

Theresa Breckle

Digitale intervallbasierte Planung
und Bewertung manueller
Montagesysteme in der
Konzeptplanungsphase

Digitale intervallbasierte Planung und Bewertung manueller Montagesysteme in der Konzeptplanungsphase

DISSERTATION
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
Dipl.-Ing. (FH) Theresa Breckle, MBA
aus Heilbronn

eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität Siegen
Siegen 2021

Betreuer und erster Gutachter
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Manns
Universität Siegen

Zweiter Gutachter
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Oec. Ulrich Stache
Universität Siegen

Tag der mündlichen Prüfung
24. August 2021

Theresa Breckle

**Digitale intervallbasierte Planung und
Bewertung manueller Montagesysteme
in der Konzeptplanungsphase**

Shaker Verlag
Düren 2021

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.: Siegen, Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8274-6

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Theresa Breckle

Digitale intervallbasierte Planung und Bewertung manueller Montagesysteme in der Konzeptplanungsphase

Dissertation, Universität Siegen

Kurzfassung

Eine steigende Dynamik durch Wettbewerbsdruck und Globalisierung der Märkte und ein immer schwerer vorhersagbares Verhalten der Kunden stellt hohe Anforderungen an produzierende Unternehmen. Dies zwingt sie in kurzer Zeit auf Veränderungen zu reagieren. Eine wesentliche Planungsaufgabe der Unternehmen, die ihre Produkte montieren, stellt die Planung der Montagesysteme dar. Diese umfangreiche Planungsaufgabe wird durch eine Vielzahl unternehmensinterner und -externer Parameter beeinflusst. In der frühen Planungsphase der Montagesysteme sind die Anforderungen an die Planung hoch und die Eingabegrößen wie beispielsweise der Kundenbedarf unsicher.

Vor diesem Hintergrund wird in der vorliegenden Arbeit eine neuartige Methode zur Konzeptplanung von Montagesystemen in der Konzeptplanungsphase unter Berücksichtigung intervallbasierter Kundenbedarfe entwickelt. Diese unterstützt den Planenden in der ersten Planungsphase der Montagesysteme, um robuste Planungsalternativen zu evaluieren. Dabei werden unterschiedliche Planungsalternativen innerhalb des Entwurfsraums, der durch die Eingangsgrößen und das Kundenbedarfsintervall aufgespannt wird, ausgelegt. Sie berücksichtigen unterschiedliche Formen der Montageorganisation, wie beispielsweise ein Line-Balancing oder Einzelarbeitsplätze. Durch ein zweistufiges Line-Balancing können für intervallbasierte Kundenbedarfe Planungsalternativen optimiert werden. Dabei wurde das General Assembly Line Balancing (GALB) um die Parallelisierung einzelner Arbeitsstationen, deren Arbeitsinhalt die Taktzeit übersteigt, erweitert. Anschließend werden Ressourcen ausgewählt und diese in einem dreidimensionalen Layout positioniert. Die so entstandenen Planungsalternativen werden zunächst auf ihre Robustheit untersucht und anhand technischer und wirtschaftlicher Kennzahlen in einer multi-kriteriellen Bewertung evaluiert. Diese Bewertung liefert eine umfassende Planungs- und Entscheidungsbasis für den Planenden und die Entscheidenden. So ist eine Evaluierung robuster Montagesystemalternativen möglich.

Anhand exemplarischer Beispiele aus dem industriellen Umfeld wird der Einsatz der Methode durch eine prototypischen Umsetzung mit graphenbasierten Entwurfssprachen überprüft. Aus der Methodenentwicklung und der Praxisanwendung leiten sich weiterführende Forschungsfragestellungen ab.

Stichworte: Montagesystemplanung, Intervallbasierte Unsicherheit, Robuste Planung

Theresa Breckle

Digital interval-based design and evaluation of assembly systems for manual assembly within concept planning phase

Doctoral thesis, University of Siegen

Abstract

Growing dynamics due to competitive pressure and globalisation of the markets and increasingly unpredictable customer behaviour place high demands on manufacturing companies. This forces them to react to changes in a short time. An essential planning task for companies that assemble their products is the planning of assembly systems. This extensive planning task is influenced by a multitude of internal and external parameters. In the early planning phase of assembly systems, the challenges for planning are high and the input variables, such as customer demand, are often uncertain.

Considering this background, this thesis develops a method for dimensioning and structuring assembly systems in the concept planning phase, taking interval-based customer demands into account. This supports the planner in the initial planning phase of assembly systems in order to evaluate robust planning alternatives. In doing so, different planning alternatives are designed within the design space spanned by the input variables and the customer demand interval. Different forms of assembly organisation, such as line balancing or individual workstations, are taken into account. Appropriate pre-processing before line balancing can optimise planning alternatives for interval-based customer demands. In this process, General Assembly Line Balancing (GALB) was added with the option of parallelising workstations whose work content exceeds the cycle time. Resources are then selected and positioned in a three-dimensional layout. The resulting planning alternatives are first evaluated for their robustness and then assessed in a multi-criteria evaluation based on technical and economic key figures. This evaluation is extended to include robustness, which provides a comprehensive planning and decision-making basis for the planner and the decision-makers. Thus, an evaluation of robust assembly system alternatives is possible.

Using three exemplary industrial examples, the application of the method is presented with the help of a prototypical implementation using graph-based design languages. Further research questions are derived from the method development and the practical application.

Keywords: Assembly system design, interval-based uncertainty, robust planning

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand parallel zu meiner Zeit als akademische Mitarbeiterin an der Technischen Hochschule Ulm im Forschungsprojekt „Digitaler Produktlebenszyklus“ (DIP) als externe Doktorandin an der Universität Siegen.

Da eine wissenschaftliche Arbeit diesen Umfangs nie ganz allein das Werk eines einzelnen „Wissenschaftenden“ ist, bedanke ich mich bei allen von Herzen, die mich in dieser herausfordernden, aber auch sehr lohnenden Zeit, begleitet und unterstützt haben.

An erster Stelle danke ich meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Manns für die Möglichkeit zur Promotion, der hervorragenden Begleitung und Betreuung meiner Arbeit, die vielen wissenschaftlichen Gespräche und den Austausch auch über die Promotion hinaus. Das habe ich nie als selbstverständlich angesehen. Herzlichen Dank.

Besonders danke ich auch Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Oec. Ulrich Stache für die bereitwillige Übernahme des Zweitgutachtens. Vielen Dank für das Interesse an meiner Arbeit, den wertvollen Austausch und die Unterstützung während meiner Promotionszeit. Bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel bedanke ich mich herzlich für die Übernahme des Vorsitzes und bei Univ.-Prof. Dr. Ulf Lorenz für die Mitgliedschaft in der Promotionskommission. Der Technischen Hochschule danke ich für die - auch finanzielle - Unterstützung, dieses Promotionsvorhaben neben meiner Projektarbeit realisieren zu können. Bei Prof. Dr.-Ing. Jens Kiefer bedanke ich mich, meinen Betreuer überhaupt getroffen zu haben.

Allen Beteiligten des Projekts DIP danke ich für den regen Austausch und die gegenseitige Unterstützung bei den Entwurfssprachen, ebenso wie der Ingenieurgesellschaft für Intelligente Lösungen und Systeme mbH für die Nutzung des Entwurfscompilers DC43.

Ich danke Matthias Lamparter (Griffwerk GmbH) sowie Wolfgang Engelhardt und Sven Biberacher (Gardena Manufacturing GmbH) für den fachlichen Austausch und die zur Verfügung gestellten Anwendungsbeispiele.

Ein Dankeschön gilt den Korrekturlesenden: Meinem Mann Stefan, meinem Papa Dr.phil. Martin Hofmann, Prof. Dr.-Ing. Peter Scharf und Nina Groß, M.Eng. - vielen Dank für die konstruktive Kritik - sie hat meine Arbeit verbessert, sei es inhaltlich oder sprachlich.

Darüber hinaus gilt mein Dank meinen Eltern, allen Verwandten, Freunden und Bekannten - Ihr könnt euch nicht vorstellen, wie wichtig dieser Rückhalt für mich war.

Ein besonders lieber Dank gilt Jakob und Moritz. Eure Geduld, Unterstützung, Verständnis und Motivation bedeuten mir mehr, als sich irgendjemand überhaupt vorstellen kann. Das war schon immer so und beschränkt sich nicht nur auf die Dissertation.

Ganz besonders herzlich danke ich meinem Mann Stefan - für alles ♡

Ihr drei seid das Beste, dafür bin ich unglaublich dankbar. Euch widme ich diese Arbeit.

Ulm, im September 2021

Theresa Breckle

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungs- und Formelzeichenverzeichnis	X
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2 Thematische Einordnung und Abgrenzung des Untersuchungsbereichs . .	3
1.3 Vorgehensweise	7
2 Zielstellung und Aufbau der Arbeit	8
3 Konzeptplanung von Montagesystemen	10
3.1 Begriffsdefinitionen	10
3.1.1 Einordnung Produktionsmanagement	10
3.1.2 Montage und Montagesystem	11
3.2 Aufgaben der Konzeptplanung von Montagesystemen	14
3.2.1 Montageorganisation	16
3.2.2 Arbeitsteilung	18
3.2.3 Flächenberechnung	19
3.2.4 Zeitkalkulation	19
3.2.5 Wirtschaftlichkeit	20
4 Stand der Forschung und Technik	23
4.1 Planung und Bewertung von Montagesystemen	23
4.1.1 Methoden der Montageplanung und Bewertung	23
4.1.2 Herausforderungen der Konzeptplanung von Montagesystemen . .	27
4.2 Problem der Leistungsabstimmung	27
4.2.1 Ansätze mit heuristischen Verfahren	31
4.2.2 Ansätze mit exakten Verfahren	31
4.3 Planung von Montagesystemen unter Unsicherheit	35
4.4 Repräsentation und Ansätze zur Modellierung von Unsicherheit	36
4.4.1 Wahrscheinlichkeiten	37
4.4.2 Fuzzy-Mengen	38
4.4.3 Szenariotechnik	38
4.4.4 Robuste Planung	39
4.4.5 Intervalle	41
4.5 Ansätze für die Modellierung unsicherer Kundenbedarfe	42
4.6 Absatzprognose und Bedarfsermittlung	43

4.7	Intervallarithmetik	44
4.7.1	Grundlagen Intervallarithmetik	44
4.7.2	Unsicherheitsmodellierung mit Intervallen	46
4.7.3	Diskretisierung zum Daten-Preprocessing	47
4.8	Bewertung in der Montagesystemkonzipierung	48
4.8.1	Dimensionen der Bewertung von Montagesystemen	48
4.8.2	Methoden der multikriteriellen Bewertung	49
4.9	Digitale Planung von Montagesystemen	50
4.9.1	Definition und Ziele der Digitalen Fabrik	51
4.9.2	Modelle, Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik	51
4.9.3	Digitale Planungsmethoden	55
4.10	Defizite im Stand der Forschung	57
4.11	Ableitung Handlungsbedarf	59
5	Vorgehensweise der Methodenentwicklung und Ableitung der Anforderungen	61
5.1	Lösungsansatz	61
5.2	Methodisches Vorgehen	62
5.3	Verifikation und Validierung	62
5.4	Ableitung der Anforderungen	63
5.4.1	Anforderungen an die Integration intervallbasierter Kundenbedarf	65
5.4.2	Anforderungen Evaluierung robuster Montagesystemalternativen .	68
5.4.3	Anforderungen an Modelle	70
6	Methode zur Konzeptplanung manueller Montagesysteme	73
6.1	Neuartigkeit der Methode	73
6.2	Grundaufbau und Definitionen	74
6.3	Einbindung der Methode in Planungsprozess	75
6.3.1	Planungsgrundlagen und Planungsziele	76
6.3.2	Gestaltungsmerkmale von Montagesystemen	77
6.3.3	Aufbau der Methode	79
6.3.4	Berechnung und Bewertung der Leistungsmerkmale	85
6.4	Methode für die Konzeptplanung mit intervallbasierten Kundenbedarfen .	85
6.4.1	Eingabegrößen	85
6.4.2	Dimensionierung Mengen- und Artteilung	87
6.4.3	Dimensionierung Line-Balancing	91
6.4.4	Strukturierung	104
6.4.5	Zeitkalkulation	108
6.4.6	Wirtschaftlichkeit	108
6.5	Entwicklung einer multikriteriellen robusten Bewertungsmethode	110
6.5.1	Kennzahlen für die Bewertung	111
6.5.2	Bewertungsmethode	112
6.5.3	Entscheidungsgrundlage	112
6.6	Verifikation der entwickelten Methode	113

7	Digitale Umsetzung der Methode durch graphenbasierte Entwurfssprachen	114
7.1	Graphenbasierte Entwurfssprachen	114
7.1.1	Einführung	114
7.1.2	Informationsarchitektur	115
7.1.3	Bestandteile graphenbasierter Entwurfssprachen	117
7.2	Prototypische Umsetzung der entwickelten Methode	120
7.2.1	Rahmenbedingungen und Softwareeinsatz	120
7.2.2	Prozessbeschreibung der graphenbasierten Entwurfssprache	121
7.3	Verifikation der digitalen Umsetzung	128
8	Validierung der entwickelten Methode	129
8.1	Validierungsbeispiel Self-balanced Scooter	129
8.1.1	Produkt- und Montagebeschreibung Self-balanced Scooter	129
8.1.2	Ergebnisse Montagesystemkonzept für Self-balanced Scooter	130
8.1.3	Manuell geplantes Montagesystem Self-balanced Scooter	132
8.1.4	Vergleich Validierungsergebnisse Self-balanced Scooter	132
8.2	Validierungsbeispiel Schlauchwagen	134
8.2.1	Produkt- und Montagebeschreibung Schlauchwagen	134
8.2.2	Ergebnisse Montagesystemkonzept für Schlauchwagen	135
8.2.3	Umgesetzte Montagelösung für Schlauchwagen	136
8.2.4	Vergleich Validierungsergebnisse Schlauchwagen	138
8.3	Validierungsbeispiel Türgriff	139
8.3.1	Produkt- und Montagebeschreibung Türgriff	140
8.3.2	Ergebnisse Montagesystemkonzept für Türgriff	141
8.3.3	Umgesetztes Montagesystem für Türgriff	142
8.3.4	Vergleich Validierungsergebnisse Türgriff	143
9	Diskussion und kritische Würdigung	145
9.1	Planungsmethode mit intervallbasierten Kundenbedarfen	145
9.2	Evaluierung robuster Planungsalternativen	148
9.3	Digitale Umsetzung der entwickelten Methode	149
9.4	Anwendungsnutzen im praktischen und industriellen Umfeld	150
10	Zusammenfassung und Ausblick	151
10.1	Zusammenfassung	151
10.2	Ausblick	153
	Literatur	154

Anhang

A Überblick SADT der Teilmodelle	183
B Ergänzungen Entwurfssprache	186
C Verifikationsberechnungen	187
C.1 Anforderungen an die Methode zur intervallbasierten Konzeptplanung . .	187
C.2 Anforderungen an die Bewertung	189
D Ergänzungen Validierungsbeispiele	191
D.1 Validierungsbeispiel Self-balanced Scooter	191
D.2 Validierungsbeispiel Schlauchwagen	192
D.2.1 Übersicht verwendete Ressourcen für Schlauchwagen	192
D.3 Validierungsbeispiel Türgriff	196