

Nicolas Johannes Lutz

Integration virtueller Methoden in das Anlaufmanagement skalierbarer Fertigungssysteme



RWTHAACHEN
UNIVERSITY

Integration virtueller Methoden in das Anlaufmanagement skalierbarer Fertigungssysteme

Integration of Virtual Methods in the Ramp-Up Management of Scalable Manufacturing Systems

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Nicolas Johannes Lutz

Berichter/in:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker, MBA
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Heinrich Schmitt

Tag der mündlichen Prüfung: 26. November 2021

ERGEBNISSE AUS DER ELEKTROMOBILPRODUKTION

Nicolas Johannes Lutz

Integration virtueller Methoden
in das Anlaufmanagement skalierbarer
Fertigungssysteme

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker, MBA

Band 19



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

Nicolas Johannes Lutz:

Integration virtueller Methoden in das Anlaufmanagement skalierbarer
Fertigungssysteme

1. Auflage, 2022

Apprimus Verlag, Aachen, 2022

Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen

Steinbachstr. 25, 52074 Aachen

Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

ISBN 978-3-98555-036-4

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2021)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Doktorand bei der BMW Group in München im Bereich der Planung und Produktion elektrischer Antriebssysteme in enger Kooperation mit dem Lehrstuhl Production Engineering of E-Mobility Components der RWTH Aachen.

Mein größter Dank gilt meinem Doktorvater und Vorbild, Herrn Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker, welcher mir die Möglichkeit der Erstellung dieser Arbeit schaffte. Sein Vertrauen und der enge inhaltliche Austausch waren Grundlage für das Gelingen dieser Arbeit. Ich möchte mich für die Anregungen und die Übernahme des Koreferates bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt herzlich bedanken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Johannes Schleifenbaum danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Der Austausch und die inhaltlichen Diskussionen mit den Kollegen am Lehrstuhl für Production Engineering of E-Mobility Components haben maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen. Für außerordentliche Unterstützung durch kritisches und ehrliches Feedback zum Inhalt der Arbeit sowie organisatorische Meisterleistungen danke ich Frau Dr.-Ing. Saskia Wessel.

Herrn Franz Heydner danke ich für die Chance der Anfertigung meiner Arbeit in seinem Team, den gewährten Freiraum während meiner Tätigkeit bei der BMW Group und die Möglichkeit zur Erforschung des Themas in laufenden Projekten. Herrn Dr.-Ing. Martin Hehl danke ich ganz besonders für frequentes Feedback zum Inhalt der Arbeit und die Unterstützung während des gesamten Promotionsprozesses.

Ich bedanke mich bei allen Kollegen der BMW Group für regen Austausch und offene Gespräche. Insbesondere möchte ich mich bei Jens Niemann, Tillmann Möller, Matthias Bildhauer, Valentin Gauckler, Michaela Reibetanz, Simon Heine, Dekai Xiao und Heiko Wirtz bedanken.

Schließlich möchte ich mich herzlich bei meinen Freunden und meiner Familie bedanken. Thomas Scheuer und Thomas Schwarberg danke ich für mentalen Beistand und strukturelles Feedback. Meine Eltern haben meinen bisherigen Lebensweg immer mit allen Mitteln unterstützt und maßgeblich zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen.

Inhaltsübersicht

Inhaltsverzeichnis	I
--------------------------	---

Verzeichnis der Abbildungen	IX
-----------------------------------	----

Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen.....	XV
--	----

1 Einleitung	1
---------------------------	----------

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	4
1.3 Forschungsfrage	4
1.4 Wissenschaftstheoretische Einordnung der Arbeit	5
1.5 Aufbau der Arbeit	7

2 Grundlagen des Betrachtungsbereichs	11
--	-----------

2.1 Grundlagen der Produktion von Elektromotoren.....	11
2.2 Wandlungsfähige Produktion	28
2.3 Digitale Produktion	51
2.4 Systemarchitektur zur Produktionsdatenanbindung	61
2.5 Handlungsbedarf aus der Praxis.....	70

3 Grundlagen des Gestaltungsbereichs	77
---	-----------

3.1 Bestehende Ansätze im Anlaufmanagement.....	77
3.2 Bestehende Ansätze zur Wandlungsfähigkeit	84
3.3 Bestehende Ansätze der Digitalen Fabrik.....	92
3.4 Bestehende Ansätze zur Systemarchitektur der Datenanbindung	101
3.5 Zusammenfassende Bewertung bestehender Ansätze und weiterer Forschungsbedarf	109

4 Konzeption der Methodik.....	115
4.1 Methodische Grundlagen.....	115
4.2 Anforderungen an die Methodik.....	118
4.3 Konzeptentwurf der Gesamtmethodik.....	122
5 Detaillierung der Methodik.....	129
5.1 Auswirkung von Komplexität bei Wiederanläufen.....	129
5.2 Einführung virtueller Inbetriebnahme in die Serienplanung von Fertigungssystemen.....	140
5.3 Analyse, Bewertung und Realisierung von Anwendungsfällen.....	155
5.4 Realdatenanbindung bei der VIBN	175
5.5 Parameteroptimierung von Verhaltensmodellen mit Realdaten	189
5.6 Prozessseitige Optimierung der VIBN	207
6 Validierung	215
6.1 Auswahl des Fallbeispiels.....	215
6.2 Fallbeispiel: Fertigungssystem elektrischer Antrieb (Elektromotor)	215
6.3 Kritische Reflexion	246
7 Zusammenfassung	249
8 Literaturverzeichnis.....	253
9 Anhang	273
9.1 Realdaten.....	287
9.2 Ergänzende Simulationsdaten.....	295

Zusammenfassung

Die fortschreitende Elektrifizierung der Flotten in der Automobilindustrie erfordert eine effiziente Großserienproduktion des elektrischen Antriebsstrangs. Neue Produktionstechnologien und fortschreitende Entwicklungen der Produkte verlangen eine flexible und kosteneffiziente Anpassung aufzubauender Produktionskapazitäten. Dabei senken skalierbare Fertigungssysteme initiale Investitionskosten und erhalten die Anpassungsfähigkeit an Technologiesprünge. Insbesondere teure Inbetriebnahmephase durch die Integration neuer Fertigungsstationen und deren Software treten regelmäßig auf. Die effiziente Gestaltung der Umbauphase wird durch den gesamthaften Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme in Projekten zwischen Automobilbau und Anlagenbau als adäquates Werkzeug unterstützt.

Der wesentliche Beitrag der vorliegenden Forschungsarbeit ist die Integration der virtuellen Inbetriebnahme in Projekte skalierbarer Fertigungssysteme. Die technologische Weiterentwicklung durch reale Produktionsdaten wird methodisch vorbereitet. Vor allem die wirtschaftliche Einführung virtueller Methoden in komplexe Planungsprojekte zwischen Anlagenlieferant und Anlagenkunde muss fokussiert betrachtet werden. Dabei wird ein Beitrag zur Senkung der Kosten durch verkürzte Produktionsunterbrechungen bei gleichbleibender Qualität und Stückzahl geleistet. Zentraler Aspekt ist die Vorbereitung von Organisationseinheiten im Bereich der Produktion elektrischer Antriebssysteme zur effizienteren Gestaltung zukünftiger Planungsprojekte skalierbarer Fertigung durch virtuelle Methoden.

Summary

The advancing electrification of fleets in the automotive industry requires efficient large-scale production of the electric drive train. New production technologies and progressive product developments demand flexible and cost-efficient adaptation of the production capacities to be built up. Thereby scalable manufacturing systems lower initial investment costs and maintain the ability to adapt to technological advances. In particular, expensive commissioning phases due to the integration of new stations and their software occur more frequently. The efficient design of the renovation phases is supported by the overall use of virtual commissioning in projects between automobile construction and plant construction as an adequate tool.

The main contribution of this research work is the integration of virtual commissioning in projects of scalable manufacturing systems. Technological advancement through real production data is being prepared methodically. Above all, the economic introduction of virtual methods in complex planning projects between the system supplier and the system customer must be viewed in a focused manner. A contribution is made to lowering costs by shortened production interruptions while maintaining the same quality and quantity. The central aspect is the preparation of organizational units in the area of the production of electric drive systems for the more efficient design of future planning projects for scalable production using virtual methods.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Verzeichnis der Abbildungen	IX
Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen.....	XV
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	4
1.3 Forschungsfrage	4
1.4 Wissenschaftstheoretische Einordnung der Arbeit	5
1.4.1 Wissenschaftstheoretischer Bezugsrahmen.....	5
1.4.2 Forschungsmethodologie	6
1.5 Aufbau der Arbeit	7
2 Grundlagen des Betrachtungsbereichs	11
2.1 Grundlagen der Produktion von Elektromotoren.....	11
2.1.1 Arten von Elektromotoren	12
2.1.1.1 Asynchronmotor.....	12
2.1.1.2 Synchronmotor	14
2.1.1.3 Gleichstrommotor	15
2.1.2 Produktion von Elektromotoren	17
2.1.2.1 Gehäuse	18
2.1.2.2 Stator	20
2.1.2.3 Welle	23
2.1.2.4 Rotor	24
2.1.2.5 Endmontage	27

2.1.3	Zwischenfazit.....	28
2.2	Wandlungsfähige Produktion.....	28
2.2.1	Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen.....	29
2.2.2	Wandlungstreiber und Wandlungsbefähiger.....	32
2.2.2.1	Wandlungstreiber.....	32
2.2.2.2	Wandlungsbefähiger.....	34
2.2.3	Skalierbare Produktionssysteme.....	37
2.2.4	Anlaufmanagement skalierbarer Produktionssysteme.....	40
2.2.4.1	Begriffsbestimmung des Anlaufs und Anlaufmanagements.....	40
2.2.5	Zwischenfazit.....	50
2.3	Digitale Produktion.....	51
2.3.1	Digitale Fabrik.....	51
2.3.2	Digitaler Fabrikbetrieb.....	53
2.3.3	Virtuelle Inbetriebnahme.....	56
2.3.3.1	Vorgehen der VIBN.....	58
2.3.3.2	Modellierungstiefe.....	60
2.3.4	Zwischenfazit.....	61
2.4	Systemarchitektur zur Produktionsdatenbindung.....	61
2.4.1	Systemkomponenten zur Produktionsdatenbindung.....	62
2.4.2	Produktionsdatenerhebung.....	64
2.4.3	Optimierung von Simulationsmodellen.....	66
2.5	Handlungsbedarf aus der Praxis.....	70
2.5.1	Studie zu skalierbaren Produktionssystemen.....	70
2.5.2	Herausforderungen im Betrachtungsbereich.....	73
2.5.3	Zwischenfazit.....	76
3	Grundlagen des Gestaltungsbereichs.....	77
3.1	Bestehende Ansätze im Anlaufmanagement.....	77

3.1.1	Risikoorientiertes Anlaufmanagement nach NAGEL	77
3.1.2	Anlaufmanagementprozessmodell nach SCHOLZ-REITER.....	79
3.1.3	Performance-Measurement im Anlauf nach RENNER.....	80
3.1.4	Diskrete Migration als Anlaufstrategie für Montagesysteme nach GARTZEN	82
3.1.5	Ramp-Up Management in der Automobilindustrie nach TÜCKS	82
3.1.6	Aufwandsorientierte Gestaltung des Produktionsanlaufs nach MAUE	83
3.2	Bestehende Ansätze zur Wandlungsfähigkeit	84
3.2.1	Konzept eines wandlungsfähigen und modularen Produktionssystems nach RAUCH	84
3.2.2	Wandlungsfähige Produktionssysteme nach NYHUIS ET AL.	86
3.2.3	Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen nach VELKOVA	87
3.2.4	Strategische Leistungsplanung in wandlungsfähigen Produktionsstrukturen nach ALDINGER	88
3.2.5	System zur Produktionsplanung rekonfigurierbarer Produktionssysteme nach HEES	90
3.3	Bestehende Ansätze der Digitalen Fabrik.....	92
3.3.1	Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau nach KIEFER	92
3.3.2	Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen nach SPITZWEG	94
3.3.3	Modellbildung für die physikbasierte virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen nach LACOUR	95
3.3.4	Automatisierte Erstellung von Maschinenmodellen für die Hardware-in-the-Loop-Simulation von Montagemaschinen nach KUFNER	96
3.3.5	Systematik der VIBN von automatisierten Produktionssystemen nach BRÖKELMANN	97

3.3.6	Automatisierte Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen mit serviceorientierten Paradigmen nach ABEL	99
3.3.7	Virtuelle Inbetriebnahme für Industrie 4.0 zukunftssicher beherrschen nach STARK ET AL.	99
3.3.8	Vorgehen nach VDI 3693	100
3.4	Bestehende Ansätze zur Systemarchitektur der Datenanbindung	101
3.4.1	Synchronisation der virtuellen Produktion mittels Ankerpunktmethode nach TALKHESTANI, JAZDI ET AL.....	101
3.4.2	Prozessüberwachung zur Identifizierung von Änderungen nach ZIPPER, AURIS ET AL.	102
3.4.3	Dezentrale Prozessdatenanbindung durch Assistenzsysteme nach KLOCKE, BASSETT ET AL.....	104
3.4.4	Optimierung eines digitalen Zwillings mit Prozessdaten nach ZHANG, LIU ET AL.	105
3.4.5	Semantisches Metadatenmodell auf XML-Basis nach NEGRI, FUMAGALLI ET AL.....	106
3.4.6	Nächste Generation Digital Twin nach BOSCHERT, HEINRICH ET AL.	108
3.5	Zusammenfassende Bewertung bestehender Ansätze und weiterer Forschungsbedarf	109

4 Konzeption der Methodik 115

4.1	Methodische Grundlagen.....	115
4.1.1	Definition Methodik	115
4.1.2	Modelltheorie und Systemtechnik.....	116
4.2	Anforderungen an die Methodik.....	118
4.2.1	Inhaltliche Anforderungen.....	118
4.2.2	Formale Anforderungen.....	119
4.2.3	Modellierungssprache	120
4.3	Konzeptentwurf der Gesamtmethodik.....	122
4.3.1	Auswirkung von Komplexität bei Wiederanläufen	123

4.3.2	Anforderungen an die Architektur der VIBN	124
4.3.3	Bewertung und Durchführung von Anwendungsfällen.....	124
4.3.4	Realdatenverarbeitung und Verknüpfung mit dem virtuellen Modell	125
4.3.5	Parameteroptimierung von Verhaltensmodellen mit Realdaten	125
4.3.6	Prozessseitige Optimierung von Folgeanläufen	126
4.3.7	Ablaufstruktur.....	126
5	Detaillierung der Methodik	129
5.1	Auswirkung von Komplexität bei Wiederanläufen.....	129
5.1.1	Fallunterscheidung nach Komplexitätsgrad.....	130
5.1.2	Zeitliche Einordnung von Komplexitätstreibern	134
5.1.3	Virtuelle Inbetriebnahme als Maßnahme zur Problembehebung und Verbesserung des Wiederanlaufs	138
5.2	Einführung virtueller Inbetriebnahme in die Serienplanung von Fertigungssystemen.....	140
5.2.1	Architektur zur VIBN	141
5.2.1.1	Stakeholder.....	141
5.2.1.2	Organisatorische Integrationsmöglichkeiten	145
5.2.1.3	Kompetenzen.....	148
5.2.1.4	Anforderungen an die Software	150
5.2.1.5	Befähigung des Lieferanten.....	151
5.2.2	Grobplanung der VIBN im Anlagenentstehungsprozess	152
5.3	Analyse, Bewertung und Realisierung von Anwendungsfällen.....	155
5.3.1	Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit einer VIBN	156
5.3.2	Überprüfung des wirtschaftlichen Einsatzes virtueller Inbetriebnahme.....	159
5.3.2.1	Anforderungen an das Bewertungsmodell.....	161
5.3.2.2	Überprüfung der Grundvoraussetzungen	162
5.3.2.3	Bewertung von Nutzen und Aufwand	162

5.3.3	Realisierung der VIBN (Feinplanung).....	165
5.4	Realdatenanbindung bei der VIBN	175
5.4.1	Verantwortlichkeiten bei der Realdatenverarbeitung.....	175
5.4.2	Zieldefinition	176
5.4.3	Auswahl der Systemvariablen	178
5.4.4	Aufzeichnung der realen Signalverläufe.....	180
5.4.5	Aktualisierung des VIBN-Aufbaus	184
5.4.6	Aufzeichnung der simulierten Signalverläufe	185
5.4.7	Abgleich der Signalkurven	186
5.5	Parameteroptimierung von Verhaltensmodellen mit Realdaten	189
5.5.1	Vorverarbeitung	191
5.5.1.1	Signalfilterung	191
5.5.1.2	Aufteilung in Maschinenzyklen	191
5.5.1.3	Definition des Idealzyklus	192
5.5.1.4	Datenreduktion auf Flankenzeitpunkte	192
5.5.2	Merkmalsextraktion	193
5.5.2.1	Reale Fahrzeit	195
5.5.2.2	Reale Verzögerungszeit	196
5.5.2.3	Realer Auslösezeitpunkt.....	197
5.5.3	Anpassung des virtuellen Modells	198
5.5.4	Parametrisierung	198
5.5.4.1	Fahrparameter.....	199
5.5.4.2	Verzögerungsparameter.....	201
5.5.4.3	Förderbandparameter.....	202
5.6	Prozesseitige Optimierung der VIBN	207
6	Validierung	215
6.1	Auswahl des Fallbeispiels.....	215
6.2	Fallbeispiel: Fertigungssystem elektrischer Antrieb (Elektromotor).....	215
6.2.1	Auswirkungen von Komplexität	216

6.2.2	Einführung der VIBN.....	219
6.2.3	Bewertung und Realisierung der VIBN.....	221
6.2.4	Realdatenanbindung nach der VIBN	228
6.2.5	Parameteroptimierung von Verhaltensmodellen.....	236
6.2.6	Gestaltung des Vorgehens zur Nutzung generierter Erkenntnisse	245
6.3	Kritische Reflexion	246
7	Zusammenfassung.....	249
8	Literaturverzeichnis	253
9	Anhang	273
9.1	Realdaten.....	287
9.2	Ergänzende Simulationsdaten	295

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1-1: Nachfrageprognosen elektrifizierter Automobile.....	2
Abbildung 1-2: Stufenweiser Kapazitätsausbau skalierbares Produktionssystem.....	3
Abbildung 1-3: Explorativer Forschungszyklus	6
Abbildung 1-4: Heuristischer Bezugsrahmen	7
Abbildung 1-5: Aufbau der Arbeit.....	8
Abbildung 2-1: Aufbau einer Asynchronmaschine	13
Abbildung 2-2: Aufbau permanenterregte und fremderregte Synchronmaschine.....	14
Abbildung 2-3: Aufbau eines Gleichstrommotors	16
Abbildung 2-4: Produktionsprozess von Elektromotoren.....	18
Abbildung 2-5: Morphologischer Kasten Gehäusefertigung	20
Abbildung 2-6: Prozessschritte Hairpin Stator Produktion	22
Abbildung 2-7: Herstellungsprozess des Rotors.....	24
Abbildung 2-8: Endmontage des Elektromotors	27
Abbildung 2-9: Veränderungstypen der Fabrik	30
Abbildung 2-10: Flexibilität und Wandlungsfähigkeit	31
Abbildung 2-11: Unternehmensexterne und -interne Wandlungstreiber.....	32
Abbildung 2-12: Übersicht primärer Wandlungsbefähiger“	34
Abbildung 2-13: Wirkmodell der Wandlungsfähigkeit im Produktionssystem.....	37
Abbildung 2-14: Modell einer skalierbaren Produktion	39
Abbildung 2-15: Phasen des Serienanlaufs.....	41

Abbildung 2-16: Zielstellung im Anlaufprozess des Anlaufmanagements	44
Abbildung 2-17: Idealtypische Anlaufkurve	47
Abbildung 2-18: Zusammensetzung der OEE	49
Abbildung 2-19: Digitaler Fabrikbetrieb eines Fertigungssystems	55
Abbildung 2-20: Ebenen des Informationsflusses	55
Abbildung 2-21: Vorgehen VIBN	57
Abbildung 2-22: Konfigurationen der VIBN.....	58
Abbildung 2-23: Prinzip der VIBN.....	59
Abbildung 2-24: Teilsysteme zur Durchführung der VIBN	60
Abbildung 2-25: Ebenen der Steuerungsarchitektur.....	63
Abbildung 2-26: Konstruktion eines Metamodells	67
Abbildung 2-27: Studienergebnisse „Skalierbare Produktionssysteme“; Dauer PU (oben); Zeit bis Ziel-OEE erreicht (links); OEE Delta nach dem Ausbau (rechts)	71
Abbildung 2-28: Kernaussagen aus der Studie und Expertengesprächen	73
Abbildung 2-29: Ist- vs. Soll-Hochlaufkurve nach Ausbau Skalierungsstufe	74
Abbildung 2-30: Handlungsbedarf aus der Praxis	75
Abbildung 3-1: Risikobezogene Informationsgenerierung im Anlauf.....	78
Abbildung 3-2: Prozessschritte der Methode zur Bewertung und Verbesserung des Anlaufmanagements	79
Abbildung 3-3: Ebenen im Anlaufprojekt und Bezug zum Performance Management.....	81
Abbildung 3-4: Drei-Ebenen Modell.....	85
Abbildung 3-5: Forschungsbedarfe im Bereich der Wandlungsfähigkeit in Wertschöpfungsketten	86
Abbildung 3-6: Strategische Leistungsplanung der Produktion	89
Abbildung 3-7: Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme.....	91
Abbildung 3-8: Mechatronikorientiertes Planungsvorgehen	93

Abbildung 3-9: Verfahren zur Erstellung eines Modells zum Einsatz in einer Simulationsumgebung mit Physikmodellen.....	94
Abbildung 3-10: Einordnung der VIBN in den Anlagenentstehungsprozess	98
Abbildung 3-11: Abgleich des Prozesswerts	103
Abbildung 3-12: Datenverarbeitung im TDM-Server.....	105
Abbildung 3-13: Mehrkomponenten Synchronisierungslogik.....	106
Abbildung 3-14: Semantisches Metadatenmodell	108
Abbildung 3-15: Architektur eines Assistenzsystems mit digitalem Zwilling	109
Abbildung 3-16: Bewertung der bestehenden Modelle und Methoden	112
Abbildung 4-1: Bestandteile und Aufbau einer Methodik.....	115
Abbildung 4-2: Modellierungssprache – Module des Vorgehens	122
Abbildung 4-3: Lösungsvorgehen zur optimierten Integration virtueller Methoden	123
Abbildung 4-4: Übersicht Auswirkung von Komplexität bei Wiederanläufen	124
Abbildung 4-5: Ablaufstruktur	127
Abbildung 5-1: Lösungsvorgehen zur optimierten Integration virtueller Methoden	129
Abbildung 5-2: Auswirkungen von Komplexität bei Wiederanläufen	130
Abbildung 5-3: Punktesystem zur Bewertung des Komplexitätsgrads eines Umbaus	133
Abbildung 5-4: Qualitativer Verlauf von Anlaufkurven	134
Abbildung 5-5: Darstellung der drei Bereiche in der OEE-Hochlaufkurve	134
Abbildung 5-6: Hochlaufkurven nach Veränderung des Ausgangs-OEE	136
Abbildung 5-7: Hochlaufkurven nach Veränderung des OEE-Hochlaufs	137
Abbildung 5-8: Hochlaufkurven nach Veränderung des Ziel-OEE.....	138
Abbildung 5-9: Hochlaufkurven nach Veränderung aller Bereiche	138
Abbildung 5-10: Optimierung der Hochlaufkurve durch Maßnahmen.....	139
Abbildung 5-11: Einführung VIBN	141
Abbildung 5-12: Stakeholder-Analyse	143

Abbildung 5-13: Lieferantenbefähigung zur Durchführung der VIBN	152
Abbildung 5-14: Meilensteine bei der Integration der VIBN.....	152
Abbildung 5-15: Grobplanung Integration der VIBN	154
Abbildung 5-16: Bewertung und Durchführung von Anwendungsfällen	156
Abbildung 5-17: Überprüfung des wirtschaftlichen Einsatzes von VIBN	160
Abbildung 5-18: Vorbereitung des VIBN-Projektes	165
Abbildung 5-19: Inhalte der Spezifikation für die virtuelle Inbetriebnahme.....	166
Abbildung 5-20: Feinplanung der VIBN	167
Abbildung 5-21: Datenbasis für die VIBN	169
Abbildung 5-22: Erstellung des virtuellen Modells	171
Abbildung 5-23: Durchführung der VIBN	172
Abbildung 5-24: Abnahme der VIBN	174
Abbildung 5-25: Realdatenanbindung bei der VIBN	175
Abbildung 5-26: Verantwortlichkeiten im Modul der Realdatenanbindung	176
Abbildung 5-27: Komponenten der Zieldefinition.....	177
Abbildung 5-28: Aktualisierung des Aufbaus zur VIBN	184
Abbildung 5-29: Beispielhafter Verlauf eines realen Signals.....	187
Abbildung 5-30: Beispielhafter Verlauf eines virtuellen Signals	188
Abbildung 5-31: Beispielhafter Abgleich von realem und virtuellem Signalverlauf	188
Abbildung 5-32: Parameteroptimierung von Verhaltensmodellen mit Realdaten.....	189
Abbildung 5-33: Aufbau des Moduls zur Parametrisierung	190
Abbildung 5-34: Referenzsignal zur Aufteilung in Zyklen	192
Abbildung 5-35: Ermittlung der Flankenzeitpunkte	193
Abbildung 5-36: Signalaufbau eines Zylinders	194
Abbildung 5-37: Ermittlung von Fahrzeiten	195
Abbildung 5-38: Ermittlung der Verzögerungszeit	196
Abbildung 5-39: Bestimmung von Auslösezeitpunkten	197

Abbildung 5-40: Ermittlung des zeitlichen Versatzes.....	199
Abbildung 5-41: Differenz zwischen Merkmalsextraktion und Parametrisierung.....	202
Abbildung 5-42: Vorgehen zur Parametrisierung der Förderbandparameter	204
Abbildung 5-43: Prozessseitige Optimierung der VIBN	207
Abbildung 5-44: Projektabschluss Ausbaustufe	208
Abbildung 5-45: Ablage des virtuellen Modells und Übergabe an Anlagenbetreiber	210
Abbildung 5-46: Anlagenbetrieb und Anpassung des virtuellen Modells.....	212
Abbildung 6-1: Bewertung des Komplexitätsgrads des Ausbaus der betrachteten Fertigungslinie anhand der Intervalle des Punktesystems	217
Abbildung 6-2: Qualitativer Verlauf der Anlaufkurve des komplexen Ausbaus neben der Anlaufkurve eines mittelkomplexen Ausbaus des Fertigungssystems	218
Abbildung 6-3: Hochlaufkurven nach komplexitätsbedingter Veränderung der Ausgangs-OEE und des OEE-Hochlaufs.....	219
Abbildung 6-4: Bewertung des Fallbeispiels anhand der Aufwand- Nutzen-Matrix	222
Abbildung 6-5: Auswertung der Lieferantenfähigkeit anhand der Checkliste.....	223
Abbildung 6-6: Inhalte der Testspezifikation des Fallbeispiels	224
Abbildung 6-7: Terminplan des VIBN-Projektes mit dem Lieferanten	225
Abbildung 6-8: Virtuelles Modell der Förderanlage.....	226
Abbildung 6-9: Aufbau der Hardware-in-the-Loop des Lieferanten	227
Abbildung 6-10: Spezifischer Aufbau des Vorgehens in der Validierung	236
Abbildung 6-11: Lineare Regression über zwei Parameter	241
Abbildung 6-12: Kumulierte Modellabweichungen über einen Nachfüllzyklus	244
Abbildung 9-1: Checkliste der identifizierten Fehler während der VIBN	282
Abbildung 9-2: Meilensteintrendanalyse	283

Abbildung 9-3: Automatisierungsskript Meilensteintrendanalyse	284
Abbildung 9-4: Automatisierungsskript Flankenzeitpunkte und Auslösezeitpunkte	285

Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen

Abkürzung	Einheit	Beschreibung
a	-	Anzahl Eingangsgrößen
β	-	Regressionskoeffizient
c	-	Konstante
d	-	Desirability
D	-	Composite-Desirability
ϵ	-	Zufällige Störung
k	-	Anzahl Faktoren
L	s	Frühester Auslösezeitpunkt
m	-	Anzahl Auslösezeitpunkte
n	-	Anzahl Parameterkombinationen
P_F	-	Verfahrparameter
P_V	-	Verzögerungsparameter
s	-	Steigung
σ^2	-	Varianz
T_F	s	Verfahrzeit
T_{FR}	s	Reale Verfahrzeit
T_V	s	Verzögerungszeit
T_{VR}	s	Reale Verzögerungszeit
U	s	Spätester Auslösezeitpunkt
V_E	s	Einseitiger zeitlicher Versatz
V_Z	s	Zweiseitiger zeitlicher Versatz
x	-	Eingangsgröße
y	-	Ausgangsgröße
Y	s	Auslösezeitpunkt
$\hat{Y}$	-	Regressionsfunktion

Y_R s Realer Auslösezeitpunkt

Abkürzung	Beschreibung
AML	Automation Markup Language
API	Application Programming Interface (Programmierschnittstelle)
BPMN	Business Process Modeling (and) Notation
Bspw.	Beispielsweise
CNC	Computerized Numerical Control (Rechnergestützte numerische Steuerung)
CSV	Comma-Separated Values
DT	Digital Twin (Digitaler Zwilling)
E-Plan	Schaltplan- und Stromlaufplan
FZP	Flankenzeitpunkt
KI	Künstliche Intelligenz
Inkl.	Inklusive
IT	Informationstechnik
MTA	Meilenstein-Trendanalyse
OEM	Original Equipment Manufacturer
PPS	Produktionsplanung und Steuerung
PU(s)	Produktionsunterbrechung(en)
RSM	Response Surface Methodology
s.	siehe
SOP	Start of Production (Produktionsstart)
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
Vgl.	Vergleiche
VIBN	Virtuelle Inbetriebnahme
z.B.	zum Beispiel