. München: Vahlen 1997.

PFEIFFER 1989

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

POPPER 1976

Popper, K. R.: Logik der Forschung. 6. verbesserte Aufl. Tübingen: J. C. B. Mohr 1976.

POUGET 2000

Pouget, P. M.: Ganzheitliches Konzept für rekonfigurierbare Produktionssysteme auf Basis autonomer Produktionsmodule. Diss. Als Ms. gedr. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl. 2000. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Fertigungstechnik ; 537

REINHART 2000

Reinhart, G.: Deutschland ist Montageland. wt Werkstattstechnik online 90 (2000) 9, S. 336.

REINHART & ZÄH 2006

Reinhart, G.; Zäh, M. F.: Reaktionsschnelle Montage variantenreicher Produkte - ein Wettbewerbsvorteil. wt Werkstattstechnik online 96 (2006) 9, S. 568.

REINHART et al. 1998

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

RICHTLINIE 2006/42/EG 2006

Richtlinie 2006/42/EG: 2006. (Amtsblatt der Europäischen Union)

RIPKA & TIPEK 2007

Ripka, P.; Tipek, A. (Hrsg.): Modern Sensors Handbook. London: ISTE 2007.

ROGOS 1989

Rogos, J.: Intelligente Sensorsysteme in der Fertigungstechnik. Heidelberg: Springer 1989. 21).

RUOFF 1989

Ruoff, W.: Optische Sensorsysteme zur On-line-Führung von Industrierobotern. Diss. Universität Stuttgart (1988). Heidelberg: Springer 1989. (Forschung und Praxis 81).

SAAD et al. 1999

Saad, R. E.; Bonen, A.; Smith, K. C.; Benhabib, B.: Proximity Sensing for Robotics. In: Webster, J. G. (Hrsg.): The measurement, instrumentation, and sensors handbook [electronic resource]. 1. Aufl. Boca Raton, Fla.: CRC Press published in cooperation with IEEE Press 1999.

SANTOCHI & DINI 1998

Santochi, M.; Dini, G.: Sensor Technology in Assembly Systems. Annals of the CIRP 47 (1998) 2, S. 503-524.

SCHEFFLER 1973

Scheffler, M. (Hrsg.): Einführung in die Fördertechnik. 2. Aufl. Leipzig: VEB Fachbuchverlag Leipzig 1973.

SCHLICKENRIEDER 2008

Schlickenrieder, K.: Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile. Diss. Technische Universität München (2007). 2008. (Forschungsberichte iw b ??)

SCHMIDT 2002

Schmidt, K.: Methodik zur integrierten Grobplanung von Abläufen und Strukturen mit digitalen Fabrikmodellen. Diss. RWTH Aachen 2002.

SCHÖNFELDER 1993

Schönfelder, G.: Das Messtechnik-Kochbuch. 1. Aufl. Aufl. Vaterstetten bei München: IWT-Verlag 1993.

SCHUGMANN 1990

Schugmann, R.: Entwicklung und Auslegung nachgiebiger Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage. Diss. Technische Universität München (1989). 1990. (Forschungsberichte iwv 24)

SCHUH et al. 2004

Schuh, G.; Lösch, F.; Gottschalk, S.; Harre, J.; Kampker, A.: Gestaltung von Betriebsmitteln für die Serienproduktion. ZWF - Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 99 (2004) 5, S. 212-217.

SCHUNK 2005a

Schunk: FTC 50 DE. Lauffen/Neckar: 2005a.

SCHUNK 2005b

Schunk: PSH 52 (metrische Version). Lauffen/Neckar: 2005b.

SCHUTZRECHT DE 32 49 454 C2 1989

Schutzrecht DE 32 49 454 C2 Verfahren zur Montage von Fertighimmeln in Fahrzeugen (26.10.1989). Audi AG. Motzet, J. u. a.: Verfahren zur Montage von Fertighimmeln in Fahrzeugen.

SCHUTZRECHT DE 35 16 284 A1 1986

Schutzrecht DE 35 16 284 A1 Verfahren und Vorrichtung zum Montieren von Teilen an einem Hauptkörper Honda Giken Kogyo K.K. Verfahren und Vorrichtung zum Montieren von Teilen an einem Hauptkörper.

SCHUTZRECHT DE 35 26 284 C2 1993

Schutzrecht DE 35 26 284 C2 Montagevorrichtung für Fahrzeugkarosserien (15.4.1993). Honda Giken Kogyo K.K Pr.: JP P59-269165 1984-12-19, JP P59-279124. Kajio, S., Saitama Asano u.a.: Montagevorrichtung für Fahrzeugkarosserien.

SCHUTZRECHT DE 40 21 330 C2 1996

Schutzrecht DE 40 21 330 C2 Verfahren zum Betrieb eines Roboters und eine Vorrichtung dazu (24.10.1996). Bayerische Motoren Werke AG. Milberg, J.: Verfahren zum Betrieb eines Roboters und eine Vorrichtung dazu.

SCHUTZRECHT DE 42 30 995 A1 1992

Schutzrecht DE 42 30 995 A1 Vorrichtung zur Synchronisation (17.3.1994). CFC-Fördersysteme GmbH. Pr.: P 42 30 995.6. Linier, G.: Vorrichtung zur Synchronisation.

SCHUTZRECHT DE 195 20 582 C1 1996

Schutzrecht DE 195 20 582 C1 Anordnung zur Synchronisierung eines längs eines Montagebandes verfahrbaren Montageroboters mit einer auf dem Montageband transportierten Karosserie hinsichtlich Geschwindigkeit und Relativlage (1.8.1996). Mercedes-Benz AG. Pr.: Patentschrift (1996-08-01). Kahlert, J. u. a.: Anordnung zur Synchronisierung eines längs eines Montagebandes verfahrbaren Montageroboters mit einer auf dem Montageband transportierten Karosserie hinsichtlich Geschwindigkeit und Relativlage.

SCHUTZRECHT DE 199 04 422 A 1 1999

Schutzrecht DE 199 04 422 A 1 Bewegungssteuerung eines Roboters (16.3.2000). KUKA Roboter GmbH
Wasserthal, Stella. Pr.: 199 04 422.8. Großmann, B. et al.: Bewegungssteuerung eines Roboters.

SCHUTZRECHT EP 02 20 687 B1 1990

Schutzrecht EP 02 20 687 B1 Verfahren und Vorrichtung zum Öffnen und/oder Schließen von Hauben an Kraftfahrzeugkarossen (1.10.1990). Bayerische Motoren Werke AG. Pr.: DE 35 38 468 1985-10-29. Pr.: Patentschrift (1990-01-10). Bellinghausen, K.-H. u. a.: Verfahren und Vorrichtung zum Öffnen und/oder Schließen von Hauben an Kraftfahrzeugkarossen.

SCHUTZRECHT GB 20 75 217 A 1981

Schutzrecht GB 20 75 217 A Relative Position Tracking Systems (11.11.1981). Hall Automation Limited. Pr.: GB 80/12644 1980-04-17. Bruck, P.: Relative Position Tracking Systems.

SCHUTZRECHT US 3 283 918 1966

Schutzrecht US 3 283 918 Coordinated Conveyor and Programmed Apparatus
Devol, G. C.: Coordinated Conveyor and Programmed Apparatus.

SCHUTZRECHT US 4.453.303 1984

Schutzrecht US 4.453.303 Device and Process for Automatic Setting of a Window Element, Headlining or the Like (12.6.1984). Regie Nationale des Usines Renault. Pr.: FR 8115266 1981-08-06. Pr.: 4,453,303. Philippe, L.: Device and Process for Automatic Setting of a Window Element, Headlining or the Like.

SEIB & HÖFLER 1990

Seib, M.; Höfler, H.: Überblick über die verschiedenen Moiré-Techniken. Vision & Voice Magazine 4 (1990) 2, S. 145-151.

SEITZ et al. 1986

Seitz, G.; Tiziani, H.; Litschel, R.: 3D-Koordinatenmessung durch optische Triangulation. Feinwerktechnik & Messtechnik 94 (1986) 7, S. 423-425.

SETHI & SETHI 1990

Sethi, A. K.; Sethi, S. P.: Flexibility in manufacturing: a survey. The International Journal of Flexible Manufacturing Systems (1990) No. 2.

SEVERIN 1987

Severin, F.: Planung der Flexibilität von roboterintegrierten Bearbeitungs- und Montagezellen. Diss. TU Berlin München: Hanser 1987.

SHANNON 1949

Shannon, C. E.: Communication in the Presence of Noise. Proceedings of IRE 37 (1949) 1.

SONY 2004

Sony: B/W Progressive Scan Cameras. Park Ridge, New Jersey: 2004.

STEGMANN 2006

Stegmann, S.: Hiperface Parameterkanal. Donaueschingen: 2006.

STRAND 1985

Strand, T. C.: Optical Three-dimensional Sensing for Machine Vision. Optical Engineering 24 (1985) 1, S. 33-40.

TIZIANI 1989

Tiziani, H.: Optical 3-D Measurement Techniques - a Survey. In: Kahmen, H. et al. (Hrsg.): Optical 3-D Measurement Techniques. Karlsruhe: Wichmann 1989, S. 3-21.

TUTSCH et al. 2001

Tutsch, R.; Ritter, R.; Petz, M.: Zur flächenhaften zerstörungsfreien Prüfung mit Hilfe optischer Feldmesstechnik. In: DGZfP (Hrsg.): DGZfP-Jahrestagung, Zerstörungsfreie Materialprüfung; Berlin. Berlin: DGZfP 2001. (Berichtsband 75-CD).

UHL 1999

Uhl, A.: Evaluation. In: Stimmer, F. (Hrsg.): Lexikon der Sozialpädagogik und der Sozialarbeit. 4. Aufl. München: Oldenbourg 1999.

VDI RICHTLINIE 2860

VDI Richtlinie 2860: Montage- und Handhabungstechnik. Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen, Begriffe, Definitionen, Symbole. Berlin: Beuth Verlag GmbH

VDI-RICHTLINIE 2861 - BLATT 1

VDI-Richtlinie 2861 - Blatt 1: Montage- und Handhabungstechnik; Kenngrößen für Industrieroboter; Achsbezeichnungen. Berlin: Beuth

WALTHER 1985

Walther, J.: Montage großvolumiger Produkte mit Industrierobotern. Diss. Universität Stuttgart Berlin: Springer 1985. (IPA-IAO Forschung und Praxis 88).

WARNECKE & SCHRAFT 1984

Warnecke, H.-J.; Schraft, R. D.: Handbuch Handhabungs-, Montage- und Industrierobotertechnik. Landsberg am Lech: Moderne Industrie 1984.

WEBSTER 1999

Webster, J. G. (Hrsg.): The measurement, instrumentation, and sensors handbook [electronic resource]. 1. Aufl. Boca Raton, Fla.: CRC Press published in cooperation with IEEE Press 1999.

WESTKÄMPER 2001

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

WESTKÄMPER et al. 2000

Westkämper, E.; Zahn, E.; Balve, P.; Tilebein, M.: Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen. wt Werkstattstechnik online 90 (2000) 1/2, S. 22-26.

WINKLER 2006

Winkler, A.: Beitrag zur kraftbasierten Mensch-Roboter-Interaktion. Diss. TU Chemnitz (2006). 2006.

WÖHE 1984

Wöhe, G.: Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. München: Vahlen 1984.

WOLLNACK 2001

Wollnack, J.: Videometrische Verfahren zur Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern. Aachen: Shaker 2001.

WOLLNACK et al. 2001

Wollnack, J.; Rall, K.; Quellmalz, W.: Flexibilisierte, automatische Großbauteilmontage. Werkstattstechnik 91 (2001) 12, S. 785-791.

YOON et al. 2006

Yoon, Y.; Park, J.; Kak, A. C.: A Heterogeneous Distributed Visual Servoing System for Real-time Robotic Assembly Applications. Proceedings of the Int. Conference on Robotics and Automation.

ZÄH et al. 2005

Zäh, M. F.; Mueller, N.; Rimpau, C.: A Holistic Framework for Enhancing the Changeability of Production Systems. In: Zaeh, M. F. et al. (Hrsg.): 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005); München 22.-23. September 2005. München: Utz 2005, S. 77-84.

ZÄH et al. 2006a

Zäh, M. F.; Werner, J.; Lange, F.: System zur vollautomatisierten förderbandsynchronen Montage. wt Werkstatttechnik online 96 (2006a) 9, S. 592-596.

ZÄH et al. 2006b

Zäh, M. F.; Werner, J.; Prasch, M.: Changeable Means of Production. In: Westkämper, E. (Hrsg.): First CIRP Seminar International Seminar on Assembly Systems - ISAS; Stuttgart 15.-17. 11. 2006b, S. 33-38.

ZÄH et al. 2003

Zäh, M. F.; Ulrich, C.; Wagner, W.; Wilke, M.: Reaktionsszenario Minifabrik. wt werkstattstechnik online 93 (2003) 9, S. 646-650.

ZELLER 1995

Zeller, F.-J.: Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (1995). München: Carl Hanser 1995. (Fertigungstechnik - Erlangen 51).

12 Anhang

Prüfbericht: Messungen Elektrohängebahn

Datum: 04.12.06

Ort: Versuchshalle *iwb* Anwenderzentrum Augsburg, Augsburg

Messung: Bahngenaugigkeiten Elektrohängebahn

Messgerät: statische Beschleunigungssensoren „ENDEVCO Microtron 7018-20“ (200mV/g), Digital-Speicheroszilloskop „ScopeCorder 7018-20“ Samplingrate: 20kS/s

Kommentar: Die aufgezeichneten Beschleunigungsverläufe wurden durch Bandpass (Eckfrequenzen 0,2Hz u. 30Hz) gefiltert. Kalkulation mit Matlab 2006b, Achsbezeichnung: x-Förderrichtung, y-seitlich, z-Höhe, Die Berechnung haben immer die aktuellen Soll-Werte zur Basis (Soll-Beschleunigung=0 mm/s² (Konstantfahrt), Soll-Geschwindigkeit in x=600 mm/s, Sollgeschwindigkeit in y, z=0 mm/s, Soll-Position=0 mm)

Prüfläufe: 10 Prüfläufe mit einer jeweiligen Messlänge von 3 m

Tabelle 12-1: Ergebnisse der Tests an der Elektrohängebahn

Prüflauf Nr.	a_{\max} (mm/s ²)			Δv_{\max} (mm/s)			Δs_{\max} (mm)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1	+65,2	+79	+78,9	+5,6	+6,8	+4,8	+0,82	+2,3	1,02
	-67,2	-88,2	-87,8	-5,4	-8,0	-5,9	-1,03	-1,7	-0,69
2.	+59,8	+97,9	+88,4	+5,1	+6,2	+4,1	+1,24	+2,23	+0,93
	-70,8	-100	-93,5	-5,1	-8,6	-5,2	-1,67	-1,71	-0,88
3	+64,7	+95,1	+89,3	+6,1	+8,3	+3,9	+0,97	+1,7	+0,84
	-64,3	-96,2	-96,1	-4,7	-8,4	-5,7	-0,96	-1,75	-0,74
4	+61,8	+88,2	+83,6	+6,1	+6,9	+3,5	+0,97	+1,44	+0,65
	-65,5	-100	-93,2	-4,7	-7,8	-4,9	-0,95	-1,62	-0,62

Prüf- lauf Nr.	a_{\max} (mm/s ²)			Δv_{\max} (mm/s)			Δs_{\max} (mm)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
5	+60,7	+94,3	+86,7	+4,8	+6,5	+3,9	+0,92	+2,27	+0,28
	-64,2	-89,1	-103	-5,3	-9,3	-4,4	-0,97	-2,35	-0,83
6	+73,3	+91,9	+104	+6,36	+5,58	+4,07	+0,79	+1,61	+0,85
	-70,7	-97,1	-97,8	-5,54	-6,21	-6,78	-0,85	-1,34	-1,18
7	+92,8	+78,1	+86,5	+8,64	+7,08	+4,32	+1,2	+1,64	+1,05
	-95,8	-67,2	-95,5	-8,21	-5,9	-3,67	-1,25	-1,71	-1,16
8	+90,9	+74,4	+81,9	+7,75	+6,88	+5,01	+1,03	+1,56	+1,48
	-91,0	-87,6	-84,8	-6,99	-6,1	-4,46	-0,95	-2,26	-1,34
9	+93,0	+66,5	+83,9	+8,55	+6,22	+4,1	+0,89	+1,15	+1,08
	-97,3	-85,8	-94,9	-7,4	-5,86	-4,15	-1,19	-1,61	-1,27
10	+108	+80,8	+97,9	+8,57	+6,06	+5,14	+1,15	+1,15	+1,26
	-107	-67,8	-91,9	-8,1	-5,95	-4,54	-1,34	-1,61	-1,3

Prüfbericht: Messungen Plattenbandförderer

Datum: 29.08.07

Ort: BMW AG, Werk 1, München

Messung: Positionsabweichung Plattenband

Messgerät: statische Beschleunigungssensoren „ENDEVCO Microtron 7018-20“ (200mV/g), Digital-Speicheroszilloskop „ScopeCorder 7018-20“ Samplingrate: 20kS/s

Kommentar: Das Messgerät wurde für die Prüfläufe 1-3 an der Crashbox des Fahrzeuges befestigt, für Prüflauf 4 auf dem Plattenband. Die aufgezeichneten Beschleunigungsverläufe wurden durch Bandpass (Eckfrequenzen 0,2Hz u. 30Hz) gefiltert, um Offset und Rauschen zu unterdrücken. Kalkulation mit Matlab 2006b, Achsbezeichnung: x-Förderrichtung, y-seitlich, z-Höhe. Die Berechnung haben immer die aktuellen Soll-Werte zur Basis (Soll-Beschleunigung=0 mm/s² (Konstantfahrt), Soll-Geschwindigkeit in x=600mm/s, Sollgeschwindigkeit in y,z=0 mm/s, Soll-Position=0 mm)

- Prüfläufe: - 2 Prüfläufe mit je 3 m Messstrecke und Sensor an Crashbox während der Montage der Türscharniere
 - 2 Prüfläufe mit je 2 m Messstrecke und Sensor an Crashbox ohne stattfindende Montage
 - 3 Prüfläufe mit je 3 m Messstrecke und Sensor an Crashbox während der Montage der Rückbank
 - 3 Prüfläufe mit je 3 m Messlänge und Sensor auf Plattenband während Montage der Rückbank

Tabelle 12-2: Ergebnisse der Tests am Plattenband

Prüflauf Nr.	a_{\max} (mm/s ²)			Δv_{\max} (mm/s)			Δs_{\max} (mm)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1.	+129 -113	+321 -293	+366 -310	+4,2 -4,3	+5,3 -11,5	+8,0 -9,1	+ 1,22 -1,17	+1,27 -1,29	+0,79 -0,71
2	+124 -100	+339 -355	+443 -415	+4,4 -4,5	+10,8 -11,8	+13,4 -10,3	+1,08 -0,92	+1,57 -1,05	+1,54 -0,78
3	+119 -89	+324 -400	+546 -410	+4,2 -3,9	+8,8 -8,3	+8,2 -11,1	+0,86 -1,18	+1,70 -1,53	+1,00 -0,90
4	+121 -91	+195 -256	+220 -216	+5,1 -5,1	+7,5 -7,7	+5,7 6,0	+1,26 -0,93	+0,89 -0,82	+0,81 -0,47
5	+269 -401	+1297 -1220	+1008 -1179	+8,5 -7,3	+12,3 -17,3	+23,9 -19,9	+1,69 -1,56	+2,0 -1,69	+1,01 -1,07
6	+590 -811	+1285 -1071	+1604 -1799	+9,3 -12,1	+16,1 -10,9	+29,4 -31,4	+1,00 -1,27	+1,56 -1,77	+1,82 -1,22
7	+629 -654	+3162 -2931	+2506 -1797	+10,3 -11,9	+9,8 -21,6	-36,9 -35,3	+1,12 -1,60	+1,04 -1,34	+1,24 -1,30
8	+86 -86	+286 -384	+362 -470	+3,7 -4,2	+13,6 -8,5	+6,1 -8,9	+0,99 -1,50	+1,36 -0,69	+0,92 -1,06
9	+241 -244	+520 -449	+758 -991	+4,5 -4,1	+12,9 -11,7	+13,2 -20,6	+0,79 -0,57	+1,08 -0,68	+2,89 -2,25
10	+328 -231	+455 -343	+878 -1684	+3,8 -3,3	+10,7 -11,2	+23,1 -31,2	+0,88 -0,98	+0,85 -0,69	+7,35 -4,87

Prüfbericht: Messungen Roboterdynamik

Datum: 20.03.08

Ort: Versuchshalle *iwb* Anwenderzentrum Augsburg, Augsburg

Messung: Leistungskenngrößen KUKA KR 180 Serie 2000

Messgerät: statische Beschleunigungssensoren „ENDEVCO Microtron 7018-20“ (200mV/g), Digital-Speicheroszilloskop „ScopeCorder 7018-20“ Samplingrate: 20kS/s

Kommentar: Messung in Anlehnung an DIN EN ISO 9283:1998

Der Roboter wurde mit 180 kg Nennlast belastet.

Das Messgerät wurde für die Prüfläufe am Endeffektor des Prüfgewichtes befestigt.

Der virtuelle Sensor wurde über RSI eingebunden. Während des Abfahrens der geteachten Bahn wurden die Ist-Achswerte im IPO-Takt aufgezeichnet. Diese Werte wurden der Steuerung über den simulierten Sensor als Bahn übergeben.

Kalkulation mit Matlab 2006b

Prüfläufe: Prüfbahn nach DIN EN ISO 9283:1998 (200x200 mm), jeder Prüflauf beinhaltet das Abfahren der Prüfbahn in den Ebenen xy, yz und xz des Roboterweltkoordinatensystems.

- 10 Prüfläufe mit geteachter Bahn
- 10 Prüfläufe mit sensorgesteuerter Bahn

Tabelle 12-3: Beschleunigungen bei geteachter Bahn

Prüflauf Nr.	a_{\max} (mm/s ²)			a_{\max} (mm/s) im Bereich P ₂₆ -P ₃₃		
	x	y	z	x	y	z
1	+5051	+4782	+3695	+465	+623	+521
	-5002	-5646	-2930	-519	-358	-508
2	+4986	+4755	+3650	+492	+620	+495
	-5005	-5740	-2988	-527	-343	-498

Prüf- lauf Nr.	a_{\max} (mm/s ²)			a_{\max} (mm/s) im Bereich P ₂₆ -P ₃₃		
	x	y	z	x	y	z
3	+4999 -5060	+4767 -5713	+3679 -2950	+473 -526	+612 -340	+500 -498
4	+5025 -5017	+4733 -5736	+3677 -2954	+455 -521	+610 -346	+500 -501
5	+4997 -5062	+4816 -5734	+3672 -2949	+479 -534	+610 -353	+490 -499
6	+5015 -5057	+4752 -5716	+3656 -2929	+478 -507	+593 -357	+484 -518
7	+5007 -5001	+4785- 5731	+3693 -2943	+482 -545	+618 -362	+519 -469
8	+4996 -5073	+4720 -5690	+3641 -2961	+446 -521	+608 -345	+487 -507
9	+5017 -5055	+4716 -5748	+3665 -2905	+435 -526	+612 -341	+513 -503
10	+4987 -5084	+4775 -5671	+3624 -2955	+450 -567	+620 -342	+486 -519

Tabelle 12-4: Beschleunigungen bei sensorgeführter Bahn

Prüflauf Nr.	a_{\max} (mm/s ²)			a_{\max} (mm/s) im Bereich P26-P33		
	x	y	z	x	y	z
1	+2889 -3225	+3711 -3191	+2226 -1518	+256 -295	+264 -195	+295 -400
2	+2925 -3235	+3799 -3173	+2235 -1520	+284 -312	+264 -203	+294 -394
3	+2914 -3199	+3723 -3204	+2248 -1517	+272 -283	+252 -201	+296 -390
4	+2874 -3264	+3712 -3209	+2194 -1546	+267 -333	+264 -187	+271 -427
5	+2864 -3218	+3736 -3173	+2202 -1539	+230 -324	+261 -197	+262 -406

Prüflauf Nr.	a_{\max} (mm/s ²)			a_{\max} (mm/s) im Bereich P26-P33		
	x	y	z	x	y	z
6	+2863 -3243	+3729 -3201	+2153 -1528	+233 -338	+266 -176	+265 -414
7	+2844 -3259	+3727 -3177	+2196 -1528	+228 -347	+270 -193	+258 -425
8	+2880 -3224	+3750 -3203	+3750 -1536	+254 -336	+262 -176	+249 -423
9	+2892 -3281	+3789 -3191	+2189 -1532	+258 -345	+266 -189	+249 -431
10	+2106 -2847	+3029 -2633	+1611 -1890	+259 -351	+283 -197	+286 -426

Prüfbericht: Messungen Positions-Bahn-Genauigkeit

Datum: 20.03.08

Ort: Versuchshalle *iwb* Anwenderzentrum Augsburg, Augsburg

Messung: Positions-Bahn-Genauigkeit KUKA KR 180 Serie 2000, Vergleich der geteachten Ist-Bahn mit der sensorgeführten Ist-Bahn

Messgerät: Roboterinterne Lagemesssysteme

Kommentar: Der Roboter wurde mit 180 kg Nennlast belastet. Der virtuelle Sensor wurde über RSI eingebunden. Aufzeichnung der Ist-Achswerte der geteachten Bahn im IPO-Takt. Diese Werte wurden der Steuerung über den simulierten Sensor als Bahn übergeben. Auswertung erfolgt durch Bestimmung der Punkte kleinsten Abstandes zwischen den Bahnen. Kalkulation mit Matlab 2006b

Prüfläufe: Prüfbahn nach DIN EN ISO 9283:1998 (200x200 mm)
- 5 Prüfläufe; jeder Prüflauf beinhaltet das Abfahren der Prüfbahn in den Ebenen xy, yz und xz des Roboterweltkoordinatensystems.

Tabelle 12-5: Positions-Bahn-Genauigkeit und Zeitdifferenzen

Prüflauf Nr.	mittl. Positions-Bahn-Differenz in mm	max. Positions-Bahn-Differenz in mm	mittl. Zeitdifferenz in s	min. Zeitdifferenz in s	max. Zeitdifferenz in s
1 xy	0,3875	4,7213	-0,1488	-0,072	-0,228
1 yz	0,3932	4,9015	-0,1488	-0,072	-0,228
1 xz	0,3883	4,9211	-0,1507	-0,072	-0,24
2 xy	0,3879	4,73	-0,1487	-0,072	-0,228
2 yz	0,3928	4,8936	-0,1489	-0,072	-0,228
2 xz	0,3883	4,9078	-0,1504	-0,072	-0,24
3 xy	0,3882	4,7271	-0,1489	-0,072	-0,228
3 yz	0,3929	4,8946	-0,1487	-0,072	-0,228
3 xz	0,3876	4,9107	-0,1504	-0,072	-0,24
4 xy	0,388	4,7291	-0,1487	-0,072	-0,228
4 yz	0,3929	4,8925	-0,1487	-0,072	-0,228
4 xz	0,3881	4,9145	-0,1503	-0,072	-0,24
5 xy	0,3879	4,7139	-0,1486	-0,072	-0,228
5 yz	0,393	4,8968	-0,1487	-0,072	-0,228
5 xz	0,3875	4,9122	-0,1504	-0,072	-0,24

Prüfbericht: Messungen Verfolgegenauigkeit bei Grobpositionierung

Datum: 23.04.08

Ort: Versuchshalle iwv Anwenderzentrum Augsburg, Augsburg

Messung: Verfolgegenauigkeit bei Grobpositionierung

Messgerät: 6 potentiometrische Weggeber „Burster 8712“, Digital-Speicher-
oszilloskop „ScopeCorder 7018-20“ Samplingrate: 20 Hz

Kommentar: Kalkulation mit Matlab 2006, Achsbezeichnungen (X – Förderrich-
tung, Y – Montagerichtung (quer zur Förderrichtung), Z – Höhe)

Prüfläufe: Synchronisation in Förderrichtung über 1 m Fahrweg
- 5 Prüfläufe mit geteachter Bahn

Tabelle 12-6: VG_P und VG_a , VG_b , VG_c bei Grobpositionierung mit Conveyor-
Tracking

Prüflauf Nr.	VG_P (mm)	VG_a (°)	VG_b (°)	VG_c (°)
1	1,28	-0,74	0,28	0,48
2	2,45	-0,8	0,33	0,52
3	3,91	-0,72	0,26	0,57
4	2,67	-0,8	0,31	0,57
5	3,96	-0,81	0,33	0,56
6	2,74	0,62	0,25	0,46

Prüfbericht: Messungen Verfolgegenauigkeit bei Annähe- rungsphase

Datum: 08.05.08

Ort: Versuchhalle iwb Anwenderzentrum Augsburg, Augsburg

Messung: Verfolgegenauigkeit bei Annäherung

Messgerät: 6 potentiometrische Weggeber „Burster 8712“, Digital-Speicher-
oszilloskop „ScopeCorder 7018-20“ Samplingrate: 20 Hz

Kommentar: Kalkulation mit Matlab 2006, Achsbezeichnungen (X – Förderrich-
tung, Y – Montagerichtung (quer zur Förderrichtung), Z – Höhe)

Prüfläufe: Synchronisation in Förderrichtung über 1 m Fahrweg
 - 10 Prüfläufe mit sensorkorrigierter Bahn

Tabelle 12-7: VG_P und VG_a , VG_b , VG_c bei Annäherungsphase

Prüflauf Nr.	VG_P (mm)	VG_a (°)	VG_b (°)	VG_c (°)
1	1,91	0,58	0,28	0,37
2	1,75	0,67	0,28	0,46
3	2,27	0,72	0,26	0,47
4	2,64	0,63	0,33	0,41
5	2,72	0,92	0,29	0,48
6	2,67	0,79	0,29	0,53
7	1,69	0,57	0,21	0,41
8	1,92	0,67	0,28	0,42
9	2,31	0,9	0,38	0,44
10	2,98	0,63	0,26	0,54

Wirtschaftliche Bewertung

Tabelle 12-8: Kostenarten und Kostenwerte für Realisierungsalternativen (in T€)

Periode	0	1	2	3	4	5	6
Manuelle Montage							
Personal		324,00	333,72	343,73	354,04	364,66	375,60
Instandhaltung		4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Sachgemein		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Ersatzteil- erstaussstattung	16,04						
Invest	320,74						
Belastung Periode	336,78	329,00	338,72	348,73	359,04	369,66	380,60
Belastung kumuliert	336,78	665,78	1004,50	1353,23	1712,27	2081,94	2462,54
Kostenwert	336,78	610,94	846,17	1047,98	1221,13	1369,69	1497,15

Förderbandsynchrone Montage

Personal		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Instandhaltung		20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Sachgemein		3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Ersatzteil- erstaussstattung	39,03						
Invest	780,68						
Belastung Periode	819,71	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00
Belastung kumuliert	819,71	842,71	865,71	888,71	911,71	934,71	957,71
Kostenwert	819,71	838,88	854,85	868,16	879,25	888,50	896,20

Getaktete Montage

Personal		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Instandhaltung		20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Sachgemein		3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Ersatzteil- erstaussstattung	40,06						
Invest	801,22						
Belastung Periode	841,28	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00
Belastung kumuliert	841,28	864,28	887,28	910,28	933,28	956,28	979,28
Kostenwert	841,28	860,45	876,42	889,73	900,82	910,06	917,77

Tabelle 12-9: Kostenarten und Kapitalbarwerte für Realisierungsalternativen
(in T€)

Periode	0	1	2	3	4	5	6
Förderbandsynchrone Montage							
Invest	-780,68						
Ersatzteil- erstausrüstung	-39,03						
Personal		324,00	333,72	343,73	354,04	364,66	375,60
Instandhaltung		-20,00	-20,00	-20,00	-20,00	-20,00	-20,00
Sachgemein		-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00
	-819,71	301,00	310,72	320,73	331,04	341,66	352,60
Zahlungsreihe	-819,71	-518,71	-207,99	112,74	443,78	785,45	1138,05
Zahlungsreihe kumuliert	-819,71	-568,88	-353,10	-167,49	-7,85	129,46	247,55
Kapitalwert	-780,68						

Zinssatz der Zahlungsreihe	20,0%
Interner Zinssatz	31,5%

i1	30,0%	C1	22,65
i2	40,0%	C2	-132,77

Getaktete Montage

Invest	-801,22						
Ersatzteil- erstausrüstung	-40,06						
Personal		324,00	333,72	343,73	354,04	364,66	375,60
Instandhaltung		-20,00	-20,00	-20,00	-20,00	-20,00	-20,00
Sachgemein		-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00
	-841,28	301,00	310,72	320,73	331,04	341,66	352,60
Zahlungsreihe	-841,28	-540,28	-229,56	91,17	422,22	763,88	1116,49
Zahlungsreihe kumuliert	-841,28	-590,45	-374,67	-189,06	-29,41	107,89	225,98
Kapitalwert	-801,22						

Zinssatz der Zahlungsreihe	20,0%
Interner Zinssatz	30,1%

i1	30,0%	C1	1,08
i2	40,0%	C2	-154,33

•

iwb Forschungsberichte Band 1–121

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

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

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

- 28 *Teich, K.*
Prozefkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 *Pfrang, W.*
Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 *Tauber, A.*
Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 *Jäger, A.*
Systematische Planung komplexer Produktionssysteme
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 *Hartberger, H.*
Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 *Tuzcek, H.*
Inspektion von Karosserieteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 *Fischbacher, J.*
Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 *Moser, O.*
3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54078-8
- 36 *Naber, H.*
Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 *Kupec, Th.*
Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 *Maulhardt, U.*
Dynamisches Verhalten von Kreissägen
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 *Götz, R.*
Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile
1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 *Koepfer, Th.*
3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung · ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 *Schmidt, M.*
Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 *Burger, C.*
Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 *Hoßmann, J.*
Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 *Petry, M.*
Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmabkastens für robotergeführte Klebprozesse
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 *Schönecker, W.*
Integrierte Diagnose in Produktionszellen
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 *Bick, W.*
Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 *Gebauer, L.*
Prozefuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 *Schräfer, N.*
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wisbacher, J.*
Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Garnich, F.*
Laserbearbeitung mit Robotern
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*
Digitale Zustandesregelung elektrischer Vorschubantriebe
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Glaas, W.*
Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 *Helm, H.J.*
Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 *Lang, Ch.*
Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 *Schuster, G.*
Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 *Bamm, H.*
Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 *Wendt, A.*
Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 *Hansmaier, H.*
Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 *Dilling, U.*
Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

- 60 *Strohmayr, R.*
**Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von
Zubringeinrichtungen**
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*
**Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer
Zellenrechnersoftware**
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56689-5
- 62 *Stetter, R.*
**Rechnergestützte Simulationwerkzeuge zur
Effizienzsteigerung des Industrierobereinsatzes**
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, A.*
Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*
**Simulation des Schwingungsverhaltens spanender
Werkzeugmaschinen**
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*
**Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-
Layoutoptimierung**
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummelsteiner, G.*
**3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur
Planung manueller Montagesysteme**
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelmann, F.*
**Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen
Automatisierung von Produktionssystemen**
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*
**Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-
Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik**
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*
Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*
**Automatische Inbetriebnahme
geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler**
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*
**Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von
Produktionssystemen**
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*
**Rechnergestütztes Projektinformations- und
Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld**
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*
**Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur
Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge**
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zetlmayer, H.*
**Verfahren zur simulationsgestützten
Produktionsregelung in der Einzel- und
Kleinserienproduktion**
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindl, M.*
Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*
**Das integrierte Betriebsmittelwesen · Baustein einer
flexiblen Fertigung**
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Rath, P.*
**Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in
der Arbeitsvorbereitung**
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*
**Strömungstechnische Optimierung von
Produktionssystemen durch Simulation**
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zäh, M. F.*
Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanger, N.*
**Technologisches Prozeßmodell für die
Kugelschleifbearbeitung**
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanow, P.*
**Konstruktionsbegleitende Kalkulation von
Werkzeugmaschinen**
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*
**Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen
Fertigungszellen**
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*
**Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der
Harthbearbeitung**
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*
**Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in
flexiblen Produktionssystemen**
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*
**Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung
und logistisches Störungsmanagement**
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*
**Systematische Planung anwendungsspezifischer
Materialflußsteuerungen**
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rackland, M.*
**Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in
Montageanlagen**
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Linner, St.*
Konzept einer integrierten Produktentwicklung
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*
**Integrierte Planung von Informationssystemen für
rechnergestützte Produktionssysteme**
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deutsche, U.*
**Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung
in mittelständischen Unternehmen**
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieterle, A.*
Recyclingintegrierte Produktentwicklung
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

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

Seminarberichte iwb

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

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

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

- 47 **Virtuelle Produktion · Prozeß- und Produktsimulation**
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 **Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen**
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
- 49 **Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung**
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50 **Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion**
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 **Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle**
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien**
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53 **Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung**
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 54 **Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation**
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 55 **e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele**
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0
- 56 **Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug**
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9
- 57 **Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen**
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
- 58 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien**
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
- 59 **Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik**
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
- 60 **Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln**
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 62 **Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien**
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63 **Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge**
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1
- 64 **Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial**
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
- 65 **Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen**
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
- 66 **Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder**
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
- 67 **Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder**
148 Seiten · ISBN 3-89675-067-4
- 68 **Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik**
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
- 69 **Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette**
134 Seiten · ISBN 3-89675-069-0
- 70 **Mechatronik · Strukturndynamik von Werkzeugmaschinen**
161 Seiten · ISBN 3-89675-070-4
- 71 **Klebtechnik · Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten**
ISBN 3-89675-071-2 · vergriffen
- 72 **Fabrikplanung 2004 · Erfolgsfaktor im Wettbewerb · Erfahrungen – Werkzeuge – Visionen**
ISBN 3-89675-072-0 · vergriffen
- 73 **Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion · Erwartungen – Erfahrungen – Entwicklungen**
179 Seiten · ISBN 3-89675-073-9
- 74 **Virtuelle Produktionssystemplanung · Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik**
133 Seiten · ISBN 3-89675-074-7
- 75 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 76 **Berührungslose Handhabung · Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapselfur zu aseptischen Ampulle**
95 Seiten · ISBN 3-89675-076-3
- 77 **ERP-Systeme · Einführung in die betriebliche Praxis · Erfahrungen, Best Practices, Visionen**
153 Seiten · ISBN 3-89675-077-7
- 78 **Mechatronik · Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen**
155 Seiten · ISBN 3-89675-078-X
- 79 **Produktionsmanagement**
267 Seiten · ISBN 3-89675-079-8
- 80 **Rapid Manufacturing · Fertigungsverfahren für alle Ansprüche**
154 Seiten · ISBN 3-89675-080-1
- 81 **Rapid Manufacturing · Heutige Trends – Zukünftige Anwendungsfelder**
172 Seiten · ISBN 3-89675-081-X
- 82 **Produktionsmanagement · Herausforderung Variantenmanagement**
100 Seiten · ISBN 3-89675-082-8
- 83 **Mechatronik · Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen**
160 Seiten · ISBN 3-89675-083-6
- 84 **Virtuelle Inbetriebnahme · Von der Kür zur Pflicht?**
104 Seiten · ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 **3D-Erfahrungsforum · Innovation im Werkzeug- und Formenbau**
375 Seiten · ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 **Rapid Manufacturing · Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung**
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 **Produktionsmanagement · Schlank im Mittelstand**
102 Seiten · ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 **Mechatronik · Vorsprung durch Simulation**
134 Seiten · ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 **RFID in der Produktion · Wertschöpfung effizient gestalten**
122 Seiten · ISBN 978-3-89675-089-1

Forschungsberichte iwb

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

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

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

- 136 Brandner, Stefan
Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6
- 137 Hirschberg, Arnd G.
Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6
- 138 Reek, Alexandra
Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen
2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X
- 139 Sabbah, Khalid-Alexander
Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3
- 140 Schliffenbacher, Klaus U.
Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7
- 141 Sprengel, Andreas
Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1
- 142 Gallasch, Andreas
Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4
- 143 Cuiper, Ralf
Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0
- 144 Schneider, Christian
Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion
2000 · 180 Seiten · 66 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-789-X
- 145 Jonas, Christian
Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen
2000 · 183 Seiten · 82 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-870-5
- 146 Willnecker, Ulrich
Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen
2001 · 175 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-891-8
- 147 Lehner, Christof
Beschreibung des Nd:Yag-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss
2001 · 205 Seiten · 94 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0004-X
- 148 Rick, Frank
Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen
2001 · 145 Seiten · 57 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0008-2
- 149 Höhn, Michael
Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
2001 · 171 Seiten · 74 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0012-0
- 150 Böhl, Jörn
Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
2001 · 179 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0020-1
- 151 Bürgel, Robert
Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
2001 · 185 Seiten · 60 Abb. · 10 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0021-X
- 152 Stephan Dürrschmidt
Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
2001 · 914 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0023-6
- 153 Bernhard Eich
Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung
2001 · 132 Seiten · 48 Abb. · 6 Tabellen · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0028-7

- 154 Wolfgang Rudorfer
Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
 2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier
Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe
 2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak
Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
 2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner
Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
 2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz
Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
 2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald
Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
 2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner
Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
 2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller
Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
 2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer
Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
 2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fahrer
Ganzeitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses
 2002 · 176 Seiten · 69 Abb. · 13 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0124-0
- 164 Jürgen Höppner
Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler
 2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte
Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik
 2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin Weißberger
Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess
 2002 · 210 Seiten · 86 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0138-0
- 167 Dirk Jacob
Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik
 2002 · 200 Seiten · 82 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0142-9
- 168 Ulrich Roßgoderer
System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen
 2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel
Anziehverfahren für hochfeste Schraubverbindungen auf Basis akustischer Emissionen
 2002 · 164 Seiten · 89 Abb. · 27 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0174-7
- 170 Paul Jens Peter Ross
Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung
 2002 · 144 Seiten · 38 Abb. · 38 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0191-7
- 171 Stefan von Praun
Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess
 2002 · 250 Seiten · 62 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0202-6

- 172 Florian von der Hagen
Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen
 2002 · 220 Seiten · 104 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0208-5
- 173 Oliver Kramer
Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe
 2002 · 212 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0211-5
- 174 Winfried Dohmen
Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme
 2002 · 200 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0214-X
- 175 Oliver Anton
Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsenster Montagesysteme
 2002 · 158 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0215-8
- 176 Welf Broser
Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke
 2002 · 224 Seiten · 122 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0217-4
- 177 Frank Breitingner
Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen
 2003 · 156 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0227-1
- 178 Johann von Pieverling
Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling
 2003 · 163 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0230-1
- 179 Thomas Baudisch
Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine
 2003 · 190 Seiten · 67 Abb. · 8 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0249-2
- 180 Heinrich Schieferstein
Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems
 2003 · 132 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0251-4
- 181 Joachim Berlak
Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen
 2003 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0258-1
- 182 Christian Meierlohr
Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung
 2003 · 181 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0292-1
- 183 Volker Weber
Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken
 2004 · 210 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0330-8
- 184 Thomas Bongardt
Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern
 2004 · 170 Seiten · 40 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0332-4
- 185 Tim Angerer
Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten
 2004 · 180 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0336-7
- 186 Alexander Krüger
Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme
 2004 · 197 Seiten · 83 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0371-5
- 187 Matthias Meindl
Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing
 2005 · 222 Seiten · 97 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0465-7
- 188 Thomas Fusch
Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie
 2005 · 190 Seiten · 99 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0467-3

- 189 Thomas Mosandl
Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme
2005 · 182 Seiten · 58 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0471-1
- 190 Christian Patron
Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung
2005 · 150 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0474-6
- 191 Robert Cisek
Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen
2005 · 200 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0475-4
- 192 Florian Auer
Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen
2005 · 160 Seiten · 65 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0485-1
- 193 Carsten Selke
Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung
2005 · 137 Seiten · 53 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0495-9
- 194 Markus Seefried
Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern
2005 · 216 Seiten · 82 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0503-3
- 195 Wolfgang Wagner
Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion
2006 · 208 Seiten · 43 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0586-6
- 196 Christopher Ulrich
Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen
2006 · 178 Seiten · 74 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0590-4
- 197 Johann Härtl
Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern
2006 · 140 Seiten · 55 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0611-0
- 198 Bernd Hartmann
Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge
2006 · 208 Seiten · 105 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0615-3
- 199 Michael Schilp
Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage
2006 · 130 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0631-5
- 200 Florian Manfred Grätz
Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme
2006 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0643-9
- 201 Dieter Eireiner
Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding
2006 · 214 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0650-1
- 202 Gerhard Volkwein
Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation
2007 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 Sven Roeren
Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse
2007 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 Henning Rudolf
Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie
2007 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 Stella Clarke-Griebsch
Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia
2007 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 Michael Ehrenstraßer
Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage
2008 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0743-3

- 207 Rainer Schack
Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik
 2008 · 248 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 Wolfgang Sudhoff
Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion
 2008 · 276 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 Stefan Müller
Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen
 2008 · 240 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 Ulrich Kohler
Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme
 2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 Klaus Schlickerrieder
Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile
 2008 · 204 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 Niklas Möller
Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme
 2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 Daniel Siedl
Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfabrbewegungen
 2008 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 Dirk Ansorge
Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen
 2008 · 146 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 Georg Wünsch
Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme
 2008 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 Thomas Oertli
Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben
 2008 · 194 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 Bernd Petzold
Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsenste Mikromontage
 2008 · 234 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 Loucas Papadakis
Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains
 2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 Mathias Mörtl
Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung
 2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 Sebastian Weig
Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten
 2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 Tobias Hornfeck
Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie
 2008 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 Hans Egermeier
Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen
 2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 Matthäus Sigl
Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns
 2008 · 185 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0841-6

- 224 Mark Harfensteller
Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets
2009 · 196 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0849-8
- 225 Jochen Werner
Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie
2009 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 Florian Hagemann
Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen
2009 · 226 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0861-4
- 227 Haitham Rashidy
Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry
2009 · 212 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0862-1

