

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Oliver Jonathan Brützel

**Decision Support System for the
Optimisation of Global Production Networks**
Development of a Digital Twin for Product
Allocation and Robust Line Configuration

Band 281



Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze
Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Oliver Jonathan Brützel

**Decision Support System
for the Optimisation of
Global Production Networks**
Development of a Digital Twin
for Product Allocation and Robust Line Configuration

Band 281

**Decision Support System
for the Optimisation of
Global Production Networks**
Development of a Digital Twin
for Product Allocation and Robust Line Configuration

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

bei der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

Dissertation

von

Oliver Jonathan Brützel, M.Sc.

aus Düsseldorf

Tag der mündlichen Prüfung: 14.05.2024

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Korreferent: Prof. Dr. Aydin Nassehi

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2024

Copyright Shaker Verlag 2024

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9596-8

ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer, nachhaltiger und wirtschaftlicher Technologien stellt den entscheidenden Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen dar. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung sowie mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung von Produktionssystemen und -netzwerken. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Preface of the author

I am deeply grateful to everyone who supported me while writing this thesis during my time as a research associate at the wbk Institute of Production Science. I want to extend my sincere appreciation to my supervisor, Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza, for her invaluable guidance and assistance, which played a crucial role in the successful completion of this thesis. I am also indebted to Prof. Aydin Nassehi for hosting me, engaging in fruitful discussions, and posing insightful questions that greatly enhanced the quality of my work.

I want to acknowledge and express my gratitude to my colleagues at Bosch, my research partner, whose collaboration was essential in realising this thesis. Specifically, I want to thank Sebastian Brück, Markus Deines, Alexander Haussner, Annette Weise, Oliver Romoser, and Andreas Heupel for their contributions and support. My colleagues at wbk were a constant source of motivation and inspiration, and I am thankful for their countless discussions. I want to extend my heartfelt thanks to Leonard Overbeck, Michael Martin, Moritz Hörger, Andreas Kuhnle, Nicole Stricker, Marvin Carl May, and Martin Benfer, among others.

During my time at wbk, I had the privilege of advising several students, and their projects had a lasting impact on my research. I am particularly grateful to Christian Rädler, Florian Küppers, Daniel Völkle, Ghassen Maatoug, Emmanuel Hemeury, Johannes Hartmann, Nikolai Delkof, Dietrich Sachsenweger, Dhia-Eddin Bouzidi, Anthony Foran, and Kimon Schmidt for their valuable work.

I want to express my thanks to the Karlsruhe House of Young Scientists (KHYS) for funding my research stay in Bristol, UK. I am sincerely appreciative of my parents, who have consistently supported me throughout my life, providing me with the freedom to learn and grow.

Lastly, but certainly not least, I want to express my heartfelt gratitude to my wife, Anika, for her unwavering support in all situations, her invaluable advice, and her enduring love.

Karlsruhe 17.03.2024

Oliver Brützel

Abstract

The accelerated pace of product life cycles and heightened competition in products like microprocessors, semiconductors, and automobiles necessitate cost-effective strategies. To address this, companies globally distribute production sites, creating challenges in aligning product allocation with long-term network planning decisions. Increasingly, model-based decision support systems (DSS) are adopted to enhance planning reliability amid complexity. The inherent uncertainty of demand further complicates global production network (GPN) configurations. Motivated by the author's practical experience at Bosch, this thesis explores GPN planning complexities, focusing on model-based DSS to improve collaboration and responsiveness in adapting to the dynamic industry landscape.

This thesis introduces an innovative approach to address critical gaps in industrial GPNs. By incorporating and quantifying outcomes through multiple demand scenarios, the thesis focuses on flexibility within the network model, particularly volume and product mix flexibility in production systems.

The thesis also addresses the challenge of determining representative scenarios in stochastic models, proposing a methodology to enhance solution robustness and revealing shifts in the cost structure.

Practical adoption challenges in implementing Decision Support Systems (DSS) in GPNs are explored, including design considerations, user experiences, training, data governance, and organisational change management.

The thesis also navigates the integration of data from diverse sources to construct effective digital twins for GPNs, enhancing data collection methods and providing advantages such as time reduction, performance scalability, and improved reliability.

The implemented components have proven effective in addressing real-world industrial needs, exemplified by their successful application at Robert Bosch GmbH. The outcome resulted in a DSS successfully deployed for various GPNs. The approach is highly adaptable, and application to further GPNs at Bosch is planned.

Kurzzusammenfassung

Beschleunigte Produktlebenszyklen und ein verschärfter Wettbewerb bei Produkten wie Mikroprozessoren, Halbleitern und Automobilen machen kosteneffiziente Strategien erforderlich. Um dem entgegenzuwirken, verteilen die Unternehmen ihre Produktionsstätten global, was die Koordinierung der Auftragsallokation mit Entscheidungen über die mittel- bis langfristige Netzwerkplanung zu einer Herausforderung macht. Um die Planungssicherheit in diesem komplexen Umfeld zu erhöhen, werden zunehmend modellbasierte Entscheidungsunterstützungssysteme (DSS) eingesetzt. Die inhärente Unsicherheit der Nachfrage erschwert die Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke (GPN) zusätzlich. Motiviert durch die praktischen Erfahrungen des Autors bei Bosch, untersucht diese Thesis die Komplexität der GPN-Planung und konzentriert sich dabei auf modellbasierte DSS, um die Zusammenarbeit und Reaktionsfähigkeit bei der Anpassung an die dynamische Industrielandschaft zu verbessern.

Diese Thesis präsentiert einen innovativen Ansatz, um kritische Lücken in komplexen GPNs zu schließen. Durch die Einbeziehung und Quantifizierung der Ergebnisse durch mehrere Nachfrageszenarien und durch die Berücksichtigung der Flexibilität des Volumens und des Produktmixes soll es möglich sein, auf unerwartete Ereignisse in der Zukunft schnell zu reagieren. Die Thesis befasst sich dazu mit der Herausforderung, repräsentative Szenarien in stochastischen Modellen zu bestimmen, und schlägt eine Methodik zur Verbesserung der Robustheit der Lösung und zur Erkennung von Verschiebungen in der Kostenstruktur vor.

Praktische Herausforderungen bei der Implementierung von DSS in GPNs werden untersucht, einschließlich Überlegungen zu Design, Benutzererfahrung, Schulung, Datenmanagement und organisatorischem Änderungsmanagement.

Die Thesis befasst sich schließlich mit der Integration von Daten aus verschiedenen Quellen, um effektive digitale Zwillinge für GPNs zu entwickeln, die die Methoden der Datenerfassung verbessern und Vorteile wie Zeitersparnis, Skalierbarkeit und verbesserte Zuverlässigkeit bieten.

Die implementierten Komponenten haben sich in der industriellen Praxis bewährt, wie der erfolgreiche Einsatz bei der Robert Bosch GmbH zeigt. Das Ergebnis ist ein DSS, das in verschiedenen GPNs erfolgreich eingesetzt wird. Der Ansatz ist in hohem Maße anpassbar und es ist geplant, ihn auf weitere GPNs bei Bosch anzuwenden.

Table of Contents

Table of Contents	I
Abbreviations and Symbols	IV
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problem Statement	2
1.3 Research Objectives	4
1.4 Research Structure	4
2 Fundamentals	6
2.1 Production Planning in Global Production Networks	6
2.1.1 Tasks in Production Networks	8
2.1.2 Product Allocation in the GPN	12
2.1.3 Operations Research in Production Planning	13
2.2 Consideration of Environmental Conditions	17
2.2.1 Change Drivers	18
2.2.2 Scenario Analysis	19
2.2.3 Consideration of Uncertainty in Planning	25
2.2.4 Robustness	27
2.3 Decision Support Systems	29
2.3.1 Data Visualisation	32
2.3.2 Maturity Models	33
2.4 Data Integration	34
2.4.1 Production Data Generation and Collection	35
2.4.2 Digital Twins	36
3 State of Research	38
3.1 Existing Approaches	38
3.1.1 Modelling of Flexibility in GPN	38
3.1.2 Robust Solutions	40

3.1.3	Integration with the Planning Process	46
3.1.4	Data Integration	52
3.2	Research Deficit	55
4	Framework for DSS to Identify Robust Decisions in GPN	58
4.1	Model Design	59
4.1.1	Sets	60
4.1.2	Parameters	61
4.1.3	Variables	61
4.1.4	Objective Function	62
4.1.5	Constraints	64
4.2	Method to Forecast Representative Production Demand Scenarios	69
4.2.1	Identifying Change Drivers	69
4.2.2	Monte Carlo Simulation	69
4.2.3	Scenario Reduction	70
4.3	Method for Identifying Robust Decisions	72
5	Implementation	74
5.1	Software Implementation to Solve the Proposed MILP	77
5.2	Organisational Concept	79
5.3	Development of a User Interface	83
5.3.1	Input Sheet	83
5.3.2	Webtool for Optimisation	87
5.4	Data Model of the Digital Twin of GPNs	88
5.4.1	Structure of the Data Model	88
5.4.2	Database Connection	91
5.5	Results Presentation	93
5.5.1	Result Data Import	93
5.5.2	Summary of Data from Optimisation	94
5.5.3	Filters	96
5.5.4	Single Scenario Visualisations	97

5.5.5	Multi Scenario Visualisations	108
5.6	Cross-functional Logistics Interface	113
6	Industrial Validation	116
6.1	Application of the Framework to Identify Robust Decisions in GPN	116
6.1.1	Network Design	117
6.1.2	Forecasting of Representative Demand Scenarios	117
6.1.3	Application of the Method to Identify Robust Decisions	122
6.1.4	Industrial Application of the Methodology for Identifying Robust Decisions	125
6.1.5	Evaluation of Flexibility Restriction without Forecasting	126
6.2	Success Stories	128
6.2.1	Decision on the Allocation of a New Product in an Existing GPN	128
6.2.2	Decision on Reallocation of a Production Line	130
6.3	Maturity Model for DSS as Digital Twins in GPN	133
6.3.1	Maturity Levels of Usage	133
6.3.2	Maturity Levels of Automation	134
6.3.3	Assessment of the Current Maturity Level	135
6.3.4	Evaluation of the Maturity Level for Different GPN	136
7	Conclusion and Research Perspectives	139
8	Summary	143
	Own Publications	I
	References	III
	List of Figures	XX
	List of Tables	XXIV
	Appendix	XXV