

***Entwicklung eines Planungs- und Optimierungssystems für den Einsatz
sensitiver Roboter in der flexiblen Montage***

- Robot Farming -

**Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg zur Erlangung
des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur

Volker Zipter

**geboren am 23.02.1984
in Frankfurt (Oder), Deutschland**

Vorsitzende:	apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. paed. Annette Hoppe
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Ulrich Berger
Gutachter:	Prof. Dr. sc. techn. Ulrich Schmucker
Tag der mündlichen Prüfung:	20.09.2013

Berichte aus dem Lehrstuhl Automatisierungstechnik
BTU Cottbus-Senftenberg
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Berger

Volker Zipter

Entwicklung eines Planungs- und Optimierungssystems für den Einsatz sensibler Roboter in der flexiblen Montage - Robot Farming -

Shaker Verlag
Aachen 2014

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.

Zugl.: Cottbus-Senftenberg, BTU, Diss., 2013

Copyright Shaker Verlag 2014

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2526-2

ISSN 1864-5789

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die Automatisierungstechnik bildet eine Schlüsseltechnologie für die Steigerung der Produktinnovation und die Verbesserung von Wertschöpfungsprozessen. Als Konsequenz einer globalen Wirtschaftsstruktur müssen alle Unternehmensbereiche wie Entwicklung, Produktion und Güterverkehr in einen übergreifenden Kontext gestellt und behandelt werden. Dabei steht die informationstechnische Verknüpfung verbundener Unternehmen und Unternehmensbereiche bei stetig veränderlichen Aufgabenstellungen und Randbedingungen eine besondere Herausforderung dar. Die Automatisierung des betrieblichen und betriebsübergreifenden Informationsflusses sowie die Einbindung des Menschen in allen Phasen des Entwicklungs- und Leistungsprozesses bildet daher die vordringliche Aufgabenstellung für Forschung und Entwicklung. Durch den zielgerichteten, systematischen Einsatz und die ständig aktualisierte Beurteilung und Bewertung automatisierungstechnischer Lösungen wird die schnelle Umsetzung und Einführung hochwertiger und zukunftsweisender Innovationen gesichert.

Ziel der Forschungsarbeiten am Lehrstuhl Automatisierungstechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus–Senftenberg (BTU) ist die kontinuierliche Verbesserung der automatisierungstechnischen Methoden und Verfahren im Hinblick auf fortgeschrittene Produktionsstrukturen. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Entwicklung integrierter Fertigungs- und Montagesysteme unter Einsatz neuartiger Steuerungstechnik. Dazu werden leistungsfähige Entwurfswerkzeuge der Digitalen Fabrik erprobt und weiterentwickelt. Durch die Bereitstellung modernster Laborausstattung und die Zusammenarbeit mit industriellen und institutionellen Technologieführern wird der Stand der Technik in Wissenschaft und Forschung aktualisiert abgebildet. Nationale und internationale Forschungsarbeiten zu ganzheitlichen Automatisierungskonzepten, den Industrial Life Cycle Automation, runden das Aufgaben- und Leistungsspektrum des Lehrstuhls ab.

Die in dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen aus den Forschungsarbeiten des Lehrstuhls Automatisierungstechnik der BTU Cottbus–Senftenberg. In diesen Bänden werden neue Resultate und Erkenntnisse aus Forschung und Entwicklung veröffentlicht. Die Berichte aus dem Lehrstuhl Automatisierungstechnik sollen Forschung, Entwicklung und Anwendung zu automatisierungstechnischen Fragestellungen enger verknüpfen und daraus Potential für zukünftige Innovationen erzeugen.

Ulrich Berger

Kurzfassung

In der Automobilindustrie rücken Montagesysteme aufgrund des hohen Anteils an der Gesamtfertigungszeit und an den anfallenden Kosten in den Fokus. Dabei müssen die Systeme, neben dem steigenden Produkt- und Variantenspektrum, vor allem an die Volatilität in der Nachfrage anpassbar sein, um eine hohe Produktivität zu erreichen. Bestehende Montagesysteme sind jedoch nur für ein eingeschränktes Stückzahlenspektrum wirtschaftlich. Planung und Optimierung der Systeme sind dahin gehend ausgerichtet. In diesen Bereichen existieren Defizite, die die Motivation der vorliegenden Arbeit begründen. Nachfolgend wird das Robot Farming vorgestellt, das ein Verfahren zum Betreiben der Systeme, die Planung und die Optimierung für den Einsatz sensibler Roboter in der flexiblen Montage beinhaltet. Das entwickelte Planungs- und Optimierungssystem (POS) berechnet die Ausbau- und Skalierungsstufen für Robot Farming, die lokale Optima der Produktivität für verschiedene Stückzahlenszenarien darstellen. Planung und Optimierung werden im Rahmen dieser Arbeit wie folgt dargelegt:

In den Kapiteln 1 und 2 wird das Ziel dieser Arbeit definiert und die Problemstellung analysiert. Dies erfolgt anhand einer Marktanalyse, die die Volatilität in der Nachfrage aufzeigt. Bestehende Montagesysteme und Lösungen zur Anpassung dieser Systeme, wie z.B. eine Modulstrategie, sind nicht ausreichend, um diese Herausforderung zu bewältigen. Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse wird in Kapitel 3 eine Anforderungsanalyse durchgeführt, welche die Basis zur Bewertung bestehender Lösungen aus dem Stand der Technik und der Forschung in Kapitel 4 darstellt.

In Kapitel 5 wird Robot Farming vorgestellt. Die Einbindung der Mitarbeiter in die Montagesysteme, die bidirektionale Skalierbarkeit, die Erstellung und Anpassung von Montageabläufen der sensiblen Roboter und die Planung der Ausbau- und Skalierungsstufen, die auf die optimale Auslastung der Mitarbeiter ausgerichtet ist, sind die Kernelemente dieses Konzeptes. Die Planung von Montagesystemen und einzelner Stationen wird dabei auf Robot Farming ausgerichtet.

Kapitel 6 umfasst Konzept und Systementwurf des POS. Die technische Realisierung des POS wird in Kapitel 7 beschrieben. Neben den grafischen Ein- und Ausgabeschnittstellen wird detailliert auf die notwendigen Schritte zur Berechnung der Ausbau- und Skalierungsstufen eingegangen. Nach der Analyse des vorliegenden Algorithmus werden Optimierungen integriert und die Leistungsfähigkeit des POS in Versuchsreihen ermittelt.

Anschließend werden in Kapitel 8, mithilfe eines Robot Farming Demonstrators in der Montage, die Ergebnisse des POS validiert. Anhand dieser Montagelinie werden die Ausbau- und Skalierungsstufen durch das POS berechnet. Der Abgleich mit einem Simulationsmodell dieser Stufen zeigt vergleichbare Ergebnisse, die auch durch empirisch ermittelte Daten des Demonstrators bestätigt werden.

Abstract

In the automotive industry assembly systems move into the spotlight due to the high proportion of the total production time and costs. The systems must be easily adaptable to the volatility in demand as well as to the growing range of products in order to achieve high productivity. Existing assembly systems are economical only for a limited range of quantities. Planning and optimization of the systems are aligned to that effect. Deficits in these areas are the motivation of this thesis. In the following, robot farming is presented, which contains, together with the method of operating the systems, planning and optimization for the use of sensitive robots in flexible assembly. The developed planning and optimization system (POS) determines expansion and scaling levels for Robot Farming, which represent a local optimum of productivity for different quantities. Planning and optimization are presented in this work as follows:

Chapters 1 and 2 describe the objectives and analyse the existing problem with a market analysis showing the volatility in demand. Existing assembly systems and solutions for the adaptation of these systems are not sufficient to meet the challenges of the market. Based on these results a requirement analysis is performed in chapter 3, which forms the basis for the evaluation of existing solutions of the state of research and technological development (see chapter 4).

Chapter 5 presents Robot Farming. The involvement of the employees in the assembly systems, the bidirectional scalability, the creation and adaptation of assembly processes of sensitive robots and the planning of the expansion and scaling levels are the key elements of this concept. The planning of assembly systems and single stations thereby focuses on Robot Farming.

Chapter 6 describes a concept and a system design for the POS. The technical implementation is described in Chapter 7. Besides the description of graphical input and output interfaces, the steps of calculating the expansion and scaling levels are discussed in detail. According to the analysis of this algorithm optimizations are identified and integrated. The performance of the POS is measured in series of tests.

After that the results of the POS are proofed with a Robot Farming demonstrator in an assembly line (see chapter 8). Based on this assembly line, the expansion and scaling levels are calculated with the POS. The comparison with a simulation model of these levels shows similar results, which are also confirmed by empirical data of the demonstrator.

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der Daimler AG in Stuttgart. Meinem Teamleiter Dipl.-Ing. Willi Klumpp möchte ich für die Unterstützung und anregenden Diskussionen während meiner Zeit als Doktorand danken. Darüber hinaus möchte ich mich beim gesamten Team für das kritische Hinterfragen meiner Lösungen und die enge Zusammenarbeit bedanken. Hervorheben möchte ich Herrn Dipl.-Ing (FH) Matthias Schreiber, der mich bei der Realisierung des Demonstrators unterstützt hat. Nur so konnten die Inhalte dieser Arbeit den praxisnahen Bezug erhalten.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Berger, Leiter des Lehrstuhls für Automatisierungstechnik an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg, danke ich herzlich für die wissenschaftlichen Freiräume, die Unterstützung während der gesamten Zeit und das Engagement zur Betreuung meiner Arbeit.

Herrn Prof. Dr. sc. techn. Ulrich Schmucker, Institut für Mobile Systeme (IMS) an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, danke ich für die Übernahme des Koreferats und die konstruktiven Anmerkungen zu meiner Dissertation.

Ferner danke ich Frau apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. paed. Annette Hoppe, Leiterin des Lehrstuhls für Arbeitswissenschaft / Arbeitspsychologie, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Meiner Familie und meinen Freunden möchte ich für die Unterstützung nicht nur während der letzten Jahre danken. Ein ganz besonderer Dank gebührt meiner Frau Livia. Sie hat mir stets Freiraum, aber auch den notwendigen Antrieb gegeben, um diese Arbeit zu erstellen.

Volker Zipter

Stuttgart, im Mai 2013

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen	X
Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole	XI
Verzeichnis der Abbildungen	XIII
Verzeichnis der Tabellen	XVI
1 Einleitung	1
1.1 Herausforderungen für die Automobilindustrie	2
1.2 Einordnung der Arbeit in die Entwicklungen der Montagetechnologien	4
1.3 Zielstellung der Arbeit	7
1.4 Struktur der Arbeit	7
2 Motivation und Problemstellung	9
2.1 Planung des wirtschaftlichen Stückzahlpektrums robotergestützter Montagesysteme	9
2.2 Anpassung des wirtschaftlichen Stückzahlpektrums verfügbarer Montagesysteme .	12
2.3 Wirtschaftliches Stückzahlpektrum von Montagesystemen mit flexiblem Automati- sierungsgrad	16
2.4 Zusammenfassung und Fazit	17
3 Anforderungsanalyse	19
3.1 Anforderungen an Montagesysteme mit flexiblem Automatisierungsgrad	19
3.2 Anforderungen an das Planungs- und Optimierungssystem	21
3.2.1 Anforderungen zur Planung des wirtschaftlichen Stückzahlpektrums kon- ventioneller Montagesysteme	21
3.2.2 Anforderungen durch flexiblen Automatisierungsgrad	23
3.2.3 Zusammenfassung und Auswertung	24
4 Stand der Technik und der Forschung	25
4.1 Robotergestützte Montagesysteme für die Automobilindustrie	25
4.2 Planung und Optimierung robotergestützter Montagesysteme	27
4.2.1 Forschungsansätze zur Planung	27
4.2.2 Forschungsansätze zur Optimierung	29
4.3 Zusammenfassende Bewertung und Ableitung des Entwicklungsbedarfes	33
5 Robot Farming Konzept	37
5.1 Definition und Begriffsbestimmung	37
5.2 Die Elemente des Robot Farming	38
5.3 Element 1: Einbindung der Mitarbeiter in die Montagesysteme	40
5.4 Element 2: Bidirektionale Skalierbarkeit über das gesamte Stückzahlpektrum	41

5.4.1	Flexibler Automatisierungsgrad im Robot Farming	41
5.4.2	Sensitive Roboter als Instrument für den flexiblen Automatisierungsgrad . .	44
5.5	Element 3: Erstellung und Anpassung von Montageabläufen sensitiver Roboter . . .	46
5.6	Element 4: Vorgehensweise zur Planung von Montagesystemen und -stationen . . .	48
5.6.1	Planung von Montagesystemen	48
5.6.2	Planung einzelner Montagestationen	50
5.7	Zusammenfassung des Konzeptes	52
6	Konzept und Systementwurf für das Planungs- und Optimierungssystem	54
6.1	Zielstellung und Systemgrenzen des POS	54
6.1.1	Definition der Zielstellung	54
6.1.2	Definition der Systemgrenzen	54
6.2	Konzept und Systementwurf für das POS	56
6.2.1	Konzept für das POS	56
6.2.2	Systementwurf des POS	59
6.2.3	Vorgehensweise zur Entwicklung des POS	60
6.3	Modellierung der Montagestationen und -systeme	62
6.3.1	Aufgabenverteilung zwischen Mitarbeitern und Robotern in manueller und automatisierter Betriebsart	62
6.3.2	Struktur des Modells	63
7	Technische Realisierung des Planungs- und Optimierungssystems	66
7.1	Eingabe der Daten für das POS	66
7.1.1	Grafische Schnittstelle zur Erstellung der Layouts	66
7.1.2	Eingabe der Parameter zur Beschreibung der Montagestationen	72
7.1.3	Zusätzliche Wege im Layout erstellen	73
7.1.4	Wege und Wegezeiten manuell bearbeiten	75
7.1.5	Eingabe der Parameter zur Berechnung der Ausbau- und Skalierungsstufen .	77
7.2	Verarbeitung der Eingabedaten und Optimierung	78
7.2.1	Übersicht der Berechnungsschritte	78
7.2.2	Berechnung der Routen durch das Montagesystem	81
7.2.3	Berechnung der Teilrouten durch das Montagesystem	85
7.2.4	Kombination der Teilrouten zur Erfüllung der Montageaufgaben	87
7.2.5	Berechnung der Robotervariationen	91
7.2.6	Berechnung der Ausbringung der Ausbau- und Skalierungsstufen	94
7.2.7	Filtern der optimalen Skalierungs- und Ausbaustufen	108
7.3	Ausgabe der optimalen Ausbau- und Skalierungsstufen	111
7.3.1	Grafische Schnittstelle zur Ausgabe der Daten	111
7.3.2	Auswahl der Ausbau- und Skalierungsstufen durch den Anwender	112
7.3.3	Export der ausgewählten Ausbau- und Skalierungsstufen	115

7.4	Analyse und Optimierung des Algorithmus	116
7.4.1	Optimierung: Kombination der Teilrouten zur Erfüllung der Montageaufgabe	116
7.4.2	Optimierung: Speicher allozieren	117
7.4.3	Optimierung: Parallelisierung der Berechnungen auf mehrere Prozesse . . .	118
7.5	Versuchsreihen zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit des POS	121
7.5.1	Versuchsplanung und Randbedingungen	121
7.5.2	Ergebnisse: Berechnungsdauer über die Anzahl von Montagestationen	123
7.5.3	Ergebnisse: Grenzwerte mit dem vorliegenden Algorithmus	125
7.5.4	Ergebnisse: Grenzwerte mit erhöhter Parallelisierung	126
7.5.5	Auswertung und Empfehlungen für den Anwender	127
8	Verifikation und Validierung des Planungs- und Optimierungssystems	129
8.1	Modell- und Aufgabenbeschreibung	129
8.1.1	Beschreibung von Montageaufgabe und -linie	129
8.1.2	Montagestation mit flexiblem Automatisierungsgrad	132
8.2	Berechnung der Ausbau- und Skalierungsstufen durch das POS	137
8.2.1	Modellierung der Montagelinie im POS	137
8.2.2	Ausgabe und Diskussion der optimalen Ausbau- und Skalierungsstufen . . .	138
8.3	Verifikation durch Simulation	140
8.3.1	Modellierung der Montagelinie in FlexSim	140
8.3.2	Untersuchungen am Simulationsmodell	142
8.3.3	Ergebnisse der Simulation und Auswertung	143
8.4	Validierung am Robot Farming Prototyp in der Serienmontage	144
8.4.1	Untersuchungen am Robot Farming Prototyp	144
8.4.2	Ergebnisse und Auswertung	146
9	Literatur	148

Verzeichnis der Abkürzungen

ACO	Ant Colony Optimization
AMF	Anforderungen an Montagesysteme mit flexiblem Automatisierungsgrad
APF	Anforderungen zur Planung durch flexiblen Automatisierungsgrad
APM	Anforderungen zur Planung konventioneller Montagesysteme
ASS	Ausbau- und Skalierungsstufen
CAR	Computer Aided Robotics
CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CKD	completely knocked down
DLR	Deutsches Institut für Luft- und Raumfahrt e. V.
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
GA	Genetische Algorithmen
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
GPS	Global Positioning System
HPV	hours per vehicle
IAA	Internationale Automobil-Ausstellung
IBN	Inbetriebnahme
Inf	Infinity / unendlich
MA	Mitarbeiter
MRK	Mensch - Roboter - Kooperation
MS	Montagesystem
MST	Minimum Spanning Tree Heuristik
MTBF	Mean Time between Failure
mTSP	multiple Travelling Salesmen Problem
MTTR	Mean Time to Repair
PCT	Parallel Computing Toolbox
PDF	Portable Document Format
POS	Planungs- und Optimierungssystem
SG	Systemgrenze
SOP	Start of Production
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SWS	Schnellwechselsystem
TCO	Total Cost of Ownership
TSP	Travelling Salesmen Problem
UML	Unified Modeling Language

Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole

anz	.....	Anzahl Montagestationen im Layout
baseKapa	.....	Kapazität der Mitarbeiter
breakp	.....	Matrix mit den Unterbrechungen der Gesamtrouten
buffer	.....	Füllstand der Materialbereitstellungen
conf	.....	temporäre Konfiguration des Planungssystems
config	.....	Konfiguration des Planungssystems
conn	.....	Startpunkt zur Erstellung eines Weges
DC	.....	Matrix mit direkten Verbindungen zwischen zwei Stationen
dist	.....	Matrix der aktuellen Wege im Layout
distUser	.....	Matrix manuell editierter Wege
e	.....	Zielpunkt eines Weges
failures	.....	aufsummierte Störungsdauer über alle Stationen
idxAuto	.....	Matrix mit den automatisierten Montagestationen
jobSize	.....	Losgröße
k	.....	Index des aktuellen Mitarbeiters in der Berechnung
kapa	.....	aktuelle Kapazität der Mitarbeiter
l	.....	Layout der Montagesysteme
maxM	.....	maximale Anzahl von Mitarbeitern
Mroutes	.....	Matrix der Routen für jeden Mitarbeiter
mu	.....	Mittelwert
multiples	.....	Matrix mit der Anzahl der Bereitstellungsvorgänge den Montagestationen
n-i	.....	Anzahl Mitarbeiter je Montagestation
n-Menschen-max	.....	maximale Anzahl von Mitarbeitern im Montagesystem
n-Roboter-i	.....	Anzahl Roboter je Montagestation
n-Roboter-max	..	maximale Anzahl von Robotern im Montagesystem
numR	.....	Anzahl von Robotern in einer Station
outputs	.....	Matrix mit der Ausbringung der Stationen
params	.....	Matrix mit den Parametern der Montagestationen
params	.....	Parameter zur Beschreibung der Montagestationen
partA	.....	Matrix mit den automatisierten Montagestationen auf der Route des Mitarbeiters
partM	.....	Matrix mit den manuellen Montagestationen auf der Route des Mitarbeiters
results	.....	Ergebnisse / Ausbau- und Skalierungsstufen
robotV	.....	Matrix mit den Robotervariationen
Rw	.....	Durchschnittliche Reichweite der Materialbereitstellungen
s	.....	Startpunkt eines Weges
sList	.....	Matrix mit der Anzahl der Bereitstellungsvorgänge und der Reihenfolge

sNames	Stationsnamen (Index)
std	Standardabweichung
t	Taktzeit / Zeit
t-A-manuell	Automatisierte Bereitstellungszeit
t-A-manuell	Automatisierte Montagezeit
t-B-manuell	Manuelle Bereitstellungszeit
t-M-manuell	Manuelle Montagezeit
t-proz	Prozesszeit
t-walk	Wegezeit
t-walk-min	Minimale Wegezeit
t0	Zeit für Initialfüllung automatisierter Montagestationen
ta	Taktzeitanteil automatisierter Montagestationen in hybriden Systemen
VA	vollautomatisiert
X	X Koordinate der Montagestationen im Layout
xLim	Grenze des Layouts in X-Richtung
Y	Y Koordinate der Montagestationen im Layout
yLim	Grenze des Layouts in Y-Richtung

Verzeichnis der Abbildungen

1	Marktstudie zur PKW Produktion in Deutschland (vgl. [VDA 12b], [Rott13])	1
2	Risikotreiber in der Automobilindustrie (vgl. [VDA 12b, S.32])	2
3	Entwicklungen robotergestützter Montagetechnologien in der Automobilindustrie (vgl. [Zuer08],[Zipt12a])	5
4	Struktur und Vorgehensweise dieser Arbeit	8
5	Marktanalyse zu PKW Neuzulassungen nach [VDA 13]	9
6	Lebenszyklus von Montagesystemen am Beispiel Powertrain (in Anlehnung an [Schm12, S.14-15].)	10
7	Produktivität verfügbarer Montagesysteme vs. Volatilität	12
8	Drehscheibe: Skalierung im manuellen Montagebereich	14
9	Modulstrategie: Skalierung im Automatikbereich	15
10	Sensitive Roboter: Skalierung in einem hybriden System für einzelne Montageaufgaben	16
11	Horizontale Segmentierung: Anpassung der Montagesysteme über die Zeit	17
12	Einordnung des Planungs- und Optimierungssystems in die Anwendungsgebiete der Digitalen Fabrik (vgl. [VDI4499-1, S.5])	18
13	Einsatzbereiche für verfügbare Montagesysteme (vgl. [Lott98, S. 103])	25
14	Vergleich von manuellen und robotergestützten Montagestationen	26
15	Zusammenarbeit zwischen Mitarbeitern und Robotern	27
16	Modellierung einer Problemstellung als Graph	30
17	Aufteilung der Knoten auf mehrere Reisende/Mitarbeiter	31
18	Begriffsbestimmung Robot Farming Konzept	37
19	Die Elemente des Robot Farming	39
20	Skalierung der Montagesysteme durch variablen Einsatz von Mitarbeitern und sensiti- tiven Robotern	42
21	Systemübergreifender Einsatz der sensitiven Roboter	43
22	Standardisierte Schnittstelle an Werkzeugen für Mitarbeiter und Roboter	45
23	Anwendung von vorgeführten Strategien und dynamisches Strategieranking zur auto- matisierten Ausführung und Optimierung der Montageaufgaben	47
24	Ziel und Vorgehensweise der Planung von Montagesystemen im Robot Farming . . .	49
25	Anpassung der Montagesysteme durch geplante Ausbau- und Skalierungsstufen . . .	50
26	Planung von Montagestationen im Robot Farming Konzept	51
27	Steigende Konfigurierbarkeit der Montagesysteme durch Robot Farming	53
28	Einordnung des Konzeptes in alternative Vorgehensweisen	57
29	Input-Output-Modell des Planungssystems	58
30	Systementwurf des POS	59
31	Die Entwicklung des Planungssystems beginnt im Kern	61
32	Modell der Montagesysteme und -stationen im POS	64

33	Grafische Schnittstelle des POS im Ausgangszustand	67
34	Erstellung der Wege zwischen den Montagestationen	70
35	Beispielhaftes Layout eines Montagesystems in der grafischen Schnittstelle	71
36	Parameter zur Beschreibung der Montagestationen	72
37	Zusätzliche Wege im Layout erstellen	74
38	Wege und Wegezeiten manuell bearbeiten	76
39	Eingabe der Simulationsparameter	77
40	Berechnungsschritte zu den Ausbau- und Skalierungsstufen im POS	79
41	Beispiellayout zur Berechnung der Routen durch das Montagesystem	82
42	Berechnung der Routen durch das Montagesystem (schematisch)	83
43	Berechnung der Teilrouten (schematisch)	86
44	Kombination der Teilrouten zur Erfüllung der Montageaufgabe (schematisch)	88
45	Berechnung der Robotervariationen (schematisch)	92
46	Berechnung der Ausbringung (schematisch)	95
47	Filter für maximale Produktivität der Montagesysteme	109
48	Grafische Schnittstelle zur Ausgabe der Daten	112
49	ausgewählte Ausbau- und Skalierungsstufen für Montagesysteme	113
50	Hybrider Zuständigkeitsbereich eines Mitarbeiters (schematisch)	114
51	Export der ausgewählten Ausbau- und Skalierungsstufen	115
52	Einfache Zuweisung statt iterativer Berechnung	117
53	Optimierung durch Anpassungen in der Allokation des Speichers	118
54	Leistungssteigerung durch Parallelisierung der Berechnungen	119
55	Ablauf der Berechnungen durch die Parallelisierung mit Parallel Computing Toolbox	120
56	Optimierter Ablauf der Berechnungen für die Parallelisierung	121
57	Ergebnisse: Berechnungsdauer über die Anzahl von Montagestationen	124
58	Ergebnisse: minimale Berechnungsdauer mit aktuellem Algorithmus	126
59	Ergebnisse: Berechnungsdauer mit erhöhter Parallelisierung	127
60	Montageablauf für einen Außenlamellenträger	129
61	Station 1: Außenlamellenträger, Kolben, Tellerfeder und Radial-Axial-Lager	130
62	Station 2/3: Passstift einpressen, Sprengringmontage nach Dichtheitsprüfung	131
63	Station 4: Lamellenpaket in Außenlamellenträger einsetzen	131
64	Station 5/6: Restspiel messen und Sprengring montieren	132
65	Demonstrator: Montagestation in automatisierter Betriebsart	133
66	Demonstrator: Montagestation in manueller Betriebsart	136
67	Modell der Montagelinie im POS	138
68	Optimale Ausbau- und Skalierungsstufen für das Montagesystem	139
69	Modell der Montagelinie in Flexsim	141
70	Verifikation: Ergebnisse der Versuchsreihen	143
71	Demonstrator: Automatisierte Betriebsart in der Serienmontage	145

72	Validierung: Ergebnisse der Versuchsreihen	146
----	--	-----

Verzeichnis der Tabellen

1	Struktur dieses Kapitels	19
2	Anforderungen an Montagesysteme mit flexiblem Automatisierungsgrad	19
3	Zusammenfassung: Anforderungen an Planungs- und Optimierungssystem	21
4	Zusammenfassung: Anforderungen an das POS durch den flexiblen Automatisierungsgrad	23
5	Bewertung bestehender Lösungen zur Planung und Optimierung robotergestützter Montagesysteme	36
6	Aufgabenverteilung zwischen Mitarbeitern und sensitiven Robotern im Robot Farming	62
7	Versuchsplanung: Leistungsfähigkeit mit dem Testsystem	122
8	Versuchsplanung: Grenzwerte mit dem aktuellen Algorithmus	123
9	Versuchsplanung: Grenzwerte bei erhöhter Parallelisierung	123