

Automatisierungstechnik

Thorsten Reichling

Assistenzgestütztes Produktionssystem zur Dynamisierung der ganzheitlichen Produktionsplanung im automobilen Karosseriebau

**Assistenzgestütztes Produktionssystem zur Dynamisierung der
ganzheitlichen Produktionsplanung im automobilen Karosseriebau**

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

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Master of Science

Thorsten Reichling

**geboren am 07.06.1988
in Speyer, 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: 24.04.2018

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

Thorsten Reichling

**Assistenzgestütztes Produktionssystem zur Dynami-
sierung der ganzheitlichen Produktionsplanung im
automobilen Karosseriebau**

Shaker Verlag
Aachen 2018

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., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6020-1

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 stellt 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 Potenzial für zukünftige Innovationen erzeugen.

Ulrich Berger

Kurzfassung

Die heutige Automobilindustrie ist durch zunehmende Individualisierungswünsche der Kunden, neue Fahrzeug- und Mobilitätskonzepte sowie eine Verkürzung der Konjunkturzyklen gekennzeichnet. Für Fahrzeughersteller äußert sich diese Marktsituation in einer hohen Variantenvielfalt und Stückzahlschwankungen. Da die Ausprägungen dieser Einflüsse weitgehend unbekannt sind, muss ein Produktionssystem darauf vorbereitet sein, bedarfsgerecht der Marktsituation angepasst zu werden. Die Planung und Anpassung muss schnell, mit wenig Aufwand und geringen Kosten möglich sein. Dynamische Produktionssysteme gehören deshalb zur strategischen Erfolgsgröße für die Automobilindustrie.

Innerhalb dieser Arbeit wird die Entwicklung eines assistenzgestützten Produktionssystems vorgestellt, das angewandt auf den ganzheitlichen Planungsprozess der Produktionsplanung eine Lösung für die Herausforderungen im automobilen Karosseriebau darstellt.

Dabei basiert das assistenzgestützte Produktionssystem auf einem wandlungsfähigen Produktionskonzept, das mithilfe von Assistenzsystemen geplant, realisiert und angepasst werden kann. Hauptmerkmal des Produktionskonzepts ist hierbei die bedarfsorientierte Anpassbarkeit von Produktionskapazitäten und der Automatisierung.

Assistenzsysteme treten in Form von Produktionstechnologien und Planungssystemen auf, die über den gesamten Lebenszyklus eines Produktionssystems zum Einsatz kommen können. Als Produktionstechnologie wird ein intelligentes und sicheres Assistenzsystem entwickelt, das sich als Möglichkeit anbietet, die Mensch-Roboter-Kooperation in Form einer industriellen Anwendung zu realisieren. Dabei wird durch ein intuitives Programmier- und Bedienkonzept des Systems sowie einer ausgeprägten Mobilität, eine schnelle Realisierung und Skalierung von Produktionskonzepten erreicht.

Das Planungssystem konfiguriert anhand von Produkt- und Prozessspezifikationen sowie Planungsprämissen eine ideale Anordnung von Assets für den Versorgungsprozess. Dies geschieht auf Basis der entwickelten Architektur des wandlungsfähigen Produktionskonzepts und wird methodisch durch Ansätze der Graphentheorie und der multikriteriellen Bewertung gelöst.

Durch die drei Systembestandteile:

- Wandlungsfähiges Produktionskonzept für den Karosseriebau
- Assistenzsystem in Form der Mensch-Roboter-Kooperation
- Assistenzsystem zur Konfiguration einer idealen Anordnung von Assets

wird somit das assistenzgestützte Produktionssystem geschaffen, das durch seine Bestandteile den ganzheitlichen Planungsprozess im Karosseriebau von der Vor- bis zur Serienplanung dynamisiert.

Abstract

The current automotive industry is characterized by the increasing individualization of customers, new vehicle and mobility concepts as well as a reduction in business cycles. For vehicle manufacturers, this market situation is expressed in a high plurality of variants and unit numbers. Since the characteristics of this influence are largely unknown, a production system must be prepared to adapt to the market situation as required. The planning and adaptation must be possible quickly, with little effort and minimal costs. A dynamic production system is therefore a strategic success factor for the automotive industry.

This work deals with the development of an assistance based production system, which when applied to the holistic process of production planning, represents a solution to the challenges of automotive body construction. The developed system is based on a versatile production concept that can be planned, implemented and adapted with the help of assistance systems. The main feature of the production concept is the demand-oriented adaptability of production capacities and automation.

Assistance systems occur in the form of production technologies and planning systems which can be used throughout the entire life cycle of a production system. As a production technology, an intelligent and safe assistance system is developed here that stands out as an opportunity to realize human-robot cooperation in the form of an industrial application. This is achieved through an intuitive programming and operating concept of the system as well as a pronounced mobility, faster realization and scaling of production concepts.

The planning system configures an ideal arrangement of assets for the supply process based on product and process specifications as well as planning premises. This configuration is performed based on the developed architecture of the versatile production concept and is methodically solved by approaches of graph theory and multi-criteria evaluation.

Using the three system components:

- Versatile production concept for the car body shop
- Assistance system in the form of human-robot cooperation
- Assistance system for configuring an ideal arrangement of assets

an assistance based production system is achieved, which through its components makes the holistic planning process in body construction from initial planning to series production more dynamic.

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der Daimler AG in Sindelfingen.

Für das in mich gesetzte Vertrauen und die Chance, meine Dissertation realisieren zu dürfen bedanke ich mich ganz herzlich bei Herrn Dr.-Ing. Michael Zürn, Abteilungsleiter Rohbau Technologien und Herrn Dipl.-Ing. (FH) Hubert Reinkunz, Abteilungsleiter Produktionsplanung Karosseriebau K3. Darüber hinaus möchte ich mich bei dem Team „Technologien wandlungsfähige Rohbauten“ und dem Team „Planung Karosseriebau Z3“ für die angenehme Zusammenarbeit bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Berger, Leiter des Lehrstuhls für Automatisierungstechnik an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg, danke ich herzlich für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit. Das von ihm entgegengebrachte Engagement und die enge Zusammenarbeit, haben entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr. sc. techn. Ulrich Schmucker, Leiter des Bereichs Virtual Engineering am Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung, danke ich für die Übernahme des Koreferats und die konstruktiven Anmerkungen zu meiner Dissertation.

Meinen Dank gilt auch Frau apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. paed. Annette Hoppe, Leiterin des Lehrstuhls für Arbeitswissenschaften und Arbeitspsychologie, für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Meiner gesamten Familie möchte ich für die Unterstützung, den Rückhalt und das gezeigte Verständnis während dieser Zeit danken.

Thorsten Reichling

Stuttgart, im Mai 2018

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	XI
Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole	XII
Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XVIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Herausforderungen	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	7
1.3 Struktur der Arbeit	8
2 Problembetrachtung und Anforderungsanalyse der heutigen Produktionsplanung	10
2.1 Wesentliche Definitionen und Begriffe	10
2.2 Einteilung der Automobilindustrie nach Stückzahl und Modellvarianz	12
2.3 Einfluss der Industrie 4.0 auf heutige Produktionssysteme	14
2.4 Phasen und Prozesse der ganzheitlichen Produktionsplanung	16
2.5 Konkretisierung des Handlungsbedarfs	20
2.6 Ableiten der Anforderungen an das assistenzgestützte Produktionssystem	21
3 Grundlagen des automobilen Karosseriebaus	25
3.1 Produktionsablauf und Fertigungsstruktur innerhalb des Karosseriebaus	25
3.2 Teilsysteme im Karosseriebau	28
3.2.1 Robotertechnik	28
3.2.2 Vorrichtungen	29
3.2.3 Spann- und Fixiersysteme	30
3.2.4 Verbindungstechnik	31
3.2.5 Formung und Bearbeitung	31
3.2.6 Greifer- und Handhabungssysteme	32
3.2.7 Ver- und Entsorgungssysteme	32
3.2.8 Fördertechnik	34
3.2.9 Qualitätssicherung	35
3.2.10 Steuerung	35
3.2.11 Peripheriesysteme	35

4	Stand der Technik und der Forschung	36
4.1	Forschungsansätze zu Produktionskonzepten	36
4.1.1	DMS – Dedicated Manufacturing Systems	37
4.1.2	FMS – Flexible Manufacturing Systems	37
4.1.3	RMS – Reconfigurable Manufacturing Systems	37
4.2	Ausprägungen von flexiblen und rekonfigurierbaren Produktionskonzepten	39
4.2.1	Die flexible Untergruppenfertigung	39
4.2.2	Das Migrationsprinzip nach Meichsner	40
4.2.3	Das Robot-Farming-Prinzip	40
4.3	Assistenzrobotik in der Fertigung	41
4.3.1	Interaktion zwischen Mensch und Roboter in Bezug auf den industriellen Einsatz von Assistenzrobotik	41
4.3.2	Methoden der Roboterprogrammierung	43
4.4	Forschungsansätze zu Assistenzsystemen in der Produktionsplanung	46
4.5	Zusammenfassung der analysierten Systeme und Methoden	56
5	Systementwurf eines assistenzgestützten Produktionssystems	59
5.1	Wandlungsfähiges Produktionskonzept für den Einsatz von Assistenzsystemen	60
5.1.1	Aufbau einer Architektur für das wandlungsfähige Produktionskonzept	60
5.1.2	Produktionsablauf und Skalierungssystematik	63
5.1.3	Versorgungskonzept innerhalb des wandlungsfähigen Produktionskonzepts	67
5.1.4	MRK-fähiges Assistenzsystem für wandlungsfähige Produktionskonzepte	69
5.1.5	Betreibermodell für das wandlungsfähige Produktionskonzept – Asset-to-Go	74
5.1.6	Zusammenfassung	75
5.2	Assistenzsystem zur Konfiguration von Assets	75
5.2.1	Spezifikationen und Prämissen bei der Konfiguration von Assets	76
5.2.2	Untersuchungen des Materialflusses von Produktionskonzepten im Karosseriebau	77
5.2.3	Systemablauf und Module des Systems	78
5.2.4	Entwicklung einer Datenbank für die Konfiguration von Assets	79
5.2.5	Auswahl einer geeigneten Wissensverarbeitung	81
5.2.6	Übertragung der Konfiguration von Assets in einen gerichteten Graphen	84
5.2.7	Auswahl der Algorithmen und Komplexitätsbewertung	85
5.2.8	Permutation und Filterfunktion für die Generierung zulässiger Lösungen	87
5.2.9	Erstellung eines Auswertungsvektors für die Auswertung optimaler Lösungen	90
5.2.10	Multikriterielle Bewertung für die Erzeugung von Leistungskennwerten	92

5.2.11	Entwicklung einer Bewertungsfunktion	95
5.2.12	Gesamtablauf des Dynamic Asset Configurator	99
5.2.13	Zusammenfassung	102
6	Ausarbeitung der Systembestandteile eines assistenzgestützten Produktionssystems	103
6.1	Wandlungsfähiges Produktionskonzept für den Einsatz von Assistenzsystemen am Beispiel der Türenfertigung im Karosseriebau	103
6.1.1	Bestandteile und Produktionsablauf des wandlungsfähigen Produktionskonzepts	103
6.1.2	Betriebsphasen des wandlungsfähigen Produktionskonzepts	106
6.1.3	Zusammenfassung des wandlungsfähigen Produktionskonzepts	108
6.2	MRK-fähiges Assistenzsystem für den Karosseriebau – Der Handlingassistent	108
6.2.1	Applikationsaufbau des Handlingassistenten	110
6.2.2	Skill-Entwicklung für den Handlingassistenten	113
6.2.3	Rüstfähigkeit des Handlingassistenten	118
6.2.4	Zusammenfassung des MRK-fähigen Assistenzsystems	121
6.3	Assistenzsystem zur Konfiguration von Assets im Karosseriebau – Dynamic Asset Configurator	121
6.3.1	Werkzeuge bei der Realisierung des Dynamic Asset Configurator	121
6.3.2	Eingabe der Daten im Dynamic Asset Configurator	121
6.3.3	Systemverarbeitung im Dynamic Asset Configurator	124
6.3.4	Ausgabe der Konfiguration im Dynamic Asset Configurator	129
6.3.5	Zusammenfassung des Assistenzsystems zur Konfiguration von Assets	129
7	Einordnung des assistenzgestützten Produktionssystems in den ganzheitlichen Planungsprozess des Karosseriebaus	130
8	Validierung und Verifizierung des assistenzgestützten Produktionssystems	133
8.1	Validierung des wandlungsfähigen Produktionskonzepts für den Karosseriebau	133
8.2	Validierung des Handlingassistenten	135
8.2.1	Experimentelles Umfeld	135
8.2.2	Validierung der Prozessstabilität	136
8.2.3	Validierung der dynamischen Eigenschaften	140
8.2.4	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse	146
8.3	Verifizierung und Validierung des Dynamic Asset Configurator	146
8.3.1	Verifizierung der multikriteriellen Auswertung	147
8.3.2	Validierung durch Planung einer bestehenden Karosseriebauanlage	149
8.3.3	Validierung durch Planung des wandlungsfähigen Produktionskonzepts	152

8.3.4 Usability-Studie zum Dynamic Asset Configurator	157
8.4 Bewertung der Ergebnisse	160
9 Zusammenfassung und Ausblick	162
9.1 Zusammenfassung	162
9.2 Ausblick	164
Literaturverzeichnis	167
10 Anhang	178
10.1 Ergänzungen zur Problembetrachtung	178
10.2 Ergänzungen zur Ausarbeitung des wandlungsfähigen Produktionskonzepts	179
10.3 Ergänzungen zur Ausarbeitung des MRK-fähigen Assistenzsystems	181
10.4 Ergänzungen zur Ausarbeitung des Assistenzsystems für die Konfiguration von Assets	186

Abkürzungsverzeichnis

AAKA	Anforderungen an ein Assistenzsystem zur Konfiguration von Assets
AHP	Analytical Hierarchy Process
AKA	Assistenzsystem zur Konfiguration von Assets
AK-Auslastung	Arbeitskraft-Auslastung
AMRKA	Anforderungen an ein MRK-fähiges Assistenzsystem für den Karosseriebau
AWFPK	Anforderungen an ein wandlungsfähiges Produktionskonzept
CAM	Computer Aided Manufacturing
cHRI	cognitive and social Human-Robot Interaction
CNC	Computerized Numerical Control
DAC	Dynamic Asset Configurator
DMS	Dedicated Manufacturing Systems
FB	Flächenbedarf
FMS	Flexible Manufacturing Systems
FTF	Fahrerlose Transportfahrzeuge
GEO	geometriebildende Vorrichtung
HMI	Human-Machine-Interface
IBN	Inbetriebnahme
IR	Industrieroboter
KLT	Kleinladungsträger
LBR	Leichtbauroboter
LCA	Low-Cost-Automation
LT	Ladungsträger
MADM	Multi Attribut Decision Making
MB	Mittelbedarf
MRK	Mensch-Roboter-Kooperation
MRKA	MRK-fähiges Assistenzsystem im Karosseriebau
MTM	Methods-Time Measurement
OEM	original equipment manufacturer
pHRI	physical Human-Robot Interaction
Pkw	Personenkraftwagen
RA	Rüstaufwand
RMS	Reconfigurable Manufacturing Systems
SFK	Spann- und Fixierkonzept
SLT	Sonderladungsträger
SOP	Start of Production
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
SSSP	Single-Source Shortest Path
Tool Center Point	Tool Center Point
ULT	Universalladungsträger
VR	Virtual Reality
WPFK	Wandlungsfähiges Produktionskonzept für den Karosseriebau
Z1, Z2, Z3	Zusammenbaustufe 1, 2, 3

Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole

\vec{a}	[-]	Ausprägungsvektor
a_k	[-]	Pfad bzgl. Kriterium k
\vec{a}_{min}	[-]	Minimaler Ausprägungsvektor
AK	[s]	Arbeitskraft-Auslastung
E	[-]	Kantenmenge eines Graphen
FB	[m ²]	Flächenbedarf
G	[-]	Gerichteter Graph
i	[-]	Zählvariable
IBN	[h]	Inbetriebnahme-Aufwand
k_i	[-]	Betrachteter Knoten der Position i
k_{i-1}	[-]	Vorgängerknoten der Position i
MB	[-]	Mittelbedarfe
$O(f(n))$	[-]	Laufzeit O der Funktion f
\mathbf{P}	[-]	Profilmatrix
$P\kappa$	[n/h]	Produktionskapazität
$\Delta P\kappa$	[n/h]	Kapazitätsdifferenzen
\vec{p}	[-]	Prioritätsvektor
\mathbf{R}	[-]	Referenzmatrix
RA	[s]	Rüstaufwand
V	[-]	Knotenmenge eines Graphen
$v(\vec{a})$	[-]	Gewichtungsvektor
v_k	[-]	Ausprägungswert des Pfades bzgl. Kriterium k
v, w	[-]	Allgemeiner Knoten eines Graphen
w_k	[-]	Gewicht des Kriteriums k
x, y, z	[mm]	Kartesische Koordinaten

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Megatrends, die die Produktionsarbeit der Zukunft beeinflussen werden (Ganschar et al. 2013)	1
Abbildung 1-2: Mobilitätstrends und ihre Treiber (Kaas et al. 2016)	3
Abbildung 1-3: Marktdurchdringung von Konsumgütern in den USA (Dediu 2013)	4
Abbildung 1-4: Zunehmende Personalisierung und Komplexität in der Produktion in Anlehnung an Koren (Koren 2010)	5
Abbildung 1-5: Branchenbezogener Absatz von Industrierobotern, 2013–2015 (World Robotics 2016)	6
Abbildung 1-6: Dynamisierung der Produktionsplanung heutiger Produktionssysteme in Anlehnung an Kerber und VDI 5200 (Kerber 2016; VDI 5200)	8
Abbildung 1-7: Struktur und methodische Vorgehensweise der Arbeit	9
Abbildung 2-1: Anzahl der produzierten Personenkraftwagen (Pkw) in Deutschland von 1990 bis 2016 (in Millionen) (Verband der Automobilindustrie e. V. 2017a)	13
Abbildung 2-2: Umsatz der deutschen Automobilindustrie bis 2016 (in Milliarden Euro) (Statistisches Bundesamt 2017)	13
Abbildung 2-3: Marktanalyse zu Pkw-Neuzulassungen (Kraftfahrtbundesamt 2017)	14
Abbildung 2-4: Phasen und Meilenstein der ganzheitlichen Produktionsplanung innerhalb des automobilen Karosseriebaus	17
Abbildung 2-5: Systembestandteile für die Entwicklung des assistenzgestützten Produktionssystems im automobilen Karosseriebau	21
Abbildung 2-6: Herausforderungen in den Phasen und Prozessen der ganzheitlichen Produktionsplanung im automobilen Karosseriebau	23
Abbildung 3-1: Fischgräten-Struktur im Karosseriebau (Wemhöner 2005)	25
Abbildung 3-2: Logistikkette im Karosseriebau (Klug 2010)	26
Abbildung 3-3: Aufbaustufen der Fahrzeugkarosserie (Meichsner 2007)	27
Abbildung 3-4: Betrachtungsraum einer Station innerhalb einer Fertigungsanlage im Karosseriebau	27
Abbildung 3-5: Industrieroboter mit Fügwerkzeugen im Karosseriebau	28
Abbildung 3-6: Wechselbare Vorrichtung einer geometriebildenden Station im Karosseriebau	30
Abbildung 3-7: Spannstellen eines Fügeprozesses im Karosseriebau am Beispiel einer Fahrzeugtür	31
Abbildung 3-8: Handhabung im Prozessablauf (Schimke 1976)	32
Abbildung 3-9: Bauteilbereitstellung im Karosseriebau durch direktes Einlegen	33
Abbildung 3-10: Bauteilbereitstellung im Karosseriebau durch LCA-Bauteilmagazin	33
Abbildung 3-11: Bereitstellung im Karosseriebau durch Sonderladungsträger	34

Abbildung 3-12: Stauförderer einer Karosseriebauanlage (links). Fahrerloses Transportfahrzeug (rechts)	34
Abbildung 3-13: Schutztechnik im Einlegebereich einer Karosseriebauanlage	35
Abbildung 4-1: Gegenüberstellung von: DMS, FMS und RMS (Koren et al. 1999, S. 527–540)	36
Abbildung 4-2: Methodik des Traveling-Salesman-Problem innerhalb des Planungs- und Optimierungssystems (Zipter 2013)	47
Abbildung 4-3: Graphentheoretische Abbildung und produktionstechnische Interpretation des Montageablaufs (Wiesbeck 2013)	50
Abbildung 5-1: Zuordnung der Systembestandteile innerhalb des assistenzgestützten Produktionssystems	59
Abbildung 5-2: Einordnung des zu entwickelnden wandlungsfähigen Produktionskonzepts für den Karosseriebau in Anlehnung an Koren (Koren 2010)	60
Abbildung 5-3: Konzeptioneller Aufbau des wandlungsfähigen Produktionskonzepts. Links: ohne Bündelung der Wertschöpfung. Rechts: Bienenwabenstruktur mit Bündelung der Wertschöpfung	61
Abbildung 5-4: Skalierung der Investitionskosten und Produktionskapazitäten des wandlungsfähigen Produktionskonzepts	63
Abbildung 5-5: Horizontale und vertikale Skalierungsarten im Produktionskonzept	64
Abbildung 5-6: Horizontale Skalierung von Produktionskapazität und Automatisierungsgrad für den Fügeprozess	65
Abbildung 5-7: Vertikale Skalierung von Produktionskapazität und Automatisierungsgrad für die Materialversorgung	65
Abbildung 5-8: Globaler Einsatz des wandlungsfähigen Produktionskonzepts	67
Abbildung 5-9: Dezentrale und Zentrale Versorgung in Produktionskonzepten	68
Abbildung 5-10: Bestandteile des Handlingassistenten für die Versorgung in einem wandlungsfähigen Produktionskonzept	69
Abbildung 5-11: Intelligente Eigenschaften eines Handlingassistenten	70
Abbildung 5-12: Skalierungsmöglichkeiten des Automatisierungsgrades für den Handlingassistenten innerhalb des wandlungsfähigen Produktionskonzepts (Berger et al. 2017, S. 44–51)	72
Abbildung 5-13: Skalierungsmöglichkeiten eines Handlingassistenten bezogen auf den Stückzahlverlauf	73
Abbildung 5-14: Asset-Pool aus skalierbarer Produktionstechnik	74
Abbildung 5-15: UML-Use-Case-Diagramm des DAC	76
Abbildung 5-16: Wertschöpfende und nicht wertschöpfende Anlagenbereiche im Karosseriebau	78
Abbildung 5-17: Systemablauf des DAC	79
Abbildung 5-18: Aufbau und Bestandteile der Datenbank	81
Abbildung 5-19: Ablauf der Lösungsgenerierung mit zulässigen Lösungen	84
Abbildung 5-20: Ablaufdiagramm des verwendeten Dijkstra-Algorithmus im DAC	89

Abbildung 5-21: Summierung der internen und externen Größen zulässiger Lösungen	91
Abbildung 5-22: Profilmatrix in der gewichteten Summe	98
Abbildung 5-23: Programmablauf des DAC	101
Abbildung 6-1: Wandlungsfähiges Produktionskonzept mit Mensch-Roboter-Kooperation am Beispiel der Türenfertigung im Karosseriebau	103
Abbildung 6-2: Supermarkt im Simulationsmodell des wandlungsfähigen Produktionskonzepts für die Türenfertigung	105
Abbildung 6-3: Aufbau und Ablauf des wandlungsfähigen Produktionskonzepts (vgl. Abschnitt 5.1.2)	106
Abbildung 6-4: Skalierungsstufen des wandlungsfähigen Produktionskonzepts am Beispiel der Türenfertigung	107
Abbildung 6-5: Methodik bei der Entwicklung MRK-fähiger Assistenzsysteme (Berger et al. 2017, S. 44–51)	109
Abbildung 6-6: Versuchsaufbau Handlingassistent	110
Abbildung 6-7: Universalgreifer (links) und Greifer mit Schutzhülle (rechts)	112
Abbildung 6-8: Einmessen des Handlingassistenten mithilfe der Messspitze	113
Abbildung 6-9: Lagekorrektur beim Handhabungsvorgang	114
Abbildung 6-10: Abholen eines Bauteils mit dem Handlingassistent	115
Abbildung 6-11: Ablegen eines Bauteils mit dem Handlingassistenten	116
Abbildung 6-12: Ablauf des Aufnahme-Skills (links) und Ablege-Skills (rechts)	117
Abbildung 6-13: Benutzeroberfläche zur skill-basierten Programmierung	118
Abbildung 6-14: Rüstvorgang mit dem Handlingassistenten	119
Abbildung 6-15: Eingabe der Produktspezifikation innerhalb der Benutzeroberfläche des DAC	122
Abbildung 6-16: Eingabe der Prozessspezifikation innerhalb der Benutzeroberfläche des DAC	123
Abbildung 6-17: Eingabe der Planungsprämissen innerhalb der Benutzeroberfläche des DAC	124
Abbildung 6-18: Kommunikation zwischen Datenbank und DAC	125
Abbildung 6-19: Aufbau der Produkt- und Asset-Datenbank im DAC	126
Abbildung 6-20: Realisierung der Produkt- und Asset-Datenbank im DAC	126
Abbildung 6-21: Sequenzdiagramm des DAC	128
Abbildung 6-22: Ausgabefenster mit Lösungsauswertung im DAC	129
Abbildung 7-1: Dynamisierung der ganzheitlichen Produktionsplanung durch Einsatz des assistenzgestützten Produktionssystems	132
Abbildung 8-1: Flächenverhältnisse der Logistik- und Fertigungsbereiche von DMS-Konzept und wandlungsfähigen Produktionskonzept am Beispiel der Türenfertigung	133
Abbildung 8-2: Flächenbedarf des wandlungsfähigen Produktionskonzepts für die Türenfertigung	134

Abbildung 8-3: Durchschnittliche IR-Auslastung des wandlungsfähigen Produktionskonzepts gegenüber der Referenzanlage (Berger et al. 2017, S. 44–51)	134
Abbildung 8-4: Versuchsaufbau des Handlingassistenten im Laborbetrieb	136
Abbildung 8-5: Anlieferung der Verstärkungen Schloss und Türboden in ULT	137
Abbildung 8-6: Kommissionierung der Bauteile auf dem Materialwagen	138
Abbildung 8-7: Handlingassistent mit KUKA LBR iiwa im Laborbetrieb	138
Abbildung 8-8: Unterdruckverlauf beim Handhabungsprozess der Verstärkungselemente durch den Handlingassistenten	139
Abbildung 8-9: Einlernen der Handhabungsprozesse durch skill-basierte Programmierung: Aufnahmeskill (links) und Ablegeskill (rechts)	141
Abbildung 8-10: Aufwand in Minuten für das Einlernen eines sequentiellen Handhabungsvorgangs mit zwei Bauteilen	142
Abbildung 8-11: Gegenüberstellung des Aufwands bei hybrider Programmierung und skill-basierter Programmierung eines Handhabungsvorgangs	143
Abbildung 8-12: Tätigkeiten bei einem Rüstvorgang mit dem Handlingassistent	145
Abbildung 8-13: Gegenüberstellung der MTM-Vorgabezeiten zu realem Rüstaufwand im Labor	146
Abbildung 8-14: Sensitivitätsanalyse der multikriteriellen Auswertung im DAC	148
Abbildung 8-15: Altersverteilung der Probanden	157
Abbildung 8-16: Ergebnisse der Usability-Studie zum Dynamic Asset Configurator	159
Abbildung 9-1: Weiterführende Planungsebenen des DAC	166
Abbildung 10-1: Herausforderungen in der ganzheitlichen Produktionsplanung des automobilen Karosseriebaus	178
Abbildung 10-2: Aufbau des wandlungsfähigen Produktionskonzepts mit Stationszuordnung am Beispiel der Türenfertigung – höchste Skalierungsstufe	179
Abbildung 10-3: SWOT-Analyse zum wandlungsfähigen Produktionskonzept für den Karosseriebau	180
Abbildung 10-4: Ablaufdiagramm des Aufnehmen-Skill	183
Abbildung 10-5: Ablaufdiagramm des Ablegen-Skill	184
Abbildung 10-6: SWOT-Analyse zum MRK-fähigen Assistenzsystem für den Karosseriebau	185
Abbildung 10-7: Untersuchung des Materialflusses bei der Materialanlieferung mittels ULT innerhalb der Z3-Fertigung im Karosseriebau	186
Abbildung 10-8: Ablaufdiagramm zur Generierung des Versorgungsprozesses eines Produktionskonzepts im DAC, Teil 1	188
Abbildung 10-9: Ablaufdiagramm zur Generierung des Versorgungsprozesses eines Produktionskonzepts im DAC, Teil 2	189
Abbildung 10-10: Ablaufdiagramm zur Generierung des Versorgungsprozesses eines Produktionskonzepts im DAC, Teil 3	190

Abbildung 10-11: Ablaufdiagramm zur Generierung des Versorgungsprozesses eines Produktionskonzepts im DAC, Teil 4	191
Abbildung 10-12: Ablaufdiagramm zur Generierung des Versorgungsprozesses eines Produktionskonzepts im DAC, Teil 5	192
Abbildung 10-13: Eingabemaske der Produktspezifikationen im DAC	193
Abbildung 10-14: Eingabemaske der Prozessspezifikationen im DAC	193
Abbildung 10-15: Eingabemaske der Planungsprämissen im DAC	194
Abbildung 10-16: Ausgabe der Lösungsgenerierung und Lösungsauswertung im DAC	195
Abbildung 10-17: Arbeitskosten je geleistete Stunde in Euro im Verarbeitenden Gewerbe im Jahr 2015 (Schröder 2016)	196
Abbildung 10-18: SWOT-Analyse zum Assistenzsystem für die Konfiguration von Assets	197

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Anforderungen an ein wandlungsfähiges Produktionskonzept für den Karosseriebau	24
Tabelle 2-2: Anforderungen an ein MRK-fähiges Assistenzsystem für den Karosseriebau	24
Tabelle 2-3: Anforderungen an ein Assistenzsystem zur Konfiguration von Assets	24
Tabelle 4-1: Analogien zwischen Assistenzsystemen in Fahrzeugen und prozesstechnischen Anlagen (Schegner et al. 2017)	51
Tabelle 4-2: Bewertung bestehender Lösungen aus dem Stand der Technik und der Forschung gemäß der abgeleiteten Anforderungen an die Systembestandteile eines assistenzgestützten Produktionssystems aus Abschnitt 2.6 (vgl. Tabelle 2-1, Tabelle 2-2 und Tabelle 2-3)	58
Tabelle 5-1: Bewertungsobjekte im Teilsystem Manipulator	80
Tabelle 5-2: Kriterien zur Bewertung der Graphenstruktur	82
Tabelle 5-3: Ausgewählte Methoden der Wissensverarbeitung und deren Bewertung	83
Tabelle 5-4: Übersicht der verwendeten Algorithmen im DAC nach Teilfunktionen	86
Tabelle 5-5: Benutzte Algorithmen im DAC und ihre Laufzeitschätzung	87
Tabelle 5-6: Kriterien bei der Auswahl einer geeigneten multikriteriellen Bewertungsmethodik für den DAC	93
Tabelle 5-7: Bewertung der Methoden des MADM	95
Tabelle 6-1: MTM-Analyse: Rüstaufwand des Handlingassistenten im Assistenzbetrieb	120
Tabelle 6-2: Bewertung der Geometrieunabhängigkeit im DAC	127
Tabelle 7-1: Systembestandteile eines assistenzgestützten Produktionssystems bezogen auf die Herausforderungen und Phasen der ganzheitlichen Produktionsplanung	131
Tabelle 8-1: Bauteile für die Validierung des Handlingassistenten	137
Tabelle 8-2: Prozessschritte beim Handhabungsprozess von Verstärkung Türboden und Schloss	139
Tabelle 8-3: Tätigkeiten bei der Inbetriebnahme eines Handhabungsvorgangs mittels skill-basierter Programmierung	141
Tabelle 8-4: Gemessener Rüstaufwand im Vergleich zur MTM-Analyse. Rüstvorgänge mit Handlingassistent im Assistenzbetrieb	144
Tabelle 8-5: Validierungsergebnisse des DAC. Anlieferung in ULT und SLT je Station	150
Tabelle 8-6: Generierte Ergebnisse des DAC für das Referenzkonzept. Anlieferung in ULT je Station	151
Tabelle 8-7: Generierte Ergebnisse des DAC für das wandlungsfähige Produktionskonzept. Anlieferung in ULT je Station, dezentral	153
Tabelle 8-8: Generierte Ergebnisse des DAC für das wandlungsfähige Produktionskonzept. Anlieferung in SLT je Station, dezentral	154
Tabelle 8-9: Generierte Ergebnisse des DAC für das wandlungsfähige Produktionskonzept. Anlieferung in ULT je Station, zentral	155

Tabelle 8-10: Generierte Ergebnisse des DAC für das wandlungsfähige Produktionskonzept. Anlieferung in SLT je Station, zentral	156
Tabelle 8-11: Fragen zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit	158
Tabelle 10-1: MTM-Analyse zum Aufwand eines Rüstvorgangs mit dem Handlingassistenten im Assistenzbetrieb	181
Tabelle 10-2: Gegenüberstellung der MTM-Analyse zum Rüstvorgang mit den Versuchsergebnissen des Handlingassistenten	182
Tabelle 10-3: Verknüpfungsregeln im Versorgungsprozess der Untergruppenfertigung	187