

Andreas Fabian Hees

**System zur Produktionsplanung für  
rekonfigurierbare Produktionssysteme**



Herbert Utz Verlag · München

## Forschungsberichte IWB

Band 331

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2017

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 · 2017

ISBN 978-3-8316-4676-0

Printed in Germany  
Herbert Utz Verlag GmbH, München  
089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>VII</b>
<b>Verzeichnis der Formelzeichen.....</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation .....	1
1.2 Zielsetzung .....	4
1.3 Aufbau der Arbeit .....	6
<b>2 Grundlagen.....</b>	<b>9</b>
2.1 Übersicht .....	9
2.2 Begriffsdefinitionen .....	9
2.2.1 Umrüstbarkeit .....	10
2.2.2 Flexibilität.....	10
2.2.3 Rekonfigurierbarkeit.....	11
2.2.4 Wandlungsfähigkeit.....	12
2.2.5 Abgrenzung der Begriffsdefinitionen.....	14
2.3 Rekonfigurierbare Produktionssysteme .....	15
2.3.1 Einordnung und Abgrenzung .....	15
2.3.2 Eigenschaften .....	19
2.3.3 Umsetzungsbeispiele .....	21
2.4 Produktionsplanung und -steuerung.....	23
2.4.1 Allgemeines .....	23

2.4.2	Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung.....	24
2.4.3	Methoden zur Optimierung der Maschinenbelegung.....	27
2.4.4	Daten für die Produktionsplanung und -steuerung .....	29
2.4.5	Systeme zur Produktionsplanung und -steuerung .....	30
2.5	Fazit.....	32
<b>3</b>	<b>Stand der Technik und Forschung.....</b>	<b>33</b>
3.1	Übersicht .....	33
3.2	Modellierung von Produktionssystemen und -ressourcen.....	33
3.2.1	Allgemeine Ansätze .....	33
3.2.2	Rekonfigurationsorientierte Ansätze.....	36
3.3	Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme .....	38
3.3.1	Allgemeine Ansätze .....	38
3.3.2	Ansätze zur Generierung und Auswahl von Konfigurationen .....	40
3.3.3	Ansätze zur Arbeits- und Prozessplanung.....	44
3.3.4	Ansätze zur Kapazitätsplanung und -steuerung .....	46
3.3.5	Ansätze zur Optimierung der Maschinenbelegung .....	48
3.4	Ableitung des Handlungsbedarfs.....	51
<b>4</b>	<b>Anforderungen .....</b>	<b>53</b>
4.1	Allgemeines .....	53
4.2	Adaptionsfähigkeit und Übertragbarkeit .....	53
4.3	Konfigurationsabhängige Beschreibung von Produktionssystemen .....	54
4.4	Zuordnung und Auswahl von Konfigurationen .....	54
4.5	Integration der Skalierbarkeit in die Produktionsplanung .....	55

<b>5</b>	<b>Systemübersicht .....</b>	<b>57</b>
5.1	Überblick.....	57
5.2	Systemelemente.....	58
<b>6</b>	<b>Modellierung und Beschreibung rekonfigurierbarer Produktionssysteme .....</b>	<b>61</b>
6.1	Übersicht .....	61
6.2	Modellierung rekonfigurierbarer Produktionssysteme .....	61
6.2.1	Allgemeines .....	61
6.2.2	Grundlagen von Petri-Netzen .....	62
6.2.3	Strukturierung rekonfigurierbarer Produktionssysteme .....	63
6.2.4	Beschreibung rekonfigurierbarer Produktionssysteme .....	65
6.2.5	Abbildung und Klassifizierung von Auftragsanforderungen und Ressourcenfähigkeiten .....	68
6.3	Modellierung von Rekonfigurationsvorgängen .....	71
6.3.1	Allgemeines .....	71
6.3.2	Beschreibung von Rekonfigurationen .....	71
6.3.3	Bewertung von Rekonfigurationsaufwänden .....	73
6.3.4	Abbildung der Rekonfigurationsaufwände in einer Rekonfigurationsmatrix.....	75
6.4	Beschreibung der Skalierbarkeit für die Produktionsplanung .....	77
6.4.1	Allgemeines .....	77
6.4.2	Beschreibung konfigurationsabhängiger Bearbeitungszeiten .....	77
6.4.3	Beschreibung skalierbarer Produktionskapazitäten.....	80
6.5	Fazit.....	82

<b>7</b>	<b>Methode zur Produktionsplanung .....</b>	<b>83</b>
7.1	Übersicht .....	83
7.2	Ablauf der Methode zur Produktionsplanung.....	83
7.3	Produktionsbedarfsplanung .....	85
7.3.1	Allgemeines.....	85
7.3.2	Generierung und Spezifikation des Produktionsprogramms .....	86
7.3.3	Zuordnung von Konfigurationen durch Technologieabgleich.....	87
7.3.4	Ermittlung von Rekonfigurationsbedarfen.....	89
7.3.5	Abbildung produktspezifischer Auftragsdaten .....	93
7.3.6	Generierung konfigurationsabhängiger Herstellungsprozesse.....	95
7.4	Ressourcenplanung .....	97
7.4.1	Allgemeines.....	97
7.4.2	Spezifikation der Ressourcenkonfigurationen .....	97
7.4.3	Generierung von Konfigurationsalternativen.....	99
7.4.4	Verknüpfung von Produktanforderungen und Konfigurationen.....	101
7.4.5	Rekonfigurationsorientierte Kapazitätsabstimmung.....	102
7.5	Produktionsablaufplanung .....	106
7.5.1	Allgemeines.....	106
7.5.2	Annahmen .....	106
7.5.3	Modellformulierung .....	107
7.5.3.1	Eingangsparameter .....	108
7.5.3.2	Zielfunktion .....	109
7.5.3.3	Nebenbedingungen .....	110
7.5.4	Lösungsverfahren und Entscheidungsvariablen.....	114
7.6	Fazit.....	115

<b>8</b>	<b>Anwendungsbeispiel und Bewertung.....</b>	<b>117</b>
8.1	Allgemeines.....	117
8.2	Anwendungsbeispiel .....	117
8.2.1	Anwendungsszenario.....	117
8.2.2	Produktionstechnisches System .....	118
8.3	Anwendung des Systems zur Produktionsplanung .....	119
8.3.1	Allgemeines .....	119
8.3.2	Modellierung und Beschreibung des Produktionssystems .....	120
8.3.3	Durchführung der Produktionsbedarfsplanung .....	122
8.3.4	Anwendung der Ressourcenplanung .....	126
8.4	Simulationsbasierte Umsetzung und Validierung .....	128
8.4.1	Allgemeines .....	128
8.4.2	Beschreibung der Umsetzung.....	129
8.4.3	Planungsmodelle und Produktionsszenarien .....	130
8.4.4	Planungsergebnisse der Simulationen .....	133
8.4.4.1	Produktionsplanung für die Ausgangssituation .....	133
8.4.4.2	Produktionsplanung bei gesteigerter Nachfrage .....	135
8.4.4.3	Produktionsplanung bei Änderung der Funktionalitäten .....	136
8.4.4.4	Produktionsplanung bei reduzierter Nachfrage und Änderung der Funktionalität .....	138
8.4.5	Analyse und Diskussion der Simulationsergebnisse .....	140
8.5	Bewertung .....	145
8.5.1	Anforderungsbezogene Bewertung .....	145
8.5.2	Wirtschaftliche Bewertung.....	147
8.5.2.1	Allgemeines .....	147

## **Inhaltsverzeichnis**

---

8.5.2.2 Wirtschaftlichkeitsrechnung am Anwendungsbeispiel .....	148
8.6 Fazit.....	153
<b>9 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>155</b>
9.1 Zusammenfassung .....	155
9.2 Ausblick .....	157
<b>10 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>159</b>
<b>11 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten.....</b>	<b>181</b>



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation

Am Wirtschafts- und Exportstandort Deutschland trägt das produzierende Gewerbe einen wesentlichen Teil zur Wirtschaftsleistung bei. Dieser Wirtschaftszweig beschäftigte im Jahr 2014 24,6 % aller Erwerbstätigen (STATISTISCHES BUNDESAMT 2015B) und generierte dabei 25,9 % der Bruttowertschöpfung in der Bundesrepublik Deutschland (STATISTISCHES BUNDESAMT 2015A). Infolgedessen zeichnet sich das produzierende Gewerbe als substanzielles Element der volkswirtschaftlichen Wertschöpfungskette aus (ZÄH ET AL. 2006). Mehr denn je sieht sich der Hochlohnstandort Deutschland mit besonderen Herausforderungen konfrontiert. Das Umfeld produzierender Unternehmen gilt u. a. aufgrund der zunehmenden Nachfrage nach individuellen Produkten (LINDEMANN & BAUMBERGER 2006, JOVANE ET AL. 2009, ABELE & REINHART 2011) sowie verkürzten Produkt- und Technologiezyklen (ABELE ET AL. 2006A) als hochdynamisch (WIENDAHL ET AL. 2007). Als Folge können produzierende Unternehmen nur erfolgreich im Wettbewerb bestehen, wenn sie durch die gezielte Ausrichtung ihres Leistungsangebotes eine Differenzierung gegenüber ihren Wettbewerbern erreichen (PILLER 1997, PILLER & STOTKO 2003, REINHART & ZÄH 2003). Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, bieten Unternehmen immer mehr individualisierte anstelle von standardisierten Produkten an und entwickeln sich in zunehmendem Maße zu Einzel- und Kleinserienproduzenten. Als Folge des Wandels hin zu einer Produktion mit kleinen Losgrößen nehmen die produzierten Stückzahlen ab, wohingegen die Anzahl abzuwickelnder Aufträge sowie der notwendige Koordinationsaufwand zunehmen (MÖRTL 2008).

Mit der steigenden Nachfrage nach individuellen Produkten müssen Unternehmen ihre bestehenden Produktionskonzepte überdenken und diese flexibel gestalten (GÜNTNER ET AL. 2006, ABELE & REINHART 2011). Insbesondere müssen sie auf Änderungen ihrer Produktionsressourcen durch Hinzufügen, Austauschen oder Entfernen von Elementen jenseits normaler Rüstvorgänge, d. h. auf Rekonfigurationen, vorbereitet sein (WIENDAHL 2002). Kurzfristig auf neue Anforderungen reagieren zu können, stellt für produzierende Unternehmen eine große Herausforderung dar (KIRCHNER ET AL. 2003). Produktionssysteme müssen nun proaktiv und schnell an die Anforderungen des Marktes angepasst werden (SPATH & SCHOLTZ 2007, JANORSCHKE & PRITZEL 2009, BRECHER ET AL. 2011, PACHOW-FRAUENHOFER 2012, BAUERNHANSL 2014), wohingegen bisher Ände-

rungen an Produktionssystemen lediglich bei einer Erhöhung der Ausbringungsmenge, der Einführung neuer Produkte und Varianten sowie als Maßnahme zur Kostensenkung vorgenommen wurden (BACKHAUS ET AL. 2012).

Für die globale Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen ist die Möglichkeit, sich schnell an veränderliche Rahmenbedingungen anpassen zu können, essentiell (MEHRABI ET AL. 2002). Um nachhaltig erfolgreich zu sein, muss für produzierende Unternehmen die Steigerung der Wandlungsfähigkeit und Flexibilität mit einer Effizienzsteigerung einhergehen (KLEINE ET AL. 2008). Wandlungsfähige Systeme ermöglichen diesen Unternehmen, schnell auf unvorhersehbare Situationen, die über einen inhärenten Flexibilitätskorridor hinausgehen, reagieren zu können (KOREN ET AL. 1999, WIENDAHL ET AL. 2007). In der Produktionstechnik werden diese Systeme als rekonfigurierbare Produktionssysteme bezeichnet (KOREN ET AL. 1999). Um wirtschaftlich produzieren und die Lebenszyklen komplexer Produktionsressourcen verlängern zu können, muss der Anteil an Rekonfigurationen von Produktionsanlagen wachsen, der komplette Austausch hingegen vermieden werden (ABELE & REINHART 2011). Aktuell werden jedoch in Unternehmen aufgrund fehlender Rekonfigurationsmöglichkeiten noch eine Vielzahl von Produktionsanlagen ausgetauscht (KARL ET AL. 2012).

Für eine effiziente Planung und Steuerung der Produktionsabläufe in rekonfigurierbaren Produktionssystemen sind geeignete Systeme zur Produktionsplanung und -steuerung (PPS) erforderlich, die den Anforderungen dieser Systeme entsprechen (ELMARAGHY 2006). Während Produktionsanlagen vermehrt flexibel und wandlungsfäh gestaltet werden, z. B. mittels standardisierter Schnittstellen und modularem Aufbau (vgl. DRABOW 2006), weisen bestehende PPS-Systeme nicht das Maß an Veränderungsfähigkeit auf, das heutzutage für die Planung und Steuerung veränderlicher Produktionsbedingungen und -abläufe notwendig ist. In vielen Fällen werden PPS-Systeme als starr und unflexibel beschrieben (UNGER 1998, WIENDAHL 2009). Insbesondere können die vorhandenen Algorithmen den Anforderungen des Marktes nicht gerecht werden (SCHOLZ-REITER ET AL. 2008). Des Weiteren sind eine unklare Schnittstellendefinition, eine inkonsistente Ziel- und Aufgabenverantwortlichkeit, die fehlerhafte Parametrierung (z. B. mittelwertbasierte Durchlaufzeitplanung) sowie ungenügende Stamm- und Bewegungsdaten als Stolpersteine der PPS zu nennen (WIENDAHL ET AL. 2005, KLETTI & SCHUMACHER 2011). Diese sind in Abbildung 1 dargestellt. Insbesondere die vorhandenen Stammdaten basieren in vielen Fällen auf Vergangenheitsdaten und besitzen nur so lange Gültigkeit, wie die gleichen Bedingungen in der Produktion bestehen (NYHUIS & WIENDAHL 2003). Die Bedeutung der Qualität von Stamm-

und Bewegungsdaten wurde auch im Rahmen einer Studie unter dem Titel *Liefertreue im Maschinen- und Anlagenbau* herausgestellt (SCHUH & WESTKÄMPER 2006). Dabei zeigte sich, dass ungenügende Stamm- und Rückmeldedaten sowie eine inkonsistente Auftragssteuerung wesentliche Einflussgrößen für die Nichteinhaltung von Lieferterminen und somit eine mangelnde Liefertreue darstellen. Darüber hinaus wird in vielen Fällen keine Aktualisierung der Stammdaten an die in der Produktion vorherrschenden Bedingungen vollzogen (GEIGER 2015).

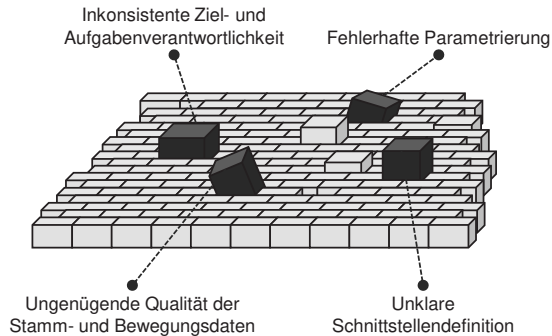


Abbildung 1: Ausgewählte Stolpersteine der PPS

Zusammenfassend besteht für produzierende Unternehmen die Notwendigkeit, die Fertigung und die Montage schnell und einfach hinsichtlich ihrer Struktur und Abläufe anzupassen sowie in der Produktionsplanung eine wesentlich höhere Flexibilität bereitzustellen (SETHI & SETHI 1990, WIENDAHL ET AL. 2007, NYHUIS 2008, NYHUIS ET AL. 2009). Weiterhin sind für die Realisierung von Industrie-4.0<sup>1</sup>-Potenzialen angepasste und geeignete Beschreibungen von Ressourcenfähigkeiten sowie neue Planungsmethoden unter Berücksichtigung von Rekonfigurationen notwendig (KAGERMANN ET AL. 2013). Aus heutiger Sicht fehlt es jedoch an der Möglichkeit, sowohl die produktionsseitigen Änderungen, wie z. B. die Integration einer neuen Maschine, schnell in Planungsdaten und -methoden abzubilden und anzupassen als auch die in der Produktion verfügbare Flexibilität planungsseitig bereitzustellen (WIENDAHL 2009). Um diesen Herausforderungen begegnen zu können, bedarf es geeigneter Methoden der Produktionsplanung sowie verlässlicher, qualitativ hochwertiger Planungsdaten.

<sup>1</sup> Unter Industrie 4.0 wird die technische Integration von Cyber-Physischen Systemen unter Anwendung von Applikationen des Internets der Dinge und Dienste verstanden. Als Anwendungsfelder werden insbesondere die Produktion und die Logistik gesehen (KAGERMANN ET AL. 2013).

### 1.2 Zielsetzung

Die im vorherigen Abschnitt dargelegte Ausgangssituation zeigt den Bedarf nach einer geeigneten Planung von Produktionsabläufen unter Berücksichtigung der notwendigen und vorhandenen Fähigkeiten eines Produktionssystems auf. Für eine effiziente und verlässliche Planung mit rekonfigurierbaren Produktionssystemen muss folglich ein hoher Grad an Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in der Produktionsplanung geschaffen werden. Dies kann nur durch die Beschreibung und planungsseitige Integration der charakteristischen Fähigkeiten und Eigenschaften rekonfigurierbarer Produktionssysteme in die Produktionsplanung erreicht werden.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Systems zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme. Das zu entwickelnde System soll im Speziellen die Produktionsplanung zum Umgang mit Rekonfigurationen befähigen. Dabei sollen aktuelle Konfigurationen sowie notwendige Rekonfigurationen in verschiedenen Planungsschritten berücksichtigt und eingeplant werden. Das dargelegte Gesamtziel der vorliegenden Arbeit soll über die folgenden Teilziele erreicht werden:

- *Modellierung und Beschreibung der Eigenschaften rekonfigurierbarer Produktionssysteme:*

Für die Realisierung des zu entwickelnden Systems müssen die Eigenschaften rekonfigurierbarer Produktionssysteme abgebildet und für die Anwendung im Rahmen der Produktionsplanung konkretisiert werden. Hierfür sind Modellierungs- und Beschreibungsansätze erforderlich, welche in den verschiedenen Phasen der Produktionsplanung und zur Vorbereitung von Planungsentscheidungen eingesetzt werden können. Eine wesentliche Voraussetzung ist ein allgemeingültiger Modellierungsansatz zur Abbildung der konfigurationsabhängigen Eigenschaften. Des Weiteren soll die Möglichkeit zur Erweiterung der resultierenden Ansätze gegeben sein. Die Fähigkeiten der einzelnen Produktionsressourcen, wie z. B. die Fertigungsverfahren mit den jeweils notwendigen Hilfsmitteln, sollen dabei als Konfigurationen, die die Zusammensetzung einer Produktionsressource aus einzelnen Komponenten mit definierten Eigenschaften darstellen, in die Planungsdaten integriert werden. Weiterhin sollen Konfigurationen und Produktanforderungen anwendungsfallspezifisch zugeordnet und ausgewählt werden können. Darüber hinaus gilt es, den Aufwand für

die einzuplanenden Rekonfigurationsvorgänge mithilfe einer geeigneten Berechnungsmethode zu quantifizieren.

- *Beschreibung der Skalierbarkeit für die Produktionsplanung:*

Die wesentlichen Eigenschaften rekonfigurierbarer Produktionssysteme sind die Skalierbarkeit der Kapazität sowie die Anpassung der Funktionalität. Um insbesondere die Skalierbarkeit im Rahmen der Produktionsplanung nutzen zu können, bedarf es geeigneter Beschreibungsansätze. Hierfür sollen im Rahmen der vorliegenden Arbeit entsprechende Ansätze entwickelt werden. Dabei gilt es, die bestehenden Planungsgrundlagen, wie z. B. Bearbeitungs- und Durchlaufzeiten, in Bezug auf die Zielstellung zu untersuchen und ggf. zu erweitern. Des Weiteren muss der Skalierungsvorgang bei einer Rekonfiguration für die Nutzung im Rahmen der Produktionsplanung beschrieben werden. Auf diese Weise wird angestrebt, die Skalierbarkeit der Kapazität von rekonfigurierbaren Produktionssystemen in die Produktionsplanung zu integrieren, z. B. im Rahmen der Kapazitätsabstimmung.

- *Entwicklung einer Methode zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme:*

Zur Nutzung der Eigenschaften rekonfigurierbare Produktionssysteme in den Planungsabläufen soll darauf aufbauend eine Methode zur Produktionsplanung für diese Systeme erarbeitet werden. Diese Methode soll in der Lage sein, die charakteristischen Eigenschaften rekonfigurierbarer Produktionssysteme in die Planungsabläufe zu integrieren. Im Fokus der Betrachtungen stehen dabei vor allem die prädiktive Skalierung der notwendigen Produktionskapazitäten sowie die planungsseitige Integration der angepassten Funktionalitäten. Der Anwendungsbereich soll dabei verschiedene Planungsphasen abdecken.

Den inhaltlichen Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit bildet die Synthese der vorherigen Teilziele zu einem System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme. In den Betrachtungen ausgeschlossen sind die Methoden der Produktionssteuerung und Koordinationsaufgaben, die das Wertschöpfungsnetzwerk betreffen. Zusammenfassend schließt der Betrachtungsbereich die Modellierung und Beschreibung von rekonfigurierbaren Produktionssystemen, die Auswahl und Adaption von Konfigurationen sowie die Entwicklung von geeigneten Methoden zur Produktionsplanung ein.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit unterteilt sich in neun inhaltliche Kapitel. Der strukturelle Aufbau ist in Abbildung 2 dargestellt. In *Kapitel 1* werden die Ausgangssituation, die Problemstellung und die Zielsetzung der Arbeit dargelegt. Ausgehend hiervon werden in *Kapitel 2* für das Verständnis der Arbeit wichtige Grundlagen erläutert. Hierbei werden insbesondere die grundlegenden Begriffsdefinitionen, die Eigenschaften rekonfigurierbarer Produktionssysteme sowie die Prinzipien der PPS in den Fokus der Betrachtungen gestellt.

*Kapitel 3* stellt den relevanten Stand der Technik und Forschung dar. Aufbauend auf den Anforderungen und Merkmalen rekonfigurierbarer Produktionssysteme werden bestehende Forschungsansätze analysiert und hinsichtlich einer möglichen Übertragbarkeit detailliert betrachtet sowie bewertet. Im Hinblick auf die Zielstellung der vorliegenden Arbeit werden Ansätze zur Modellierung von Produktionssystemen und -ressourcen sowie Ansätze zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme diskutiert. Den Abschluss des Kapitels bildet die Ableitung des Handlungsbedarfs. Ausgehend vom resultierenden Handlungsbedarf werden in *Kapitel 4* die Anforderungen an ein System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme definiert.

Eine Übersicht über das System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme wird in *Kapitel 5* dargestellt. Insbesondere der modulare Aufbau sowie die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Systemelementen werden dabei fokussiert. Diese Elemente sind die Modellierung und Beschreibung rekonfigurierbarer Produktionssysteme sowie die Methode zur Produktionsplanung.

In den Kapiteln 6 und 7 werden die wesentlichen Elemente des Systems zur Produktionsplanung detailliert. Als essentielle Voraussetzung für die Produktionsplanung werden in *Kapitel 6* die entwickelten Ansätze zur Modellierung und Beschreibung rekonfigurierbarer Produktionssysteme für die Produktionsplanung aufgezeigt. Die wesentliche Aufgabe dieses Systemelements ist die Befähigung und Unterstützung der Methode zur Produktionsplanung für den zielgerichteten Einsatz rekonfigurierbarer Produktionssysteme. Im Fokus der Betrachtungen stehen hier vor allem die Beschreibung der Skalierbarkeit für die Produktionsplanung sowie die Abbildung von Rekonfigurationsvorgängen und -aufwänden. Der strukturelle Aufbau und die Funktionsweise der Methode zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme werden in *Kapitel 7* dargestellt. Im Speziellen werden die Produktionsbedarfsplanung, die Ressourcenpla-

nung sowie die Produktionsablaufplanung aufgezeigt. Darüber hinaus wird auch auf die für die Produktionsplanung notwendigen Informationen und Dokumente eingegangen.

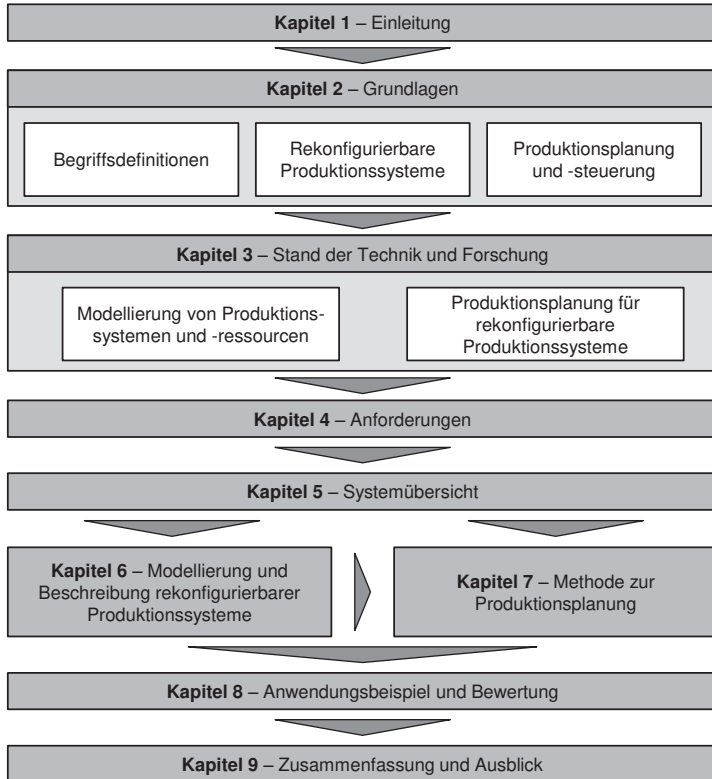


Abbildung 2: Aufbau der vorliegenden Arbeit

Die exemplarische Anwendung und Bewertung des Systems zur Produktionsplanung wird anhand eines realen Anwendungsbeispiels in *Kapitel 8* aufgezeigt. Die Validierung erfolgt mithilfe einer Simulationsumgebung und anhand unterschiedlicher, realitätsnaher Produktionsszenarien. Im Speziellen werden dabei die Integration der Skalierbarkeit sowie die Möglichkeit zur Funktionsanpassung im Rahmen der Produktionsplanung untersucht. Weiterhin beinhaltet dieses Kapitel eine technische und wirtschaftliche Bewertung des Planungssystems. Hierbei werden insbesondere die Ergebnisse der simulationsgestützten Untersuchungen

## **1 Einleitung**

---

in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit des entwickelten Systems zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme analysiert. Abgeschlossen wird die Arbeit mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in *Kapitel 9*.



- 234 **Ulrich Munzert:** Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 **Georg Völlner:** Rührreißschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-0955-0
- 236 **Nils Müller:** Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen  
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-0992-5
- 237 **Franz Decker:** Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0996-3
- 238 **Christian Lau:** Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4012-6
- 239 **Christoph Rimpau:** Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte  
268 Seiten - ISBN 978-3-8316-4015-7
- 240 **Michael Loy:** Modulare Vibrationswendelförderer für flexiblen Teilezuführung  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-4027-0
- 241 **Andreas Eursch:** Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-4029-4
- 242 **Florian Schwarz:** Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung  
282 Seiten - ISBN 978-3-8316-4030-0
- 243 **Martin Georg Prasch:** Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage  
261 Seiten - ISBN 978-3-8316-4033-1
- 244 **Johannes Schilp:** Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4063-8
- 245 **Stefan Lutzmann:** Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens  
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4070-6
- 246 **Gregor Branner:** Modellierung transientser Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4071-3
- 247 **Josef Ludwig Zimmermann:** Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme  
186 Seiten - ISBN 978-3-8316-4091-1
- 248 **Clemens Pörnbacher:** Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungssoftware automatisierter Fertigungssysteme  
280 Seiten - ISBN 978-3-8316-4108-6
- 249 **Alexander Lindworsky:** Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest  
294 Seiten - ISBN 978-3-8316-4125-3
- 250 **Michael Mauderer:** Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4126-0
- 251 **Roland Mark:** Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze  
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4127-7
- 252 **Florian Reichl:** Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4128-4
- 253 **Paul Gebhard:** Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreißschweißen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4129-1
- 254 **Michael Heinz:** Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik  
302 Seiten - ISBN 978-3-8316-4147-5
- 255 **Pascal Krebs:** Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4156-7
- 256 **Gerhard Straßer:** Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung  
290 Seiten - ISBN 978-3-8316-4161-1
- 257 **Frédéric-Felix Lacour:** Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflusintensiver Produktionsanlagen  
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4162-8
- 258 **Thomas Hensel:** Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen  
184 Seiten - ISBN 978-3-8316-4167-3
- 259 **Sherif Zaidan:** A Work-Piece Based Approach for Programming Cooperating Industrial Robots  
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-4175-8
- 260 **Hendrik Schellmann:** Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4189-5
- 261 **Marwan Rad:** Workspace scaling and haptic feedback for industrial telepresence and teleaction systems with heavy-duty teleoperators  
172 Seiten - ISBN 978-3-8316-4195-6
- 262 **Markus Ruhstorfer:** Rührreißschweißen von Rohren  
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4197-0
- 263 **Rüdiger Daub:** Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmelitungsschweißen von Stählen  
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-4199-4
- 264 **Michael Ott:** Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettbasierten Fertigung  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4201-4
- 265 **Martin Ostgathe:** System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage  
278 Seiten - ISBN 978-3-8316-4206-9
- 266 **Imke Nora Kellner:** Materialsysteme für das pulverbettbasierte 3D-Drucken  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4223-6
- 267 **Florian Oefele:** Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen  
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-4224-3
- 268 **Claudia Anna Ehinger:** Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorformlingen  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-4233-5
- 269 **Tobias Zeilinger:** Laserbasierte Bauteilabgabestimmung bei der Montage optischer Mikrokomponenten  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4234-2
- 270 **Stefan Krug:** Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug&Produce)  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4243-4
- 271 **Marc Lotz:** Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim Schwungrad-Reißschweißen durch modellbasierte Regelungsverfahren  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4245-8
- 272 **William Brice Tekouo Mouthicho:** A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection systems  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4247-2
- 273 **Matthias Waibel:** Aktive Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion an Werkzeugmaschinen  
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-4250-2
- 274 **Christian Eschey:** Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-4270-0
- 275 **Florian Aull:** Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden  
270 Seiten - ISBN 978-3-8316-4283-0
- 276 **Marcus Hennauer:** Entwicklungsbegleitende Prognose der mechatronischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinen  
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4306-6

- 277 **Alexander Götzfried:** Analyse und Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4310-3
- 278 **Saskia Reinhardt:** Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4317-2
- 279 **Fabian J. Meling:** Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4319-6
- 280 **Jörg Egbers:** Identifikation und Adaption von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter entlang des Montageplanungsprozesses  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4328-8
- 281 **Max von Bredow:** Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4337-0
- 282 **Tobias Philipp:** RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen  
142 Seiten - ISBN 978-3-8316-4346-2
- 283 **Stefan Rainer Johann Braunreuther:** Untersuchungen zur Lasersicherheit für Materialbearbeitungsanwendungen mit brillanten Laserstrahlquellen  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4348-6
- 284 **Johannes Pohl:** Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen  
202 Seiten - ISBN 978-3-8316-4358-5
- 285 **Mathy Wiesbeck:** Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-4369-1
- 286 **Sonja Huber:** In-situ-Legierungsbestimmung beim Laserstrahlschweißen  
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4370-7
- 287 **Robert Wiedenmann:** Prozessmodell und Systemtechnik für das laserunterstützte Fräsen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4384-4
- 288 **Thomas Irenhauser:** Bewertung der Wirtschaftlichkeit von RFID im Wertschöpfungsnetz  
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4404-9
- 289 **Jens Hatwig:** Automatisierte Bahnplanung für Industrieroboter und Scanneroptiken bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung  
196 Seiten - ISBN 978-3-8316-4405-6
- 290 **Matthias Baur:** Aktives Dämpfungssystem zur Ratterunterdrückung an spanenden Werkzeugmaschinen  
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-4408-7
- 291 **Alexander Schober:** Eine Methode zur Wärmequellenkalibrierung in der Schweißstruktursimulation  
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-4415-5
- 292 **Matthias Glonegger:** Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der Planung von Variantenfließmontagesystemen  
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4419-3
- 293 **Markus Kahmert:** Scanstrategien zur verbesserten Prozessführung beim Elektronenstrahlschmelzen (EBM)  
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4416-2
- 294 **Sebastian Schindler:** Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4434-6
- 295 **Tobias Fockerer:** Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung des Schleifhärtens  
128 Seiten - ISBN 978-3-8316-4448-3
- 296 **Rüdiger Spillner:** Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion  
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-4450-6
- 297 **Daniel Schmid:** Rührreibschweißen von Aluminiumlegierungen mit Stählen für die Automobilindustrie  
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-4452-0
- 298 **Florian Karl:** Bedarfsermittlung und Planung von Rekonfigurationen an Betriebsmitteln  
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4458-2
- 299 **Philipp Ronald Engelhardt:** System für die RFID-gestützte situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage  
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-4472-8
- 300 **Markus Graßl:** Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion  
202 Seiten - ISBN 978-3-8316-4476-6
- 301 **Thomas Kirchmeier:** Methode zur Anwendung der berührungslosen Handhabung mittels Ultraschall im automatisierten Montageprozess  
196 Seiten - ISBN 978-3-8316-4478-0
- 302 **Oliver Rösch:** Steigerung der Arbeitsgenauigkeit bei der Fräsbearbeitung metallischer Werkstoffe mit Industrierobotern  
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4486-5
- 303 **Christoph Sieben:** Entwicklung eines Prognosemodells zur prozessbegleitenden Beurteilung der Montagequalität von Kolbendichtungen  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-4510-7
- 304 **Philipp Alexander Schmidt:** Laserstrahlschweißen elektrischer Kontakte von Lithium-Ionen-Batterien in Elektro- und Hybridfahrzeugen  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-4519-0
- 305 **Yi Shen:** System für die Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4520-6
- 306 **Thomas Bonin:** Moderne Ordnungsreduktionsverfahren für die Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen  
274 Seiten - ISBN 978-3-8316-4522-0
- 307 **Jan Daniel Musiol:** Remote-Laserstrahl-Abtragschneiden  
168 Seiten - ISBN 978-3-8316-4523-7
- 308 **Emin Genc:** Frühwarnsystem für ein adaptives Störungsmanagement  
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-4525-1
- 309 **Mirko Langhorst:** Beherrschung von Schweißverzug und Schweißteigenspannungen  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-4524-2
- 310 **Markus Schweiße:** Simulative und experimentelle Untersuchungen zum Laserschweißen mit Strahloszillation  
284 Seiten - ISBN 978-3-8316-4536-7
- 311 **Florian Geiger:** System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung auf Basis produktspezifischer Auftragsdaten  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4537-4
- 312 **Peter Schnellbach:** Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung unter Berücksichtigung von Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme  
236 Seiten - ISBN 978-3-8316-4540-4
- 313 **Stefan Schwarz:** Prognosefähigkeit dynamischer Simulationen von Werkzeugmaschinenstrukturen  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4542-8
- 314 **Markus Pröpster:** Methodik zur kurzfristigen Ausrüstung variantenreicher Montagelinien am Beispiel des Nutzfahrzeugbaus  
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-4547-3
- 315 **Dominik David Simon:** Automatisierte flexible Werkzeugsysteme zum Umformen und Spannen von Kunststoffscheiben und -schalen  
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-4548-0
- 316 **Stefan Maurer:** Frühaufklärung kritischer Situationen in Versorgungsprozessen  
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4554-1

- 317 **Tobias Maier:** Modellierungssystematik zur aufgabenbasierten Beschreibung des thermoelastischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen  
274 Seiten - ISBN 978-3-8316-4561-9
- 318 **Klemens Konrad Niehues:** Identifikation linearer Dämpfungsmodelle für Werkzeugmaschinenstrukturen  
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-4568-8
- 319 **Julian Christoph Sebastian Backhaus:** Adaptierbares aufgabenorientiertes Programmiersystem für Montagesysteme  
264 Seiten - ISBN 978-3-8316-4570-1
- 320 **Sabine G. Zitzlsberger:** Flexibles Werkzeug zur Umformung von Polycarbonatplatten unter besonderer Beachtung der optischen Qualität  
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4573-2
- 321 **Christian Thiemann:** Methode zur Konfiguration automatisierter thermografischer Prüfsysteme  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4574-9
- 322 **Markus Westemeier:** Qualitätsorientierte Analyse komplexer Prozessketten am Beispiel der Herstellung von Batteriezellen  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4586-2
- 323 **Thorsten Klein:** Agiles Engineering im Maschinen- und Anlagenbau  
284 Seiten - ISBN 978-3-8316-4598-5
- 324 **Markus Wiedemann:** Methodik zur auslastungsorientierten Angebotsterminierung für hochvariante Produkte mit kundenindividuellen Leistungsanteilen  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-4599-2
- 325 **Harald Kraus:** Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen durch schichtweise thermografische In-Process-Überwachung  
304 Seiten - ISBN 978-3-8316-4628-9
- 326 **Stefan Krottil:** Online-Simulation von fluidischen Prozessen in der frühen Phase der Maschinen- und Anlagenentwicklung  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4636-4
- 327 **Andreas Roth:** Modellierung des Rührreißschweißens unter besonderer Berücksichtigung der Spalttoleranz  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4639-5
- 328 **Philipp Benjamin Michaeli:** Methodik zur Entwicklung von Produktionsstrategien am Beispiel der Triebwerksindustrie  
288 Seiten - ISBN 978-3-8316-4642-5
- 329 **Michael Richard Niehues:** Adaptive Produktionssteuerung für Werkstattfertigungssysteme durch fertigungsbegleitende Reihenfolgebildung  
314 Seiten - ISBN 978-3-8316-4650-0
- 330 **Johannes Stock:** Remote-Laserstrahltrennen von kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4662-3
- 331 **Andreas Fabian Hees:** System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme  
218 Seiten - ISBN 978-3-8316-4676-0