

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

Marvin Carl May

**Intelligent production control for  
time-constrained complex job shops**

Band 278

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

Marvin Carl May

**Intelligent production control  
for time-constrained complex job shops**

Band 278



## **Intelligent production control for time-constrained complex job shops**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)**  
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenomme

**Dissertation**

von

Marvin Carl May, M.Sc. M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 21.12.2023

Hauptreferentin: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza (KIT)

Korreferent: Prof. Tullio Tolio (POLIMI)

**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., 2023

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 978-3-8440-9464-0

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](http://www.shaker.de) • e-mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort der Herausgeber**

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



## **Vorwort des Verfassers**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Beschäftigung als akademischer Mitarbeiter des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) am wbk Institut für Produktionstechnik.

Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza gilt mein besonderer Dank für die Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit als Hauptreferentin. Darüber hinaus bedanke ich mich für die Förderung und die zur persönlichen Entwicklung unerlässliche Rückmeldung sowie das Vertrauen, mir Gestaltungsfreiraum zu gewähren, der über das selbstverständliche Maß weit hinausgeht. Weiterhin danke ich Prof. Tullio Tolio für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferates, sowie Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans für die Übernahme des Prüfungsvorsitz.

Dem InnovationsCampus Mobilität der Zukunft danke ich für die Förderung meines Forschungsaufenthaltes an der National University of Singapore. Mein ganz besonderer Dank gilt Frau Prof. Soh Khim Ong und Herrn Prof. Andrew Y.C. Nee und ihrem Team für die herausragende Gastfreundschaft und die vielen anregenden wissenschaftlichen Diskussionen.

Dem Karlsruher House of Young Scientists danke ich für die Förderung meines Forschungsaufenthaltes an der University of Texas at Austin in den USA. Ebenso gilt mein Dank Herrn Prof. Dragan Djurdjanovic und seinem Team für die herzliche Gastfreundschaft und die anregenden wissenschaftlichen Diskussionen.

Allen Studierenden, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich danken. Besonders seien hier Lars Kiefer, Jan Oberst, Lukas Behnen und Sören Maucher genannt, deren Durchhaltevermögen einen entscheidenden Beitrag leisteten. Den Kolleginnen und Kollegen des wbk, vor allem im Bereich PRO, gilt zudem mein besonderer Dank. Der Gruppenzusammenhalt und die Möglichkeit zum Austausch haben diese Arbeit erst ermöglicht. Besonders seien die Kolleginnen und Kollegen des PSP-Teams erwähnt, deren tägliche Anteilnahme entscheidend zum Gelingen meiner Arbeit beitrugen. Sebastian Behrendt und Yannik Hermann danke ich herzlichst für ihre Akribie und Muße bei der Korrektur. Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie für ihre unendliche Unterstützung bedanken.

Karlsruhe, 21.12.2023

Marvin Carl May





## Zusammenfassung

Im Zuge der zunehmenden Komplexität der Produktion wird der Wunsch nach einer intelligenten Steuerung der Abläufe in der Fertigung immer größer. Sogenannte Complex Job Shops bezeichnen dabei die komplexesten Produktionsumgebungen, die deshalb ein hohes Maß an Agilität in der Steuerung erfordern. Unter diesen Umgebungen sticht die besonders Halbleiterfertigung hervor, da sie alle Komplexitäten eines Complex Job-Shop vereint. Deshalb ist die operative Exzellenz der Schlüssel zum Erfolg in der Halbleiterindustrie. Diese Exzellenz hängt ganz entscheidend von einer intelligenten Produktionssteuerung ab. Ein Hauptproblem bei der Steuerung solcher Complex Job-Shops, in diesem Fall der Halbleiterfertigung, ist das Vorhandensein von Zeitbeschränkungen (sog. time-constraints), die die Transitionszeit von Produkten zwischen zwei, meist aufeinanderfolgenden, Prozessen begrenzen. Die Einhaltung dieser produktspezifischen Zeitvorgaben ist von größter Bedeutung, da Verstöße zum Verlust des betreffenden Produkts führen. Der Stand der Technik bei der Produktionssteuerung dieser Dispositionsentscheidungen, die auf die Einhaltung der Zeitvorgaben abzielen, basiert auf einer fehleranfälligen und für die Mitarbeiter belastenden manuellen Steuerung. In dieser Arbeit wird daher ein neuartiger, echtzeitdatenbasierter Ansatz zur intelligenten Steuerung der Produktionssteuerung für time-constrained Complex Job Shops vorgestellt. Unter Verwendung einer jederzeit aktuellen Replikation des realen Systems werden sowohl je ein uni-, multivariates Zeitreihenmodell als auch ein digitaler Zwilling genutzt, um Vorhersagen über die Verletzung dieser time-constraints zu erhalten. In einem zweiten Schritt wird auf der Grundlage der Erwartung von Zeitüberschreitungen die Produktionssteuerung abgeleitet und mit Echtzeitdaten anhand eines realen Halbleiterwerks implementiert. Der daraus resultierende Ansatz wird gemeinsam mit dem Stand der Technik validiert und zeigt signifikante Verbesserungen, da viele Verletzungen von time-constraints verhindert werden können. Zukünftig soll die intelligente Produktionssteuerung daher in weiteren Complex Job Shop-Umgebungen evaluiert und ausgerollt werden.



## **Abstract**

In wake of an ever increasing complexity the desire to move towards intelligently controlling operations is amplified in manufacturing. Complex job shops mark the most complex production environments that require a high degree of agility to control. Among these complex manufacturing environments semiconductor manufacturing stands out as it combines all complexities to form a truly complex job shop. Hence, operational excellence is the key to success and relies on intelligent production control. A major concern in controlling such complex job shops, in this case semiconductor wafer fabrication, is the presence of time-constraints that limit the transition time of products between two, mostly successive, processes. Adhering to these product specific time-constraints is of utmost importance as violations result in scrapping the violating product. The state-of-the-art production control of these dispatching decisions that aim at adhering to time-constraints is based on error-prone manual control that is stressful for human operators. Thus, within this thesis a novel, real-time data based approach for intelligently controlling production control for time-constrained complex job shops is presented. Using an up-to-the-minute replica of the real system both uni-, multi-variate time series models and a digital twin are used to obtain violation predictions. As a second step, based on the time-constraint violation expectancy the production control is derived and implemented with a real-world semiconductor manufacturing plant real-time data. The resulting approach is, therefore, validated against the state-of-the-art showing significant improvements as many time-constraint violations could be prevented. In future, thus, intelligent production control should be evaluated and rolled out in more complex job shop settings.



# Contents

<b>Contents</b>	<b>I</b>
<b>Abbreviations</b>	<b>IV</b>
<b>Formula symbols</b>	<b>VI</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	2
1.2 Problem statement . . . . .	3
1.3 Research hypothesis . . . . .	4
1.4 Structure of this work . . . . .	5
<b>2 Fundamentals</b>	<b>6</b>
2.1 Semiconductor Manufacturing . . . . .	7
2.1.1 Semiconductor fabrication technology . . . . .	8
2.1.2 Frond-end wafer fabrication . . . . .	14
2.1.3 Time-constraints in Semiconductor Manufacturing . . . . .	17
2.1.4 Summary: Semiconductor manufacturing complexities and requirements	19
2.2 Production planning and control . . . . .	20
2.2.1 Key Performance Indicators . . . . .	21
2.2.2 Production Planning and Control tasks . . . . .	22
2.2.3 Complex Job Shops and Production Planning and Control . . . . .	26
2.2.4 Semiconductor Production Planning and Control . . . . .	26
2.2.5 Summary: Solution approach requirements . . . . .	30
2.3 Quantitative optimization methods . . . . .	31
2.3.1 Mathematical optimization . . . . .	32
2.3.2 Heuristics and metaheuristics . . . . .	34
2.3.3 Artificial Intelligence . . . . .	35
2.3.4 Machine Learning . . . . .	38
2.3.5 Predictions with Time Series Models . . . . .	48
2.3.6 Summary: Quantitative methods to optimize production control . . . . .	51
2.4 Production system Digital Twin . . . . .	52
2.4.1 Production system simulation . . . . .	52
2.4.2 Foresighted Digital Twins . . . . .	53
2.4.3 Knowledge Graph based Digital Twins . . . . .	54
2.4.4 Summary: Simulations as Digital Twins for production control . . . . .	57

<b>3</b>	<b>State-of-the-art literature review</b>	<b>59</b>
3.1	Literature review of focus areas . . . . .	59
3.1.1	Digital twins for intelligent production control . . . . .	60
3.1.2	Dealing with time-constraints in capacity planning and scheduling . . . . .	62
3.1.3	Adhering to time-constraints in dispatching in complex job shops . . . . .	67
3.1.4	Implementing learning based production control in job shops for time-constraints . . . . .	70
3.2	Research deficit . . . . .	70
<b>4</b>	<b>Intelligent Production Control for time-constrained complex job shops</b>	<b>76</b>
4.1	Problem scope and assumptions . . . . .	77
4.2	Modeling the production system . . . . .	78
4.2.1	Relevant system elements . . . . .	79
4.2.2	Simulation and foresighted digital twin modeling . . . . .	81
4.2.3	Transitional modeling approach . . . . .	92
4.3	Intelligent production control architecture for time-constraint adherence . . . . .	95
4.3.1	Control flow architecture . . . . .	95
4.3.2	Intelligent production control for time-constraint gate keeping decisions . . . . .	97
4.3.3	Implementation of time-constraint gate keeping decisions in operations . . . . .	104
4.4	Transition time and adherence prediction . . . . .	105
4.4.1	Time-constraint adherence prediction with foresighted digital twin . . . . .	106
4.4.2	Time-constraint adherence prediction with transition model . . . . .	108
4.4.3	Obtaining Prediction Intervals for time-series . . . . .	111
4.5	Performance evaluation for prediction and prediction interval benchmarks . . . . .	124
4.5.1	Foresighted digital twin computational performance . . . . .	124
4.5.2	State-of-the-art and predictor benchmark performance . . . . .	126
4.5.3	Prediction interval model evaluation . . . . .	129
4.6	Summary of the overall approach and framework . . . . .	132
<b>5</b>	<b>Evaluation and computational results</b>	<b>136</b>
5.1	Semiconductor fab as a complex job shop application and benchmark . . . . .	137
5.2	Performance evaluation of time-constraint adherence . . . . .	138
5.2.1	Performance metrics for the evaluation of Prediction Interval Quality . . . . .	139
5.2.2	Performance metrics for the binary classification evaluation . . . . .	140
5.3	Evaluation of Foresighted Digital Twin-based production control approach . . . . .	140
5.3.1	Evaluation of the simulation model prediction . . . . .	141
5.3.2	Evaluation of binary classification . . . . .	142
5.4	Evaluation of transitional model based production control approach . . . . .	143

---

5.4.1	Evaluation of the influence of multi-variate prediction intervals . . . . .	145
5.4.2	Evaluation of binary classification . . . . .	146
5.5	Summary of evaluation and computational results . . . . .	149
<b>6</b>	<b>Discussion and Outlook</b>	<b>151</b>
6.1	Discussion . . . . .	151
6.2	Outlook and further considerations . . . . .	155
<b>7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>157</b>
<b>8</b>	<b>List of own publications</b>	<b>158</b>
<b>9</b>	<b>References</b>	<b>163</b>
	<b>List of Figures</b>	<b>188</b>
	<b>List of Tables</b>	<b>192</b>
	<b>Appendices</b>	<b>X</b>
A1	Additional data analysis of the real-world semiconductor manufacturing dataset	X
A2	Additional experimental evaluation of transition time prediction . . . . .	XII
A3	Additional experimental evaluation of time-constraint adherence prediction . . .	XIV