

Matthias Bertling

Agile Fabrikplanung durch das Minimum Viable Production System



Agile Fabrikplanung durch das Minimum Viable Production System

Agile Factory Planning by the Minimum Viable Production System

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

vorgelegt von

Matthias Bertling

Berichter/in:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Günther Schuh
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Burggräf

Tag der mündlichen Prüfung: 03. Mai 2021

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Matthias Bertling

Agile Fabrikplanung durch das Minimum Viable
Production System

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. T. Bergs
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh
Prof. Dr.-Ing. C. Brecher
Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 18/2021



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.

Matthias Bertling:

Agile Fabrikplanung durch das Minimum Viable Production System

1. Auflage, 2021

Apprimus Verlag, Aachen, 2021

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 978-3-86359-991-1

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2021)

Vorwort

Nicht der Berg ist es, den man bezwingt,
sondern das eigene Ich.

(Edmund Hillary)

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktionssystematik des Werkzeugmaschinenlabors (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen. Mit Vollendung dieser Arbeit endet ein Marathon, der neben wissenschaftlichen Erkenntnissen meine persönliche Entwicklung außerordentlich geprägt hat. Daher gilt mein besonderer Dank Herrn Professor Günther Schuh für die Möglichkeit der Promotion, seine Förderung, das einzigartige Umfeld und das mir entgegengebrachte Vertrauen. Weiter danke ich Herrn Professor Peter Burggräf für seine Unterstützung, den nicht endenden Optimismus und die Motivation während meiner Zeit am WZL.

Ebenso danke ich meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am WZL sowie den Teilnehmern des Arbeitskreises Fabrikplanung für die intensiven und kreativen Diskussionen. Die Gruppe Werksstrukturplanung, deren Leitung ich 2017 übernehmen durfte, wird mir aufgrund der gemeinsamen Zeit, gemeinsamer Aktivitäten und des freundschaftlichen Zusammenhalts besonders in Erinnerung bleiben. Dr. Matthias Dannapfel, der als Oberingenieur durch seine Unterstützung bei der Themenfindung, Konzeption und der kritischen Durchsicht dieser Arbeit maßgeblich zum Erfolg beigetragen hat sowie meinen Abschlussarbeitern Corinna Geukes, Hannes Kahmann, Jonas Dackweiler und Alexander Obladen danke ich herzlich. Ohne eure Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Die Entstehung und Entwicklung der e.GO Mobile AG durfte ich während meiner gesamten Zeit am WZL und darüber hinaus eng begleiten und gestalten. Dem einmaligen Team, Freunden und Wegbegleitern, besonders aber Herrn Dr. Bastian Lütke und Herrn Dr. Gregor Tücks, mit denen ich in vielen Stunden das erste Produktionswerk planen und realisieren durfte, möchte ich herzlich danken.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, meinen Eltern Bettina und Reinhard Bertling, meinem Bruder Markus sowie meinen Großeltern. Ihr habt immer an mich geglaubt, mir den notwendigen und vorbehaltlosen Rückhalt gegeben und mich während des Studiums und der Promotion unterstützt. Meinem Großvater Winfried Bertling, der mich schon früh für den Beruf des Ingenieurs begeistern konnte, danke ich sehr.

Liebe Tamara, du warst während der gesamten Zeit vom ersten Tag am Lehrstuhl, bis zum Abschluss dieser Dissertation an meiner Seite. Dabei hast du mir trotz vieler Entbehrungen immer die nötige Motivation sowie die Kraft und Zuversicht zum Abschluss dieser Arbeit gegeben. In inhaltlicher und sprachlicher Hinsicht hast du durch deine Durchsicht des Manuskripts wesentlich zur Verbesserung beigetragen. Dafür danke ich dir von ganzem Herzen und freue mich auf die nun freigewordene Zeit und das anstehende, neue Kapitel in unserem gemeinsamen Leben.

Aachen, im Mai 2021

Matthias Bertling

Zusammenfassung

Wie kann der Return on Planning der Fabrikplanung unter unsicheren Rahmenbedingungen erhöht werden? Diese zentrale Fragestellung der vorliegenden Arbeit ist besonders für Start-ups aber auch etablierte Unternehmen von Interesse, für die eine Reduzierung der Markteinführungszeit ihrer Produkte eine besondere strategische Relevanz hat. Fabrikplanungsprojekte unterliegen in einem volatilen Marktumfeld unsicheren Planungsprämissen und sich ändernden Randbedingungen, gleichzeitig herrscht ein hoher Zeit- und Kostendruck. Dies stellt für den Fabrikplaner eine besondere Herausforderung dar. Einerseits werden im Planungsprozess möglichst vollständige und sichere Informationen benötigt, andererseits herrscht eine hohe Unsicherheit bzgl. der markt- und kundenseitigen Anforderungen. Kontinuierliche Änderungen, die sich durch agile Produktentwicklungsvorgehen oder externe Einflussfaktoren aus dem Unternehmensumfeld ergeben, führen zu notwendigen Anpassungen der Fabrikplanung. Dies verursacht zusätzliche Planungsaufwände und hat eine verlängerte Projektdauer zur Folge. Der Planer befindet sich somit in einem Spannungsfeld zwischen detaillierter und abgesicherter Planung einerseits und einer schnellstmöglichen Realisierung der Fabrik.

Um die beschriebene Herausforderung zu adressieren, wird im Rahmen dieser Arbeit ein Planungsvorgehen entworfen, das einen agilen Planungs- und Realisierungsprozess ermöglicht. Dazu wird in Analogie zur Produktentwicklung das Minimum Viable Production System eingeführt und so ein Perspektivwechsel in der Fabrikplanung eingeleitet. Die Vollständigkeitsanforderung an das Planungsergebnis wird zum Zeitpunkt der Realisierung aufgelöst. So werden zu Beginn ein reduziertes, minimales Produktionssystem geplant und realisiert sowie fortan unsichere Planungsinformationen anhand des physischen Produktionssystems in iterativen Prozessen validiert.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass durch das Minimum Viable Production System die Effektivität und die Effizienz der Planung im volatilen Planungsumfeld erhöht werden. Die situationsspezifische Ausgestaltung der Planung und die frühe Realisierung des Produktionssystems ermöglichen eine schnelle Produktionsfähigkeit und liefern wichtige Erkenntnisse, die in den Entwicklungsprozess einfließen. Durch die agilen Planungsprozesse kann die Fabrikplanung somit maßgeblich zum Erfolg produzierender Start-ups beitragen.

Summary

How can the return on planning of factory planning be increased under uncertain conditions? This central question of the presented thesis is of particular interest for start-ups but also for established companies, for which a reduction of the time to market of their products has a special strategic relevance. In a volatile market environment, factory planning projects are subject to uncertain planning premises and changing boundary conditions, while at the same time there is high time and cost pressure. This poses a particular challenge for factory planners. On the one hand, the planning process requires information that is as complete and reliable as possible; on the other hand, there is a high degree of uncertainty regarding market and customer requirements. Continuous changes resulting from agile product development processes or external influencing factors from the corporate environment lead to necessary adjustments in factory planning. This causes additional planning efforts and results in an extended project duration. The planner is thus caught between detailed and secure planning on the one hand and the fastest possible realization of the factory on the other.

In order to address the described challenge, a planning procedure is designed in the context of this work, which enables an agile planning and realization process. For this purpose, the Minimum Viable Production System is introduced in analogy to product development, thus introducing a change of perspective in factory planning. The requirement for completeness of the planning result at the time of realization is resolved. Thus, a reduced, minimal production system is planned and realized at the beginning and from then on uncertain planning information is validated on the basis of the physical production system in iterative processes.

The results of this thesis show that the Minimum Viable Production System increases the effectiveness and efficiency of planning in a volatile planning environment. The situation-specific design of the planning and the early realization of the product system enable rapid production capability and provide important insights that are incorporated into the development process. Agile planning processes can thus make a significant contribution to the success of manufacturing start-ups.

Inhaltsübersicht

Inhaltsübersicht	I
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	XI
Abkürzungen	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit	1
1.2 Forschungsmethodischer Rahmen	5
1.3 Aufbau der Arbeit.....	8
2 Grundlagen und Herausforderungen der Fabrikplanung unter Unsicherheit	11
2.1 Grundlagen der Fabrikplanung	11
2.2 Herausforderungen der Fabrikplanung für produzierende Start-ups	26
2.3 Handlungsbedarf aus Sicht der Praxis	43
3 Theorie zu agilen Produktionssystemen und des Minimum Viable Product	51
3.1 Diskurs über den Agilitätsbegriff	51
3.2 Definition und Gestaltung von Produktionssystemen	61
3.3 Bestehende Ansätze zur Agilität von Produktionssystemen	78
3.4 Konzept und Anwendung des „Minimum Viable Product (MVP)“	85
3.5 Fazit zur Agilität von Produktionssystemen und Forschungsbedarf	93
4 Konzept des Minimum Viable Production System (MVPS)	97
4.1 Anforderungen an ein Minimum Viable Production System	97
4.2 Ausgangshypothese des Minimum Viable Production Systems	104
4.3 Prinzip des iterativen Fabrikplanungsvorgehen	112
4.4 Fazit und Implikationen	113
5 Das agile Fabrikplanungsvorgehen mit Hilfe des MVPS	115
5.1 Ermittlung struktureller Veränderungstreiber auf das Planungsvorgehen	116
5.2 Strukturmodell zur Beschreibung des agilen Planungsvorgehens.....	131
5.3 Wirkmodell der Veränderungstreiber auf das Planungsvorgehen.....	137
5.4 Ermittlung agil planbarer Planungsinformationen	140
5.5 Ermittlung agil, mit Hilfe des MVPS, zu planender Planungsumfänge	148
5.6 Befähigung von Produktionssystemen zur Steigerung des agilen Planungsumfangs .	159

5.7	Gesamtmethodik der agilen Fabrikplanung mit Hilfe des MVPS	167
6	Anwendung des agilen Fabrikplanungsvorgehens	173
6.1	Fallbeispiel zur Validierung des agilen Fabrikplanungsvorgehens	173
6.2	Bewertung des Return on Planning (ROP) für das Planungsprojekt	184
6.3	Kritische Reflexion des agilen Planungsvorgehens	187
7	Zusammenfassung und Fazit	193
8	Literaturverzeichnis	195
9	Anhang	215
9.1	Literaturübersicht der systematischen Literaturrecherche	215
9.2	Strukturmodell zu betrachtender Planungsinhalte	219
9.3	Ermittlung der Kritizität der Veränderungstreiber	220
9.4	Gesamteinflussmatrix der Veränderungstreiber	221
9.5	Erfüllungsgrad der Kriterien zur agilen Planbarkeit	223
9.6	Inhaltliche Beschreibung der Planungsinformationen	225

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsübersicht	I
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	XI
Abkürzungen	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit	1
1.2 Forschungsmethodischer Rahmen	5
1.2.1 Wissenschaftstheoretischer Bezugsrahmen	5
1.2.2 Forschungsmethodologisches Vorgehen	6
1.3 Aufbau der Arbeit.....	8
2 Grundlagen und Herausforderungen der Fabrikplanung unter Unsicherheit	11
2.1 Grundlagen der Fabrikplanung	11
2.1.1 Die Fabrik als Planungsobjekt	12
2.1.2 Anlass und Ziel der Fabrikplanung.....	14
2.1.3 Vorgehen und Methoden in der Fabrikplanung.....	15
2.1.4 Planer und Planungsteam als Subjekte der Planung	24
2.1.5 Zwischenfazit zu den Grundlagen der Fabrikplanung.....	25
2.2 Herausforderungen der Fabrikplanung für produzierende Start-ups	26
2.2.1 Grundlagen produzierender Start-ups.....	26
2.2.2 Verwendung agiler Methoden in der Produktentwicklung.....	35
2.2.3 Herausforderungen für die Fabrikplanung in produzierenden Start-ups	38
2.2.4 Zwischenfazit zu den Herausforderungen der Fabrikplanung	43
2.3 Handlungsbedarf aus Sicht der Praxis	43
2.3.1 Aufbau der praxisorientierten Fallstudien	43
2.3.2 Fabrikplanung einer Kleinserienfertigung für Elektrofahrzeuge.....	44
2.3.3 Produktionskonzept für ein Elektro-Nutzfahrzeug	46
2.3.4 Fahrzeugentwicklung für eine OEM Kleinstserie	47
2.3.5 Anforderungen an einen agilen Planungsansatz aus Sicht der Praxis	47
3 Theorie zu agilen Produktionssystemen und des Minimum Viable Product	51
3.1 Diskurs über den Agilitätsbegriff.....	51
3.2 Definition und Gestaltung von Produktionssystemen	61

3.2.1	Systemtheoretische Grundlagen	61
3.2.2	Definition des Produktionssystems	70
3.2.3	Anlauf von Produktionssystemen.....	74
3.2.4	Zwischenfazit	77
3.3	Bestehende Ansätze zur Agilität von Produktionssystemen.....	78
3.3.1	Vorgehensweise zur systematischen Literaturrecherche.....	78
3.3.2	Darstellung und Einordnung der Rechercheergebnisse	83
3.3.3	Untersuchung und kritische Reflexion der Ansätze	83
3.4	Konzept und Anwendung des „Minimum Viable Product (MVP)“	85
3.4.1	Herkunft und Entwicklung der Lean-Start-up Methode.....	86
3.4.2	Das Minimum Viable Product im Entwicklungsprozess	88
3.4.3	Anwendungsbeispiele und kritische Reflexion	92
3.5	Fazit zur Agilität von Produktionssystemen und Forschungsbedarf	93
4	Konzept des Minimum Viable Production System (MVPS)	97
4.1	Anforderungen an ein Minimum Viable Production System.....	97
4.1.1	Angestrebte Nutzenpotenziale.....	97
4.1.2	Inhaltliche Anforderungen	100
4.1.3	Formale Anforderungen	102
4.2	Ausgangshypothese des Minimum Viable Production Systems.....	104
4.2.1	Auflösung der Vollständigkeitsanforderung in der Fabrikplanung.....	106
4.2.2	Integration des MVP-Ansatzes in die Fabrikplanungstheorie.....	108
4.2.3	Mehrwertmechanismen des agilen Fabrikplanungsvorgehens.....	110
4.3	Prinzip des iterativen Fabrikplanungsvorgehen	112
4.4	Fazit und Implikationen	113
5	Das agile Fabrikplanungsvorgehen mit Hilfe des MVPS.....	115
5.1	Ermittlung struktureller Veränderungstreiber auf das Planungsvorgehen	116
5.1.1	Beschreibung der strukturellen Veränderungstreiber.....	119
5.1.2	Interdependenzen der Veränderungstreiber.....	124
5.1.3	Morphologie der Veränderungstreiber	127
5.1.4	Kritizität und Einflussprofil ermittelter Veränderungstreiber.....	130
5.2	Strukturmodell zur Beschreibung des agilen Planungsvorgehens	131
5.2.1	Grundlagen der modularen Fabrikplanung	131
5.2.2	Untersuchung und Eingrenzung minimal notwendiger Planungsumfänge	133
5.2.3	Strukturmodell zu betrachtender Planungsumfänge.....	136
5.3	Wirkmodell der Veränderungstreiber auf das Planungsvorgehen	137
5.3.1	Analyse der Planungsmodule hinsichtlich Änderungseinflüssen.....	137

5.3.2	Kategorisierung der Planungsmodule.....	139
5.4	Ermittlung agil planbarer Planungsinformationen	140
5.4.1	Kriterien zur Validierung von Planungsinformationen mit Hilfe des MVPS.....	141
5.4.2	Bewertung der Planungsinhalte	145
5.4.3	Kategorisierung und Darstellung agil planbarer Planungsinhalte	145
5.5	Ermittlung agil, mit Hilfe des MVPS, zu planender Planungsumfänge.....	148
5.5.1	Ermittlung kritischer Planungsumfänge	148
5.5.2	Beschreibung des Planungsreifegrads im agilen Planungsprozess.....	151
5.5.3	Herleitung priorisierter Fragestellungen zur agilen Planung.....	154
5.5.4	Beschreibung und Zusammensetzung des MVPS	157
5.6	Befähigung von Produktionssystemen zur Steigerung des agilen Planungsumfangs .	159
5.6.1	Bestehende Ansätze zur Befähigung von Produktionssystemen	160
5.6.2	Handlungsempfehlungen zur physischen Validierung von Planungsinformationen	162
5.7	Gesamtmethodik der agilen Fabrikplanung mit Hilfe des MVPS.....	167
5.7.1	Phase 1: Projektinitiierung durch zustandsbasierte Fabrikplanung	168
5.7.2	Phase 2: Planung im Factory Scrum Prozess.....	169
5.7.3	Phase 3: Realisierung und Validierung mit Hilfe des MVPS.....	170
6	Anwendung des agilen Fabrikplanungsvorgehens	173
6.1	Fallbeispiel zur Validierung des agilen Fabrikplanungsvorgehens.....	173
6.1.1	Projektinitiierung Werksneubau für die automobilen Kleinserienfertigung.....	175
6.1.2	Planung im Factory Scrum Prozess	178
6.1.3	Realisierung des Minimum Viable Production Systems	182
6.2	Bewertung des Return on Planning (ROP) für das Planungsprojekt.....	184
6.3	Kritische Reflexion des agilen Planungsvorgehens	187
7	Zusammenfassung und Fazit.....	193
8	Literaturverzeichnis	195
9	Anhang.....	215
9.1	Literaturübersicht der systematischen Literaturrecherche.....	215
9.2	Strukturmodell zu betrachtender Planungsinhalte.....	219
9.3	Ermittlung der Kritizität der Veränderungstreiber	220
9.4	Gesamteinflussmatrix der Veränderungstreiber	221
9.5	Erfüllungsgrad der Kriterien zur agilen Planbarkeit.....	223
9.6	Inhaltliche Beschreibung der Planungsinformationen.....	225

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Liste der wertvollsten Unternehmen der Welt	2
Abbildung 1-2: Wissenschaftssystematik	6
Abbildung 1-3: Explorativer Forschungszyklus	7
Abbildung 1-4: Aufbau der Arbeit	9
Abbildung 2-1: Klassifikationsmodell der Fabrikplanungsobjekte nach BERGHOLZ	13
Abbildung 2-2: Grundfälle der Fabrikplanung nach GRUNDIG	15
Abbildung 2-3: Vorgehen der Fabrikplanung nach KETTNER	17
Abbildung 2-4: Planungsmodule und Modullandkarte der zustandsbasierten Fabrikplanung	18
Abbildung 2-5: Konzept und Projektvorgehen der zustandsbasierten Fabrikplanung	19
Abbildung 2-6: Reifegradmodell der Fabrikplanung nach KRUNKE	20
Abbildung 2-7: Reifestufen des informatorischen Referenzprozesses nach KRUNKE	20
Abbildung 2-8: Agile Fabrikplanung und Projektdurchführung im Factory Scrum Prozess	21
Abbildung 2-9: Bewertungsmodell der Fabrikplanung <i>Return on Planning</i>	23
Abbildung 2-10: Nutzenpotenziale der Fabrikplanung	24
Abbildung 2-11: Handlungskompetenz des Fabrikplaners	25
Abbildung 2-12: Unternehmensphasen von Start-ups	28
Abbildung 2-13: Erfolgsfaktoren und Erfolgsstrategien von Start-ups	32
Abbildung 2-14: Vorteile agiler gegenüber klassischer Produktentwicklungsvorgehen	37
Abbildung 2-15: Das Dilemma der Fabrikplanung	39
Abbildung 2-16: Meilensteine des Produktentstehungs- und Fabrikplanungsprozesses	40
Abbildung 2-17: Herausforderungen der Fabrikplanung in produzierenden Start-ups	41
Abbildung 2-18: Anforderungen an ein agiles Planungsvorgehen aus Sicht der Praxis	50
Abbildung 3-1: AGIL-Schema nach PARSONS	52
Abbildung 3-2: Etymologische Wurzeln des Begriffs „Beweglichkeit“	55
Abbildung 3-3: Veränderungstypen der Fabrik nach WIENDAHL	57
Abbildung 3-4: Manifest für die agile Softwareentwicklung nach BECK et al.	59
Abbildung 3-5: Agilität in Form proaktiver und reaktiver Handlungen aufgrund einer aktivierenden Komponente	61
Abbildung 3-6: Grundlagen des systemtechnischen Aufbaus	63
Abbildung 3-7: Struktur und Aufgaben soziotechnischer Systeme	64
Abbildung 3-8: Dimensionen zur Beschreibung der Komplexität eines Systems	68
Abbildung 3-9: Das Modell Lebensfähiger Systeme (Viable System Model)	70
Abbildung 3-10: Hauptgeschäftsprozesse und Eigenschaften der Fabrik als System	72
Abbildung 3-11: Hierarchisches Konzept der Fabrik	73
Abbildung 3-12: Beschreibung der Objektkategorien der Fabrikplanung	74
Abbildung 3-13: Trade-off zwischen Produzieren und Erproben während des Anlaufs	76
Abbildung 3-14: Prinzip der diskreten Migration nach GARTZEN	77
Abbildung 3-15: Vollständige Prozessdarstellung zur Auswahl geeigneter Literaturansätze in Anlehnung an das PRISMA-Phasenmodell	82
Abbildung 3-16: Zusammenfassung der Prinzipien des Lean Start-up Ansatzes	88

Abbildung 3-17: Build-Measure-Learn Feedback Loop.....	89
Abbildung 3-18: Das Minimum Viable Product (MVP)	90
Abbildung 4-1: Angestrebte Nutzenpotenziale des Minimum Viable Production Systems....	99
Abbildung 4-2: Zusammenfassung der inhaltlichen Anforderungen.....	102
Abbildung 4-3: Delta zwischen Planung und Realisierung in der Fabrikplanung.....	104
Abbildung 4-4: Darstellung des Zusammenhangs von Planungsnutzen /-aufwand und der Planungstiefe.....	107
Abbildung 4-5: Darstellung des Perspektivwechsels durch Einführung des MVPS in Anlehnung an Darstellung von PASANEN, veröffentlicht von OLSEN.....	108
Abbildung 4-6: Agiles Planungsvorgehen durch Einführung des MVPS.....	110
Abbildung 4-7: Mehrwertmechanismus der agilen Fabrikplanung für produzierende Start-ups	111
Abbildung 4-8: Konzept des iterativen Planungsvorgehens der agilen Fabrikplanung.....	112
Abbildung 5-1: Schematische Darstellung des agilen Fabrikplanungsvorgehen.....	115
Abbildung 5-2: Zusammenhänge der VUCA Begrifflichkeiten	116
Abbildung 5-3: Externe und interne Einflüsse verschiedener Bereiche als Komplexitätsursache.....	118
Abbildung 5-4: Einfluss direkter und indirekter Veränderungen auf das Produktionssystem.....	118
Abbildung 5-5: Zusammenfassung der strukturellen Veränderungstreiber in der Fabrikplanung	124
Abbildung 5-6: Darstellung der Interdependenzen zwischen den Veränderungstreibern	125
Abbildung 5-7: Morphologie der Veränderungstreiber zur Einschätzung des Einflusses auf das Fabrikplanungsprojekt (Teil 1).....	128
Abbildung 5-8: Morphologie der Veränderungstreiber zur Einschätzung des Einflusses auf das Fabrikplanungsprojekt (Teil 2).....	129
Abbildung 5-9: Beispielhafte Ermittlung der Kritizität von Veränderungstreibern	130
Abbildung 5-10: Beispielhafte Darstellung des Einflussprofils	131
Abbildung 5-11: Generischer Aufbau eines Fabrikplanungsmoduls	132
Abbildung 5-12: Modulgruppenspezifische Übersicht der 34 Planungsmodule	133
Abbildung 5-13: Struktur zur Eingrenzung der minimal notwendigen Planungsumfänge....	133
Abbildung 5-14: Reifegradstufen des informatorischen Referenzprozesses nach KRUNKE..	134
Abbildung 5-15: Analyse der Modullandkarte bzgl. Nutzung von produktionssystematischen Planungsinformationen in der Reifestufe 1 und 2	135
Abbildung 5-16: Festlegung des Startzeitpunktes der Validierung mit Hilfe des MVPS	136
Abbildung 5-17: Darstellung des zweistufigen Aufbaus des Strukturmodells.....	136
Abbildung 5-18: Ausschnitt Strukturmodell zu betrachtender Planungsinformationen.....	137
Abbildung 5-19: Einflussmatrix zur Analyse der Auswirkungen auf den Planungsprozess .	138
Abbildung 5-20: Einflussmatrix für die Module Layout- und Fertigungsmittelplanung.....	139
Abbildung 5-21: Wertebereichseinteilung der Veränderungsbeeinflussung	140
Abbildung 5-22: Kategorisierung der Planungsinformationen hinsichtlich Veränderungseinflüssen.....	140
Abbildung 5-23: Teildarstellung der Konzeption zur agilen Planung mit Hilfe des MVPS .	141
Abbildung 5-24: Anforderungen zur agilen Planbarkeit von Planungsinhalten	144

Abbildung 5-25: Matrix zur Bewertung von Planungsinformationen hinsichtlich der agilen Planbarkeit mit Hilfe des MVPS	145
Abbildung 5-26: Einteilung des Wertebereichs zur Kategorisierung der Planungsinformationen.....	146
Abbildung 5-27: Eignung von Planungsinformationen zur agilen Planung mit Hilfe des MVPS	147
Abbildung 5-28: Ermittlung kritischer Planungsumfänge durch Clusterbildung.....	149
Abbildung 5-29: Übersicht weiterer Einflussfaktoren zur Bestimmung agiler Planungsumfänge	151
Abbildung 5-30: Reifegradlogik zur agilen Planung von Produktionssystemen	153
Abbildung 5-31: Attribuierung der Planungsinformationen zur Reifegradbestimmung am Beispiel des Planungsmoduls Arbeitsvorbereitung.....	154
Abbildung 5-32: Vorgehen zur Ableitung von Fragestellungen am Beispiel der Planungsinformation <i>Arbeitsplan</i>	155
Abbildung 5-33: Typen von Fragestellungen zur Validierung anhand des MVPS	156
Abbildung 5-34: Darstellung des MVPS Planning Sheet am Beispiel des Planungsmoduls Arbeitsvorbereitung.....	156
Abbildung 5-35: Darstellung der vollständigen MVPS Module Card zur Beschreibung der MVPS Planungsumfänge am Beispiel des Planungsmoduls Arbeitsvorbereitung.....	158
Abbildung 5-36: Kostengünstige Validierung in Hardware bei niedrigem Reifegrad der Planungsinformationen.....	159
Abbildung 5-37: Übersicht bestehender Ansätze als Befähiger zur agilen Planung.....	160
Abbildung 5-38: Beschreibung der ersten Phase des agilen Planungsvorgehens	168
Abbildung 5-39: Beschreibung der zweiten Phase des agilen Planungsvorgehens.....	169
Abbildung 5-40: Beschreibung der dritten Phase des agilen Planungsvorgehens.....	170
Abbildung 5-41: Validierung von Planungsinformationen mit Hilfe des MVPS	172
Abbildung 6-1: Iterative Planungsansätze in der Produktentwicklung erfordern agile Fabrikplanungsmethoden	174
Abbildung 6-2: Planungsmodule des Projekts Werksneubau der e.GO Mobile AG	176
Abbildung 6-3: Kritizitätsprofil der Veränderungstreiber für das Planungsprojekt.....	178
Abbildung 6-4: Ermittlung kritischer Planungsinformationen im Planungsprojekt.....	180
Abbildung 6-5: Herleitung priorisierter Fragestellungen für das Modul Fertigungsmittelplanung.....	181
Abbildung 6-6: Auszug der MVPS Module Card für das Modul Fertigungsmittelplanung ..	182
Abbildung 6-7: 3D-Visualisierung der Kleinserienfertigung der e.GO Mobile AG.....	182
Abbildung 6-8: Auszug der MVPS Module Card nach erster Validierung und MVPS-Iteration	184
Abbildung 6-9: Darstellung der Nutzenpotenziale des agilen Planungsvorgehens anhand des Fallbeispiels der e.GO Mobile AG.....	186

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammensetzung der Merkmale produzierender Start-ups	29
Tabelle 2: Zusammenfassung der Erfolgsfaktoren und Gründe des Scheiterns von Start-ups	31
Tabelle 3: Einordnung der Literaturrecherche in die Taxonomie nach COOPER.....	80
Tabelle 4: Verwendete Suchbegriffe und Datenbanken	81
Tabelle 5: Ordnungsrahmen zur Darstellung der Rechercheergebnisse.....	83
Tabelle 6: Veränderungstreiber der Kategorie Produkt.....	119
Tabelle 7: Veränderungstreiber der Kategorie Prozess	120
Tabelle 8: Veränderungstreiber der Kategorie Ressource	121
Tabelle 9: Veränderungstreiber der Kategorie Organisation.....	122

Abkürzungen

AG	Aktiengesellschaft
AM	Additive Manufacturing
AMEF	Agile Enterprise Manufacturing Forum
Aufl.	Auflage
Bd.	Band
BML	Build – Measure – Learn
bspw.	bspw.
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CAD	rechnerunterstützter Entwurf (Computer-Aided Design)
CPS	Cyber-physisches System
d. h.	das heißt
DIB	Dienstleistungen im industriellen Bauprozess
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EDV	elektronische Datenverarbeitung
EG	Erfüllungsgrad
engl.	Englisch
ERP	Enterprise Resource Planning
et al.	et alii
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
e. V.	eingetragener Verein
f.	folgende
ff.	fortfolgende
FP	Fabrikplanung
FTS	Fahrerloses Transportsystem
ggf.	gegebenenfalls
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
HMI	Human-Machine Interface
Hrsg.	Herausgeber
i. d. R.	in der Regel
IFM	Integrated Factory Modelling
imPROve	Integrierte, modulare Produktions- und Energieplanung
IT	Informationstechnologie
Jg.	Jahrgang
Kap.	Kapitel
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
lat.	lateinisch

MA	Mitarbeiter
MES	Manufacturing Execution System
min.	Minute
MVP	Minimum Viable Product
MVPS	Minimum Viable Production System
N	Anzahl
Nr., #	Nummer
NRW	Nordrhein-Westfalen
OEM	Original Equipment Manufacturer
RoCPS	Return on CPS
ROP	Return on Planning
PA	Planungsattribut
PDCA	Plan – Do – Check – Act
PEP	Produktentstehungsprozess
PPS	Produktionsplanung und –steuerung
PS	Produktionssystem
QM	Qualitätsmanagement
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
S.	Seite(n)
SOP	Start of Production
Stk.	Stück
TGA	technische Gebäudeausstattung
u. a.	unter anderem
USA	Vereinigte Staaten von Amerika (United States of America)
u.v.m.	und vieles mehr
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
vgl.	vergleiche
VSM	Viable System Model/Modell lebensfähiger Systeme
WZL	Werkzeugmaschinenlabor
z. B.	zum Beispiel
%	Prozent

1 Einleitung

Mir ist es eingefallen, während ich Fahrrad fuhr.

(Albert Einstein)

1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

Im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit steht die Frage nach dem Mehrwert einer detaillierten Fabrikplanung in einem volatilen und unsicheren Planungsumfeld. Sind Planungsprämissen, Vorgaben und Randbedingungen unscharf oder ändern sich häufig, stellt dies den Planer vor große Herausforderungen. Gleichzeitig stehen Planungsprojekte unter hohem Zeit- und Kostendruck, daher stellt sich die Frage nach dem richtigen Detaillierungsgrad der Planung bei nahezu jedem Fabrikplanungsprojekt. Zum einen benötigt der Planer, getrieben durch kürzere Planungszyklen und der Forderung nach einer Verkürzung der Planungs- und Realisierungszeit von Fabriken, möglichst vollständige und sichere Informationen zu Beginn der Planungsphase einer Fabrik. Andererseits herrscht durch ein zunehmend volatiles Marktumfeld eine hohe Unsicherheit bzgl. der Kundenanforderungen und somit auch hinsichtlich grundlegender Planungsprämissen. Der Planer befindet sich daher in einem Spannungsfeld zwischen detaillierter und abgesicherter Planung einerseits sowie einer schnellstmöglichen Realisierung der Fabrik und Reduzierung der Time-to-Market andererseits. Sich ändernde Planungsprämissen hingegen sind oftmals Auslöser für umfangreiche Umplanungen, die zusätzliche Kosten verursachen und verlängerte Projektdauern zur Folge haben. Im Sinne der Lean Philosophie kann an dieser Stelle von Verschwendung im Planungs- und Realisierungsprozess von Fabriken gesprochen werden. Da die Minimierung von Verschwendung in der Produktion ein zentraler Baustein der Lean Philosophie ist und die zugehörigen Methoden Handwerkszeug eines jeden Fabrikplaners sind, muss selbstkritisch durch den Planer hinterfragt werden, welchen Mehrwert eine tiefe und umfangreiche Planung unter unsicheren Rahmenbedingungen hat. Darüber hinaus stellt sich die Frage, wie die Verschwendung von Ressourcen in der Planung und Realisierung von Fabriken minimiert werden kann. Ein volatiles Planungsumfeld erfordert eine schnelle Reaktion des Planers auf sich ändernde Planungsprämissen während der Planung und Realisierung einer Fabrik. Die Frage nach geeigneten Planungsvorgehen und -prozessen, die eine hohe Agilität in der Planung ermöglichen, ist für die praktische und wissenschaftliche Weiterentwicklung der Fabrikplanung relevant. Daher setzt diese Arbeit auf einer fundierten Basis der Fabrikplanungstheorie auf und untersucht, ob durch einen Perspektivwechsel hinsichtlich der Vollständigkeit einer Planung sowie durch ein agiles Fabrikplanungsvorgehen zusätzlicher Planungsmehrwert im volatilen Planungsumfeld geschaffen werden kann.

Zusätzlich zu rein wissenschaftlichen Erkenntnissen hat die Frage nach einem agilen Planungsvorgehen in der Fabrikplanung auch gesellschaftliche Relevanz. In Deutschland, einer industriell geprägten Volkswirtschaft, hatte das produzierende Gewerbe im Jahr 2017 mit 25,7% einen großen Anteil an der Bruttowertschöpfung.¹ Daraus ergibt sich eine besondere Bedeutung der Produktion für den Wohlstand der Bevölkerung. Im internationalen Vergleich

¹ Vgl. Statistisches Bundesamt (Statistisches Jahrbuch Deutschland), 2018, 329 f.