



Christoph Gröger

Advanced Manufacturing Analytics

Datengetriebene Optimierung von Fertigungsprozessen

Lohmar – Köln 2015, 312 Seiten

ISBN 978-3-8441-0420-2

€ 62,- (D) ♦ € 63,70 (A) ♦ sFr 87,-

JOSEF EUL VERLAG GmbH
Fachbuchverlag für
Wirtschaft und Recht

Brandsberg 6
D-53797 Lohmar

Tel.: 0 22 05 / 90 10 6-6
Fax: 0 22 05 / 90 10 6-88

www.eul-verlag.de
info@eul-verlag.de

Industrieunternehmen befinden sich heutzutage in einem globalen Wettbewerb, in dem kontinuierlich optimierte Fertigungsprozesse einen zentralen Erfolgsfaktor darstellen. Traditionelle Ansätze zur Optimierung von Fertigungsprozessen, wie z. B. Lean Production, sind managementgetrieben und erfahrungsbasiert. Die Digitalisierung des Fertigungsmanagements sowie der zunehmende Einsatz cyber-physischer Systeme im Rahmen der Industrie 4.0 führen zu enormen Datenmengen (Big Data), die das Potential für neuartige datengetriebene Optimierungsansätze bieten. Das Ziel besteht darin, durch eine systematische Analyse der Daten neues Wissen zur Prozessoptimierung zu gewinnen.

Vor diesem Hintergrund befasst sich diese Arbeit mit der Entwicklung einer Big-Data- bzw. Business-Intelligence-Plattform, der sogenannten Advanced-Manufacturing-Analytics-Plattform (AdMA-Plattform), zur datengetriebenen Optimierung von Fertigungsprozessen. Den Ausgangspunkt stellt eine umfassende konzeptionelle Betrachtung von Prozessen und IT-Systemen in der Fertigung dar. Davon ausgehend, wird die AdMA-Plattform entwickelt. Diese umfasst eine ganzheitliche Datenhaltung, das Wissensrepository für die Fertigung, das strukturierte und unstrukturierte Daten über den gesamten Fertigungsprozess integriert. Auf dieser Basis werden Data-Mining-basierte Analysedienste für die prädiktive und präskriptive Fertigungsprozess-Analyse umgesetzt, wobei der Benutzerzugriff mit einem mobilen Prozess-Dashboard für Werker und Fertigungsleiter erfolgt. Darüber hinaus wird ein Praxisbeispiel aus der Automobilindustrie dargestellt, bei dem es um die datengetriebene Optimierung eines konkreten Fertigungsprozesses mit der AdMA-Plattform geht.

Diese interdisziplinäre Arbeit richtet sich sowohl an Wissenschaftler als auch an Praktiker mit Interesse an Business Intelligence, Data Warehousing und Data Mining für die Fertigung.

Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Bernhard Mitschang, Universität Stuttgart

Christoph Gröger studierte Wirtschaftsinformatik an den Universitäten Stuttgart, Hohenheim und Manchester. Nach seinem Abschluss im Jahr 2012 war er Doktorand an der Graduiertenschule GSaME (Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering) der Universität Stuttgart bei Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Mitschang. In diesem Rahmen absolvierte er ein interdisziplinäres und praxisorientiertes Promotionsprogramm. Die Forschungsschwerpunkte des Autors liegen in den Bereichen Datenmanagement und Datenanalyse speziell für die Fertigung. Die Promotion zum Dr.-Ing. erfolgte im Jahr 2015.

Geleitwort

Die permanente Optimierung der Fertigungsprozesse ist für Industrieunternehmen im globalen Wettbewerb unverzichtbar. Zu den traditionellen eher management- oder erfahrungsgetriebenen Ansätzen der Fertigungsprozessoptimierung kommen nun sogenannte datengetriebene Techniken hinzu. Diese werden durch die fortschreitende Digitalisierung des Fertigungsmanagements sowie durch den vermehrten Einsatz cyber-physischer Systeme ermöglicht, da damit zum ersten Mal ein umfassend digitales und ausreichend genaues Abbild der Fertigung entsteht. Datengetriebene Optimierungstechniken analysieren die großen Datenmengen hinter diesen digitalen Abbildern, um systematisch neues Wissen zur Prozessoptimierung zu gewinnen.

Einzelfallbezogene, auf spezifische Datenabschnitte zugeschnittene und rein deskriptiv orientierte Lösungskonzepte zur Analyse von Kennzahlen greifen hier deutlich zu kurz, da das Potential der großen Datenmengen damit nicht ausgeschöpft wird und der erforderliche IT-Aufwand mindestens linear mit der Anzahl der Einzelfallanalysen steigt, um nur zwei wichtige Argumente zu nennen. Gesucht ist also eine umfassende und übertragbare Lösung.

Mit dieser Frage hat sich Christoph Gröger in seiner Forschungsarbeit intensiv befasst und mit der sogenannten Advanced-Manufacturing-Analytics-Plattform (AdMA-Plattform) einen ersten umfassenden Lösungsansatz nebst IT-Architektur und prototypischer Implementierung sowie Evaluation erstellt.

Die AdMA-Plattform realisiert einen ganzheitlichen, datengetriebenen Optimierungsansatz für Fertigungsprozesse auf Basis einer allgemeinen Architektur und generisch entwickelter Komponenten zur Datenbereitstellung, Prozessanalyse und Prozessoptimierung, die allesamt einzelfallübergreifend und für unterschiedliche Fertigungsprozesse konzipiert sind. Im Zentrum stehen innovative prädiktive und präskriptive Analyseverfahren unter Verwendung von Data-Mining-Techniken auf der Grundlage einer prozessübergreifenden Datenintegration.

Nicht nur die rein wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse, sondern auch die ersten Rückmeldungen von Praxispartnern verdeutlichen das enorme Potential des von Christoph Gröger entwickelten Lösungsansatzes. Dieser stellt einen ausgezeichneten Einstieg in ein neues, spannendes und gewinnbringendes Kapitel zur Optimierung von Fertigungsprozessen dar.

Maui Hawaii, im August 2015

Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Mitschang

Vorwort

Diese Dissertation entstand an der Universität Stuttgart im Rahmen der Graduiertenschule GSaME (Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering) in Kooperation mit der Abteilung Anwendersoftware des Instituts für Parallele und Verteilte Systeme. Die Graduiertenschule GSaME bietet ein interdisziplinäres Promotionsprogramm für Forschung und Qualifizierung auf dem Gebiet des advanced Manufacturing Engineering, wobei insbesondere Aspekte der Betriebswirtschaft, der Informatik und des Ingenieurwesens integriert untersucht werden.

Mein Dank gilt zuallererst meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Mitschang, der meine Forschungsarbeiten kontinuierlich und mit großem Engagement förderte und mir viele Freiheiten zur Gestaltung meiner Forschung ließ. Er hatte jederzeit ein offenes Ohr für Fragen und Anregungen und gab mir vielfach die Möglichkeit, mich in Kooperationen mit Industriepartnern zu engagieren und damit meine Forschung praxisnah zu gestalten. Außerdem möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Prof. E. h. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. mult. Engelbert Westkämper als aktivem Mitglied meines Betreuer-Komitees und als Mitberichter bedanken, der meine Arbeit durch inspirierende Visionen und Anregungen aus der Perspektive der Fertigung bereicherte. Ebenso danke ich Prof. Dr. Daniela Nicklas für ihre Tätigkeiten als Mitberichterin.

Außerdem gilt mein Dank meinen Kollegen der Abteilung Anwendersoftware des Instituts für Parallele und Verteilte Systeme. Hervorheben möchte ich insbesondere Dr. Holger Schwarz, Florian Niedermann und Christoph Stach, die die Qualität meiner Forschung durch zahlreiche Diskussionsbeiträge, Ratschläge und konstruktive Kritik förderten.

Bedanken möchte ich mich auch für die spannenden Freundschaften, die aus der GSaME entstanden, speziell mit Max Monauni, Eva Hoos, Tobias Tauterat und Nils Schmeinck. Besonders bedanke ich mich bei Max Monauni für die vielen wertvollen Gespräche, die Metaebenen und die sportlichen Events.

Schließlich möchte ich ganz persönlich meinen Eltern Heide und Horst und meinem Bruder Carsten für ihre bedingungslose Unterstützung, ihr Verständnis und ihre Geduld auf meinem Weg zur Promotion danken. Dieser Weg war fachlich und persönlich für mich sehr bereichernd.

Stuttgart, im Juli 2015

Christoph Gröger

Inhaltsverzeichnis

Geleitwort.....	V
Vorwort	VII
Inhaltsverzeichnis.....	IX
Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis.....	XVII
Abkürzungsverzeichnis	XIX
Zusammenfassung	XXI
Abstract	XXV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Praxisbeispiel.....	3
1.3 Herausforderungen	9
1.4 Zielsetzung, Lösungsansatz und Forschungsziele.....	11
1.5 Forschungsbeiträge und eigene Publikationen	13
1.6 Aufbau der Arbeit.....	15
2 Grundlagen und verwandte Arbeiten.....	17
2.1 Produktion und Fertigung.....	17
2.1.1 Kernbegriffe	17
2.1.2 Geschäftsprozesse in Industrieunternehmen	21
2.1.3 IT-Unterstützung in der Fertigung: Hierarchie der Leitebenen	27
2.1.4 Prozessmanagement und Prozessoptimierung	29
2.2 Business Intelligence: IT-Grundlagen der datengetriebenen Optimierung	37
2.2.1 Kernbegriffe	38
2.2.2 Architektur von Business-Intelligence-Anwendungen	41
2.2.3 Data-Warehouse-Grundlagen.....	43
2.2.4 Process Warehouse.....	45
2.2.5 Analyseverfahren: Deskriptiv, prädiktiv, präskriptiv.....	47
2.2.6 Data Mining und Process Mining.....	50
2.3 Verwandte Arbeiten und Abgrenzung.....	56
2.3.1 Manufacturing Execution Systems.....	56
2.3.2 Data-Mining-Ansätze in der Fertigung	62
2.3.3 Data-Mining-Ansätze für Geschäftsprozesse.....	66

2.3.4	Abgrenzung der Advanced-Manufacturing-Analytics-Plattform.....	69
2.4	Zusammenfassung	71
3	Advanced-Manufacturing-Analytics-Plattform.....	73
3.1	Überblick und Architektur.....	73
3.2	Datenbereitstellung.....	76
3.3	Prozessanalyse.....	79
3.4	Prozessoptimierung und Benutzerzugriff.....	84
3.5	Zusammenfassung und eigene Publikationen	85
4	Wissensrepository für die Fertigung	87
4.1	Einführung und Anforderungen	87
4.2	Analytisches Fertigungsprozess-Metamodell.....	89
4.2.1	Entwurfsperspektive.....	92
4.2.2	Laufzeitperspektive	95
4.2.3	Evaluation: Anforderungserfüllung und Abgrenzung.....	98
4.3	Multidimensionales Datenmodell des Wissensrepository.....	106
4.3.1	Fakten.....	107
4.3.2	Dimensionen.....	108
4.3.3	Generalizität und Anwendung im Einzelfall.....	110
4.4	Artefakt-Modell.....	111
4.5	Konzept der prozessorientierten Artefakt-Integration.....	114
4.6	Integrationsarchitekturen.....	116
4.6.1	Speicherung auf logischer Ebene	116
4.6.2	Architekturvarianten.....	119
4.6.3	Vergleich und Bewertung.....	120
4.7	Verwandte Arbeiten und Abgrenzung.....	123
4.8	Zusammenfassung und eigene Publikationen	126
5	Linkbasierte Architektur für das Wissensrepository	129
5.1	Rahmenbedingungen, Anforderungen und Lösungsansatz.....	129
5.2	Link-Modell und linkbasierte Sicht.....	134
5.2.1	Systematisierung von Links und linkbasierten Anfragen	134
5.2.2	Konzeptionelles Link-Modell	135
5.2.3	Generalisierte linkbasierte Sicht.....	139
5.3	Graphorientierte Speicherung von Links	140

5.3.1	Auswahl eines graphorientierten Datenmodells.....	140
5.3.2	Logisches Schema für Links	142
5.4	Prototypische Implementierung und Evaluation	145
5.4.1	Prototyp, Anwendungsszenario und Datengenerierung	146
5.4.2	Machbarkeitsuntersuchung.....	147
5.4.3	Ergebnisse und Diskussion	150
5.5	Verwandte Arbeiten und Abgrenzung.....	151
5.6	Zusammenfassung und eigene Publikationen	155
6	Präskriptive Fertigungsprozess-Analyse	157
6.1	Rahmenbedingungen, Anforderungen und Lösungsansatz	157
6.2	Laufzeitprognostik.....	162
6.3	Empfehlungsgenerierung.....	164
6.3.1	Definition der Datenbasis.....	165
6.3.2	Modellgenerierung	168
6.3.3	Modellanalyse	170
6.3.4	Empfehlungsverarbeitung	173
6.4	Implementierungsaspekte	175
6.5	Verwandte Arbeiten und Abgrenzung.....	180
6.6	Zusammenfassung und eigene Publikationen	183
7	Mobiles Prozess-Dashboard	185
7.1	Einführung und Anforderungen	185
7.2	Zielgruppen und Personalisierung.....	187
7.3	Informationsbedarfe und Dashboard-Dienste	189
7.4	Implementierungsaspekte	192
7.5	Verwandte Arbeiten und Abgrenzung.....	199
7.6	Zusammenfassung und eigene Publikationen	201
8	Prototypische Implementierung und Evaluation	205
8.1	Prototypische Implementierung	205
8.2	Experimentelle Evaluation am Praxisbeispiel.....	209
8.2.1	Datengrundlage: Konkretisierung des multidimensionalen Datenmodells.....	210
8.2.2	Anwendungsszenarien.....	214
8.2.3	Machbarkeitsuntersuchung.....	216
8.2.4	Ergebnisse und Diskussion	220
8.3	Konzeptionelle und komparative Evaluation	231

8.3.1 Konzeptionelle Evaluation: Erfüllung der Forschungsziele.....	231
8.3.2 Komparative Evaluation: Bewertung und Vergleich	234
8.4 Zusammenfassung	239
9 Fazit und Ausblick.....	241
9.1 Fazit.....	241
9.2 Ausblick.....	244
Anhang	249
Anhang A: Durchführung der Anwendungsszenarien mit dem mobilen Prozess-Dashboard	249
Literaturverzeichnis.....	255

Zusammenfassung

Industrieunternehmen befinden sich heute in einem *globalen Verdrängungswettbewerb*, der durch einen enormen Preis- und Kostendruck, eine hohe Komplexität und ein turbulentes Umfeld geprägt ist. *Transparente, agile und kontinuierlich verbesserte Fertigungsprozesse* stellen hierbei einen zentralen Erfolgsfaktor dar.

Traditionelle Ansätze zur Optimierung von Fertigungsprozessen, wie z.B. Lean Production und Total Quality Management, sind *managementgetrieben und erfahrungsbasiert*. Der zunehmende Einsatz cyber-physischer Systeme sowie die Digitalisierung des Fertigungsmanagements durch Manufacturing Execution Systems (MES) führen zu enormen Mengen an strukturierten und unstrukturierten Daten in der Fertigung, die das Potential für neuartige *datengetriebene Optimierungsansätze* bieten. Es geht darum, systematisch neues Wissen zur kontinuierlichen Prozessverbesserung aus den Daten zu gewinnen.

Existierende Datenanalyse- bzw. Business-Intelligence-Anwendungen in der industriellen Praxis, wie z.B. MES und Online-Analytical-Processing-Systeme (OLAP-Systeme), sind durch vier wesentliche technische *Schwachstellen* geprägt, die eine umfassende Extraktion des in den Daten enthaltenen Wissens verhindern: (1) Die Ansätze verwenden nur einen *kleinen Ausschnitt der vorhandenen Daten* ohne eine ganzheitliche Sicht. (2) Sie sind meist rein *deskriptiv und reaktiv* konzipiert, ohne eine Erkennung komplexer Muster in den Daten zu unterstützen. (3) Die Analyseergebnisse sind typischerweise *nur auf das leitende Personal ausgerichtet*, ohne die Fertigungsebene selbst einzubeziehen. (4) Die *Realisierung der Ansätze erfolgt einzelfallbezogen*, d.h. es mangelt an generischen Business-Intelligence-Architekturen für die Fertigung.

Im Zentrum der vorliegenden Arbeit stehen die Konzeption, prototypische Implementierung und Evaluation einer Business-Intelligence-Plattform, der sogenannten *Advanced-Manufacturing-Analytics-Plattform (AdMA-Plattform)*, zur datengetriebenen Optimierung von Fertigungsprozessen. Die AdMA-Plattform adressiert die aufgeführten Schwachstellen existierender Ansätze, um eine ganzheitliche datengetriebene Optimierung von Fertigungsprozessen zu ermöglichen. Die Basis der Arbeit stellt eine umfassende konzeptionelle Strukturierung von *Prozessen und IT-Systemen in der Fertigung* dar. In Ergänzung dazu werden grundlegende *IT-Konzepte zur datengetriebenen Optimierung* aus dem Bereich Business Intelligence dargestellt. Davon ausgehend erfolgt eine fundierte *Schwachstellenanalyse existierender Business-Intelligence-Anwendungen* für die Fertigung, wobei insbesondere MES sowie existierende Data-Mining-Ansätze betrachtet werden. Zusätzlich wird ein *Praxisbeispiel aus der Automobilindustrie* in Kooperation mit einem

Industriepartner dargestellt. Es umfasst einen Fertigungsprozess zur Herstellung von Nockenwellen und dient der Untersuchung spezifischer Herausforderungen der datengetriebenen Prozessoptimierung für eine real vorliegende Produktqualitätsproblematik.

Die *konzeptionelle Architektur* der auf dieser Grundlage entwickelten AdMA-Plattform (Gröger et al. 2012b, Gröger und Stach 2014) umfasst drei Schichten zur *Datenbereitstellung*, *Prozessanalyse* sowie zur *Prozessoptimierung* und integriert sämtliche technischen Komponenten zur datengetriebenen Optimierung von Fertigungsprozessen in einem Gesamtansatz. Hierbei sind die Architektur und ihre Komponenten generisch, d.h. einzelfallübergreifend für unterschiedliche Fertigungsprozesse, konzipiert.

Den Kern der *Datenbereitstellungsschicht* bildet das *Wissensrepository für die Fertigung* (Gröger et al. 2012c, Gröger et al. 2014b, Gröger et al. 2014c). Es dient der Integration strukturierter und unstrukturierter Daten über den gesamten Fertigungsprozess mit sämtlichen Prozessschritten und Ressourcen und unterstützt die prozessorientierte Verwaltung von Wissen im Sinne von aus den Daten gewonnenen Analyseergebnissen, wie z.B. Data-Mining-Modellen. Hierfür wird ein Process-Warehouse-Ansatz auf der Basis eines generischen multidimensionalen Datenmodells für Fertigungsprozesse mit einer Repository-basierten Verwaltung von unstrukturierten Daten kombiniert. Zur technischen Umsetzung wird außerdem eine linkbasierte Integrationsarchitektur vorgestellt, die eine flexible Ad-hoc-Integration strukturierter und unstrukturierter Daten ermöglicht.

Die *Prozessanalytischschicht* umfasst generische Analysedienste, die neben klassischen deskriptiven Analyseverfahren auch prädiktive und präskriptive Verfahren auf der Grundlage des Wissensrepository realisieren. Die *prädiktive Fertigungsprozess-Analyse* (Gröger et al. 2012a) bezieht sich auf Data-Mining-basierte Analyseverfahren für datengetriebene Ursachenanalysen und Prognosen über den gesamten Fertigungsprozess, um z.B. systematisch die Einflussfaktoren für eine Verschlechterung der Fertigungsqualität zu identifizieren. Die *präskriptive Fertigungsprozess-Analyse* (Gröger et al. 2014a) stellt ein Data-Mining-basiertes Analyseverfahren zur proaktiven Optimierung eines Fertigungsprozesses dar. Es ermöglicht die datengetriebene Generierung konkreter Handlungsempfehlungen zur Vermeidung einer prognostizierten Kennzahlenabweichung während der Prozessausführung.

Gegenstand der *Prozessoptimierungsschicht* ist der Benutzerzugriff auf die Analysedienste. Hierfür wird das *mobile Prozess-Dashboard* (Gröger et al. 2013a, Gröger et al. 2013b, Gröger und Stach 2014) vorgestellt. Es ermöglicht die mobile und personalisierte Bereitstellung von

Analyseergebnissen und ergänzenden Informationen für Fertigungsleiter und insbesondere Werker unter Verwendung mobiler Endgeräte, wie z.B. Tablet-PCs, um eine Integration mit der Fertigungsebene zu realisieren.

Auf der Grundlage einer *prototypischen Implementierung* der AdMA-Plattform erfolgt eine *experimentelle Evaluation*, welche die Anwendung des Prototyps im Praxisbeispiel der Nockenwellenherstellung umfasst. Diese ergibt, dass die AdMA-Plattform sowohl die datengetriebene Ursachenanalyse der Einflussfaktoren der Qualitätsproblematik über den gesamten Fertigungsprozess als auch die datengetriebene Generierung konkreter Handlungsempfehlungen zur proaktiven Vermeidung der Qualitätsproblematik während der Prozessausführung ermöglicht. Zusätzlich wird im Rahmen einer *komparativen Evaluation* eine kriterienorientierte Bewertung und ein Vergleich der AdMA-Plattform mit existierenden Business-Intelligence-Anwendungen für die Fertigung vorgenommen.

Summa summarum ermöglicht die AdMA-Plattform mit ihren prädiktiven und präskriptiven Analyseverfahren sowie einer gezielten Informationsbereitstellung auf der Grundlage einer ganzheitlichen Datenbasis die systematische Nutzung der enormen Datenmengen in der Fertigung zur Prozessoptimierung und bietet damit neue Potentiale zur Erhaltung und Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von Industrieunternehmen.

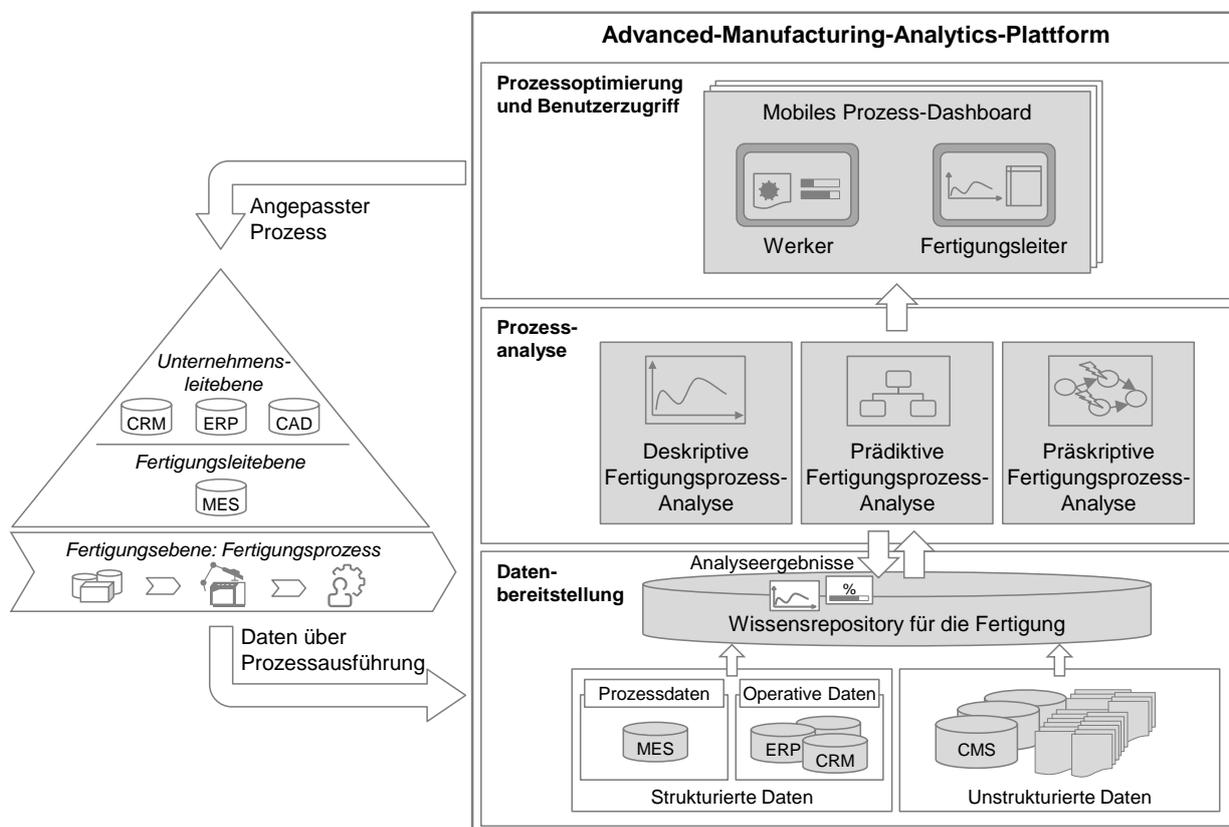


Abbildung: Architektur der Advanced-Manufacturing-Analytics-Plattform

Abstract

Nowadays, *manufacturing companies* are faced with *strong global competition*, which is characterized by high pressure on prices and costs, high complexity and a turbulent environment. In this context, *transparent, agile and continuously improved manufacturing processes* have become a critical success factor.

Traditional concepts for manufacturing process optimization, e.g., Lean Production and Total Quality Management, represent *management-driven and experience-based approaches*. The increasing use of cyber-physical systems as well as the digitalization of manufacturing operations management by manufacturing execution systems (MES) lead to enormous amounts of structured and unstructured manufacturing data. These data offer great potential for novel *data-driven approaches for manufacturing process optimization* by systematically extracting new knowledge for continuous process improvement.

Existing approaches for data analytics and business intelligence in manufacturing, such as, MES and online analytical processing (OALP) systems, suffer from four major *technical weaknesses* that prevent comprehensive knowledge extraction: (1) The approaches are based on *isolated data extracts* not taking a holistic view on the process. (2) They focus on *descriptive and reactive analysis* of metrics without supporting pattern recognition in data. (3) Analysis results are provided *primarily for managerial personnel* without addressing the shop floor level. (4) The *implementation is done case-by-case* in absence of generic business intelligence architectures for manufacturing.

This thesis is about the development and evaluation of a business intelligence platform for continuous data-driven manufacturing process optimization, the so called *Advanced Manufacturing Analytics Platform (AdMA-Platform)*, addressing the above weaknesses. The conceptual foundation of the thesis is comprised of a comprehensive presentation of *processes and IT systems in manufacturing* as well as of central *concepts for data-driven optimization* from the field of business intelligence. Following this, an extensive *analysis of weak points of existing business intelligence applications* for manufacturing including MES and existing data mining approaches is conducted. In addition, a *real-world case example* from the automotive industry is presented comprising the manufacturing of camshafts. At this, technical challenges for data-driven process optimization considering a concrete manufacturing quality problem are investigated. This provides the basis for the development of the AdMA-Platform.

The *conceptual architecture* of the AdMA-Platform (Gröger et al. 2012b, Gröger und Stach 2014) is comprised of three layers for *data integration*, *process analytics* and *process optimization*. It integrates all technical components necessary for data-driven manufacturing process optimization in a holistic approach. At this, the architecture and the components are generic in order to be applicable for different manufacturing processes independent of an individual case.

The *Manufacturing Knowledge Repository* (Gröger et al. 2012c, Gröger et al. 2014b, Gröger et al. 2014c) is at the core of the *data integration layer*. It integrates structured and unstructured data across the entire manufacturing process and additionally supports a process-oriented management of analysis results, e.g., data mining models. For this purpose, it combines a process warehouse approach based on a generic multidimensional data model for manufacturing processes with a repository-based storage of unstructured data. To implement this approach, a link-based integration architecture is presented enabling the flexible ad-hoc integration of structured and unstructured data using information-rich links.

The *process analytics layer* comprises generic analytics services realizing not only traditional descriptive analytics but predictive analytics and prescriptive analytics on top of the Manufacturing Knowledge Repository. *Predictive Manufacturing Analytics* (Gröger et al. 2012a) encompasses data-mining-based analytics for data-driven root cause analyses and predictions across the entire manufacturing process, e.g., to systematically identify influence factors for deteriorating manufacturing quality. *Prescriptive Manufacturing Analytics* (Gröger et al. 2014a) refers to a novel data-mining-based approach for proactive process optimization during process run time. It enables the data-driven generation of concrete action recommendations in order to avoid a predicted metric deviation.

The *process optimization layer* mainly focuses on user access. For this purpose, the *Mobile Manufacturing Dashboard* (Gröger et al. 2013a, Gröger et al. 2013b, Gröger und Stach 2014) is presented. It supports mobile and personalized information provisioning not only for production managers but for workers using mobile devices, such as, tablet pcs, in order to integrate the AdMA-Platform with the shop floor level.

On the basis of a *prototypical implementation* of the entire AdMA-Platform, an *experimental evaluation* is described in the thesis focusing on the application of the prototype in the case example of camshaft manufacturing. This investigation demonstrates that the AdMA-Platform enables both the data-driven identification of root causes for the quality problem across the entire manufacturing process and the data-driven generation of concrete action recommendations to

proactively avoid the quality problem at process runtime. In addition to that, a *comparative evaluation* is conducted referring to a criteria-based assessment and comparison of the AdMA-Platform with existing business intelligence applications in manufacturing.

All in all, the AdMA-Platform systematically exploits the huge amounts of manufacturing data for continuous manufacturing process improvement using novel predictive analytics and prescriptive analytics in combination with targeted information provisioning on top of a holistic data basis. In this way, the AdMA-Platform offers new potentials for enhancing the competitiveness of manufacturing companies.

1 Einleitung

Im Zentrum der vorliegenden Arbeit steht die Entwicklung und Erprobung einer Business-Intelligence-Plattform zur datengetriebenen Optimierung von Fertigungsprozessen, die sogenannte Advanced-Manufacturing-Analytics-Plattform. In diesem einleitenden Kapitel wird in Abschnitt 1.1 die Motivation der Arbeit beschrieben und in Abschnitt 1.2 ein Praxisbeispiel dargestellt, welches einen konkreten Fertigungsprozess zur Herstellung von Nockenwellen und spezifische Probleme der Prozessoptimierung umfasst. Die in dieser Arbeit adressierten technischen Herausforderungen werden in Abschnitt 1.3 aufgeführt, um auf dieser Grundlage die Zielsetzung und die Forschungsziele in Abschnitt 1.4 abzuleiten. Die erzielten Forschungsbeiträge und Publikationen sind Gegenstand des Abschnitts 1.5. Das Kapitel schließt mit einer Beschreibung des Aufbaus der Arbeit in Abschnitt 1.6.

1.1 Motivation

Industrieunternehmen befinden sich heute in einem globalen Verdrängungswettbewerb. Die erheblichen Lohnkostenvorteile von Entwicklungs- und Schwellenländern führen zu einem enormen Preis- und Kostendruck in Hochlohnländern wie Deutschland und den USA. Gleichzeitig steigt die Komplexität durch globale Produktionsnetzwerke, eine Individualisierung der Nachfrage und einen rasanten technologischen Wandel, speziell der Informationstechnologie (IT). Immer kürzere Produktlebenszyklen bei steigender Variantenvielfalt sowie volatile Marktstrukturen prägen das turbulente Umfeld von Industrieunternehmen und erfordern Wandlungsfähigkeit (Westkämper 2009, Westkämper 2013b).

Entscheidende Eckpunkte der Wettbewerbsfähigkeit sind folglich eine schnelle Reaktion auf veränderte Umweltbedingungen und Kundenwünsche sowie kurze Durchlauf- und Lieferzeiten bei einer gleichbleibend hohen Produktqualität und kosteneffizienten Unternehmensabläufen. Transparente, agile und wirtschaftliche Fertigungsprozesse, eingebettet in ein System der kontinuierlichen Verbesserung, stellen hierbei einen zentralen Erfolgsfaktor für produzierende Unternehmen dar (Kletti und Schumacher 2011). Bei der Prozessoptimierung geht es heute nicht mehr nur darum, die Prozessleistung ex post historisch zu analysieren und reaktiv Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten, sondern bereits vor oder während der Prozessausführung Prozessanomalien zu prognostizieren und proaktiv Gegenmaßnahmen einzuleiten (Muehlen und Shapiro 2010, Konrad et al. 2013).

Traditionelle Philosophien und Ansätze zur Optimierung von Fertigungsprozessen, wie Lean Production, Total Quality Management und Six Sigma, sind managementgetrieben und erfahrungsbasiert (Becker 2008). Sie bieten Managementmethoden und Vorgehensweisen, z.B. zur systematischen Fehleranalyse, kombiniert mit aus der Erfahrung gewonnenen Best Practices. Die Identifikation und Realisierung konkreter Verbesserungspotentiale hängen hierbei stark vom Fachwissen und den analytischen Fähigkeiten des jeweiligen Experten im Einzelfall ab.

Der zunehmende Einsatz cyber-physischer Systeme, die Einbettung von Sensoren in Maschinen und Anlagen sowie die Digitalisierung des Fertigungsmanagements durch Manufacturing Execution Systems (MES) führen zu enormen Mengen an strukturierten und unstrukturierten Daten in der Fertigung, die das Potential für neuartige datengetriebene Optimierungsansätze bieten. Es geht um eine umfassende Analyse der Daten, um systematisch neues Wissen, d.h. handlungsrelevante Erkenntnisse, zur kontinuierlichen Verbesserung von Fertigungsprozessen aus den Daten zu gewinnen (Kemper et al. 2013, Schöning und Dorchain 2014).

Existierende Datenanalyse- bzw. Business-Intelligence-Anwendungen in der industriellen Praxis basieren auf der manuellen, kennzahlenorientierten Analyse einzelner Fertigungsdaten, z.B. in Form von MES-Kennzahlenberichten für die Fertigungsleitung und das Unternehmensmanagement (Kletti 2006). Diese Ansätze haben vier wesentliche Schwachstellen, die eine umfassende Extraktion und Nutzung des in den Daten enthaltenen Wissens verhindern: (1) Die Ansätze verwenden nur einen *kleinen Ausschnitt der vorhandenen Daten* ohne eine ganzheitliche Sicht auf den Fertigungsprozess einzunehmen. (2) Sie sind meist *rein deskriptiv und reaktiv* konzipiert und bieten keine Unterstützung, um komplexe Muster in den Daten zu identifizieren und daraus systemgestützt Prognosen und Handlungsempfehlungen abzuleiten. (3) Die Analyseergebnisse sind typischerweise *nur auf das leitende Personal ausgerichtet*, eine Rückkopplung und Integration der Ergebnisse mit der Fertigungsebene stehen nicht im Fokus. (4) Die *Realisierung der Ansätze erfolgt einzelfallbezogen*, es mangelt an generischen Business-Intelligence-Architekturen und -Modellen für die Fertigung. Infolge dieser Unzulänglichkeiten dienen existierende Datenanalyseanwendungen in der Praxis meist nur der Herstellung einer kennzahlenorientierten Prozesstransparenz sowie als Datenlieferant für traditionelle Optimierungsansätze, z.B. zur Kennzahlenberechnung im Wertstromdesign (Erlach 2010).

Das Ziel dieser Arbeit ist die Konzeption, prototypische Implementierung und Evaluation einer integrierten, generischen Business-Intelligence-Plattform zur kontinuierlichen datengetriebenen Optimierung von Fertigungsprozessen, der sogenannten *Advanced-Manufacturing-Analytics-Plattform (AdMA-Plattform)*. Die AdMA-Plattform adressiert die aufgeführten Schwachstellen,

um das Potential der enormen Datenmengen in der Fertigung für die Prozessoptimierung nutzbar zu machen. Dabei liegt der Fokus auf einer ganzheitlichen Optimierung des Fertigungsprozesses unter Einbeziehung aller Prozessschritte und Ressourcen. Die Grundlage der AdMA-Plattform ist eine ganzheitliche Datenhaltung, das *Wissensrepository für die Fertigung*. Es integriert strukturierte und unstrukturierte Daten und ermöglicht darüber hinaus die Verwaltung von Wissen im Sinne von aus den Daten gewonnenen Analyseergebnissen. Auf dieser Basis werden Data-Mining-basierte Analyseverfahren für die *prädiktive und präskriptive Fertigungsprozess-Analyse* umgesetzt, die Ursachenanalysen und Prognosen der Prozessleistung sowie die proaktive Generierung konkreter Handlungsempfehlungen unterstützen. Die Analyseergebnisse werden schließlich mittels des *mobilen Prozess-Dashboard* Werkern und Fertigungsleitern mobil und personalisiert zur Verfügung gestellt.

1.2 Praxisbeispiel

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Praxisbeispiel bei einem Industriepartner in der Automobilindustrie untersucht, um einen konkreten Fertigungsprozess, nämlich die Herstellung von Nockenwellen, und spezifische Herausforderungen der Prozessoptimierung für eine real vorliegende Problemstellung bei diesem Fertigungsprozess zu analysieren. Das Praxisbeispiel dient als fortlaufendes Beispiel in dieser Arbeit zur Illustration der entwickelten Konzepte und stellt darüber hinaus die Grundlage für die Anforderungsermittlung und Evaluation dar. Im Folgenden werden das Unternehmen und die grundlegenden IT-Systeme überblicksartig dargestellt, um dann auf den Fertigungsprozess sowie die Herausforderungen bei der Prozessoptimierung einzugehen. Es ist anzumerken, dass bestimmte Sachverhalte des Praxisbeispiels aus Geheimhaltungs- und Verständlichkeitsgründen im Vergleich zur Realität angepasst und verallgemeinert sind, wobei die konstituierenden Charakteristika gewahrt werden.

Unternehmen und IT-Systeme

Im Zentrum des Praxisbeispiels steht ein Komponentenfertiger aus der Automobilindustrie, die Motoren AG (fiktiver Name aus Geheimhaltungsgründen). Die Motoren AG ist ein westeuropäisches Großunternehmen, das verschiedene Komponenten für Motoren von Nutzfahrzeugen, insbesondere Bussen und LKWs, herstellt. Das Produktspektrum umfasst beispielsweise Motorblöcke, Zylinderköpfe, Kolben, Kurbelwellen und Nockenwellen für Nutzfahrzeugmotoren mit unterschiedlichen Hubraumgrößen und Abgasnormen (siehe zu Motoren (Basshuysen und Schäfer 2015)). Die Kunden der Motoren AG sind Nutzfahrzeughersteller weltweit, die als Original Equipment Manufacturers (OEMs) (Wallentowitz et al. 2009) selbstgefertigte oder bezogene

Komponenten zu kompletten Nutzfahrzeugen kombinieren und am Markt anbieten. Die Motoren AG ist dementsprechend als Zulieferer für OEMs der Nutzfahrzeugbranche tätig.

Die Situation in der Nutzfahrzeugbranche ist durch einen starken globalen Wettbewerb sowohl auf der Ebene der OEMs als auch der Zulieferer geprägt. Das Wachstum traditioneller Märkte für Nutzfahrzeuge in den USA und Westeuropa stagniert, Wachstumsimpulse kommen im Wesentlichen aus Schwellenländern, wobei die weltweite Nachfrage zyklisch verläuft und aufgrund infrastruktureller und regulatorischer Unterschiede sehr regional geprägt ist. Dies führt zu einer großen Vielfalt an Produktvarianten, die eine hohe Komplexität von Fertigungsprozessen mit sich bringt (Lehmann und Grzegorski 2008). Im Gegensatz zu PKWs im privaten Umfeld stellen Nutzfahrzeuge Investitionsgüter dar, so dass neben dem Kaufpreis auch die Fahrleistung und die Höhe der laufenden Kosten wesentliche Kaufkriterien sind (Epkér 2014). Diese Rahmenbedingungen führen zu hohen Anforderungen an die Effektivität, Effizienz und Wandelbarkeit der Fertigungsprozesse in der Nutzfahrzeugbranche, um hochqualitative Produkte in einem definierten Kosten- und Zeitrahmen herzustellen. Die Minimierung von Durchlaufzeiten sowie die Maximierung der Ausbringungsmengen im Rahmen einer kontinuierlichen Verbesserung der Fertigungsprozesse stellen folglich zentrale Erfolgsfaktoren für die Fertigung der Motoren AG dar.

Die System-Landschaft der Motoren AG umfasst eine Vielzahl an historisch gewachsenen IT-Systemen für die digitale Produktion (Westkämper 2013a), d.h. zur digitalen Unterstützung und Automatisierung von Geschäfts- und Fertigungsprozessen. Neben Computer-Aided-Design- und Computer-Aided-Planning-Systemen (CAD- und CAP-Systemen) zur digitalen Produkt- und Produktionssystementwicklung wird insbesondere ein Enterprise-Resource-Planning-System (ERP-System) eingesetzt, das die Produktionsplanung und -steuerung, die Abwicklung administrativer Prozesse sowie die Stammdatenverwaltung unterstützt. Im Rahmen des Fertigungsmanagements findet außerdem ein MES Anwendung, das insbesondere der Betriebsdatenerfassung und -auswertung dient, um die Durchführung der Fertigungsprozesse zu überwachen und die Prozessleistung anhand von Kennzahlen zu analysieren (siehe zu IT-Systemen Abschnitt 2.1).

Fertigungsprozess zur Nockenwellenherstellung

Ein zentraler Fertigungsprozess der Motoren AG umfasst die Großserienfertigung unterschiedlicher Varianten von Nockenwellen für Heavy-Duty-Motoren, d.h. für Dieselmotoren schwerer Nutzfahrzeuge. Die wesentliche Aufgabe einer Nockenwelle als Motorenkomponente ist das Öffnen und Schließen der Ein- und Auslassventile an den Zylindern des Motors. Im Folgenden geht es um die Heavy-Duty-Nockenwelle (HD-Nockenwelle), die ein neues Zulieferprodukt der

Motoren AG für Bus- und LKW-OEMs darstellt. Die HD-Nockenwelle ist eine gebaute Nockenwelle (siehe Abbildung 1), die aus einem Stahlrohr, darauf gefügten Nocken und einem Antriebsrad besteht. Hierbei wird in dieser Arbeit aus Vereinfachungsgründen von unterschiedlichen Typen von Nocken abstrahiert (siehe zu Nockenwellen (Hoffmann et al. 2015)).



Abbildung 1: Beispiel einer Nockenwelle (Autewo 2015)

Der Fertigungsprozess zur Herstellung der HD-Nockenwelle besteht aus acht automatisierten Prozessschritten (siehe Abbildung 2), die in Anlehnung an eine Fließfertigung organisiert sind. Dieser Prozess beginnt mit dem Härten, dem Planschleifen sowie dem Drehen und Schleifen der Nocken. Anschließend werden die bearbeiteten Nocken auf das Rohr gefügt, um die Nockenwelle als Gesamtbauteil zu schleifen sowie zu entgraten und zu waschen. Am Ende des Fertigungsprozesses erfolgt eine umfassende Qualitätsprüfung der Nockenwelle. Logistische Aspekte, wie z.B. Transportschritte, werden hier nicht betrachtet, da sie für die zu analysierende Problemstellung nicht relevant sind.

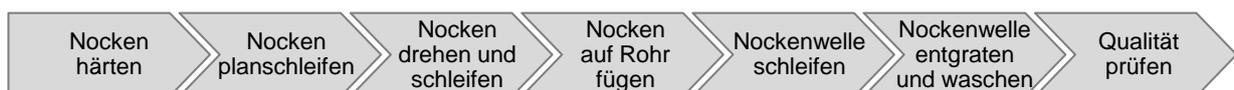


Abbildung 2: Fertigungsprozess der Motoren AG zur Nockenwellenherstellung

Die Prozessschritte werden im Folgenden anhand der wesentlichen Fertigungsverfahren, Maschinen, Werkzeuge und Materialien kurz beschrieben. Eine weitergehende allgemeine Darstellung der Nockenwellenherstellung findet sich in (Hagedorn 2006, Köhler und Flierl 2012). Für Details zu den einzelnen Fertigungsverfahren sei auf (Westkämper und Warnecke 2010) verwiesen.

- Das *Härten der Nocken* umfasst das Erhitzen und Abschrecken der angelieferten Stahlrohlinge der Nocken zur Erhöhung der Widerstandsfähigkeit. Anschließend werden die Nocken angelassen, d.h. erneut erwärmt, um innere Spannungen abzubauen. Hierfür wird eine Härtemaschine zum Induktionshärten eingesetzt. Der Induktorensatz der Härtemaschine stellt

das zentrale Werkzeug dar, wobei als Abschreckmittel eine Wasserlösung verwendet wird. Typische Härteparameter sind beispielsweise die Aufheizzeit, die elektrische Spannung sowie die Abschreckzeit.

- Beim *Planschleifen der Nocken* werden die beiden Außenseiten der Nocken mit einer Schleifmaschine geschliffen. Die Güte der Oberflächenbearbeitung hängt hierbei wesentlich von den Eigenschaften der verwendeten Schleifscheibe, z.B. der Körnung, und den Schleifparametern, wie z.B. der Schnittgeschwindigkeit, ab. Darüber hinaus wird ein Kühlschmiermittel zur Wärmeabfuhr eingesetzt.
- Das *Drehen und Schleifen der Nocken* bezieht sich auf die Bearbeitung der Innenseite der Nocken mit einer Nockenbearbeitungsmaschine, die eine Kombination aus Dreh- und Schleifmaschine darstellt. Das Drehen dient einer Grobbearbeitung der Innenseite, die durch anschließendes Schleifen nachbearbeitet wird. Hierbei werden eine Wendeschneidplatte und ein Schleifdorn als Werkzeuge eingesetzt. Relevante Dreh- und Schleifparameter sind z.B. Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit sowie Zustellung.
- Beim *Fügen der Nocken auf das Rohr* werden die einzelnen Nocken mittels eines Füge-roboters auf einem Rohr aufgeschraubt. Hierfür werden die Nocken erwärmt, an ihre entsprechende Position auf das Rohr geschoben und ausgerichtet, um schließlich mit einem Abschreckmittel abgekühlt und fixiert zu werden und damit einen kraftschlüssigen Verbund herzustellen. Zusätzlich wird das Antriebsrad, das als Vorprodukt eingeht, auf das Rohrende aufgeschraubt. Der Greifer des Roboters sowie der Induktorensatz stellen die zentralen Werkzeuge beim Fügen dar. Wesentliche Fügeparameter sind Aufwärmzeit und elektrische Spannung sowie Halte- und Sprühzeit für das Fixieren der einzelnen Nocken auf dem Rohr. Durch das Fügen der Nocken auf das Rohr entsteht die Nockenwelle als Gesamtbauteil. Die Rohre gehen in diesem Prozessschritt als Vorprodukte in den Fertigungsprozess ein, sind also bereits geschliffen und gewaschen.
- Beim *Schleifen der Nockenwelle* werden die Lagerstellen zwischen den Nocken auf dem Rohr sowie die äußeren Konturen der Nocken mit einer Schleifmaschine bearbeitet, um eine definierte Oberflächengüte herzustellen. Das wesentliche Werkzeug ist dementsprechend die eingesetzte Schleifscheibe. Typische Schleifparameter in diesem Prozessschritt sind Zustellung, Drehzahl der Nockenwelle und Schnittgeschwindigkeit.
- Das *Entgraten und Waschen der Nockenwelle* dient der Nachbearbeitung, indem in einer Reinigungs- und Entgratanlage die Nockenwelle mittels einer Rundbürste als Werkzeug von Graten befreit und anschließend gewaschen wird. Typische Bearbeitungsparameter sind die Umfangsgeschwindigkeit der Bürste sowie die Drehzahl der Nockenwelle.

- Beim *Prüfen der Qualität* werden mittels einer Nockenwellenprüfmaschine die Positionen und Fügewinkel der einzelnen Nocken gemessen und die Nocken im Rahmen einer Wirbelstromprüfung auf Risse geprüft.

Der gesamte Fertigungsprozess ist hoch automatisiert, um eine geplante Ausbringungsmenge von 300.000 Nockenwellen im Jahr zu erzielen. Die Werker in den einzelnen Prozessschritten sind für die Maschinenüberwachung, das steuernde Eingreifen in Ausnahmesituationen, wie z.B. bei Störungen und Qualitätsproblemen, sowie die Durchführung routinemäßiger Wartungsvorgänge verantwortlich.

Problemstellung und Herausforderungen bei der Prozessoptimierung

Die im Rahmen des Praxisbeispiels betrachtete Fertigung der HD-Nockenwelle befindet sich in der Produktionshochlaufphase, um die geplante Ausbringungsmenge zu erreichen. Hierbei zeigen sich jedoch erhebliche Qualitätsprobleme, da rund 7% der hergestellten Nockenwellen bei der Qualitätsprüfung Risse an bestimmten Nocken aufweisen. Die betroffenen Nockenwellen stellen Ausschuss dar und müssen entsorgt werden. Dies führt zu erheblichen Mehrkosten von rund 300.000 € pro Jahr. Als Sofortmaßnahme wird eine gesonderte Qualitätsprüfung der Nocken direkt nach dem Härten im Fertigungsprozess eingeführt, die jedoch keine Auffälligkeiten zeigt.

Die Unternehmensleitung der Motoren AG veranlasst daraufhin die Durchführung eines Optimierungsprojekts, um systematisch die Ursachen für das Qualitätsproblem zu ermitteln. Das Ziel besteht in einer Reduzierung des Ausschusses auf höchstens 0,5% der Produktionsmenge. Darüber hinaus soll der Fertigungsprozess kontinuierlich verbessert werden, um langfristig eine Null-Fehler-Fertigung (Jeschke 1997) zu erreichen.

Das Optimierungsprojekt umfasst in Anlehnung an die Six-Sigma-Methode (Pyzdek und Keller 2010) insbesondere die Durchführung von Experteninterviews sowie von Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analysen (Bertsche und Lechner 2004) mit Fachingenieuren des Fertigungsprozesses. Daraus resultieren physikalisch-technische Hypothesen für die Rissbildung. Insbesondere Zugeigenspannungen der Nocken werden als Ursache für Risse betrachtet, wobei eine Vielzahl an Parametern über den gesamten Fertigungsprozess identifiziert wird, die potentielle Einflussfaktoren darstellen. Es geht z.B. um Härteparameter, Eigenschaften der Schleifscheiben beim Planschleifen sowie die Zusammensetzung des Abschreckmittels beim Härten. Darüber hinaus sind Eigenschaften der eingesetzten Materialien, wie z.B. der verwendete Werkstoff, sowie Wartungsdetails wie die Abrichttiefe der Schleifscheiben miteinzubeziehen. Eine erste heuristische

Anpassung ausgewählter Parameter, speziell beim Härten und beim Planschleifen, führt jedoch nur zu geringfügigen Verbesserungen.

Die Motoren AG verfolgt daraufhin das Ziel, die Daten zum Fertigungsprozess ganzheitlich und systematisch zu analysieren, um Zusammenhänge zwischen sämtlichen Parametern über den gesamten Prozess als Ursachen für die Rissbildung zu identifizieren. Das bisher für die Datenanalyse eingesetzte MES ermöglicht jedoch nur eine manuelle Analyse ausgewählter Kennzahlen, wie z.B. Auslastung der Maschinen oder Ausschussmengen, nach vordefinierten Dimensionen. Eine systemgestützte Erkennung komplexer Muster und Trends in den Daten ist nicht möglich. Zudem werden ergänzende Daten zu den Prozesssubjekten, wie z.B. Daten zu Materialien und Werkzeugen, nicht berücksichtigt.

Aus diesen Gründen ist ein ganzheitlicher Datenanalyse- bzw. Business-Intelligence-Ansatz erforderlich, der sämtliche Daten zum Fertigungsprozess – d.h. prozessorientierte Daten aus dem MES sowie operative Daten zu Prozesssubjekten, z.B. aus dem ERP-System – integriert und hinsichtlich komplexer Zusammenhänge und Muster analysiert und damit Wissen extrahiert. Die Analyseergebnisse sind nicht nur reaktiv für die Fertigungsleitenebene und die Unternehmensleitenebene bereitzustellen, sondern auch proaktiv Werkern auf der Fertigungsebene zur Verfügung zu stellen, um die Entstehung möglicher Störungen und Kennzahlenabweichungen während der Prozessausführung zu vermeiden.

Es geht dementsprechend einerseits um datengetriebene Ursachenanalysen über den gesamten Fertigungsprozess unter Einbeziehung sämtlicher Prozessschritte und Ressourcen, um die relevanten Einflussgrößen für Störungen und Kennzahlenabweichungen zu identifizieren. Andererseits geht es um eine datengetriebene proaktive Optimierung während der Prozessausführung, um konkrete Handlungsempfehlungen zur Vermeidung prognostizierter Prozessanomalien zu generieren. Dieser Gesamtansatz zur datengetriebenen Optimierung des Fertigungsprozesses soll hierbei nicht nur auf den Einzelfall der Nockenwellenherstellung zugeschnitten, sondern auf sämtliche Fertigungsprozesse der Motoren AG übertragbar sein, um das gesamte Produktionssystem des Unternehmens kontinuierlich zu verbessern. Die Realisierung dieses Ansatzes ist jedoch mit den existierenden IT-Systemen der Motoren AG nicht möglich und erfordert die Entwicklung einer neuartigen ganzheitlichen Business-Intelligence-Plattform.

1.3 Herausforderungen

Auf der Basis des Praxisbeispiels sowie einer umfassenden Analyse der Schwachstellen existierender Business-Intelligence-Anwendungen (siehe Abschnitt 2.3) werden vier allgemeine technische Kernherausforderungen für eine datengetriebene Optimierung von Fertigungsprozessen identifiziert. Diese Herausforderungen stellen die Grundlage der in dieser Arbeit adressierten Forschungsziele dar und werden anhand eines generischen Zyklus für die analytische Datenverarbeitung angelehnt an (Niedermann et al. 2010) strukturiert.

Dieser Zyklus besteht aus drei Phasen (siehe Abbildung 3): der Datenbereitstellung, der Analyse sowie der eigentlichen Optimierung, die den Benutzerzugriff miteinschließt. Den Ausgangspunkt bildet die Ausführung eines Prozesses, in deren Rahmen Daten erzeugt werden. Die Hierarchie der Leitebenen in Abbildung 3 verdeutlicht, dass es in dieser Arbeit um Fertigungsprozesse geht und die Daten von IT-Systemen auf unterschiedlichen Leitebenen der Fertigung stammen können (siehe zur Hierarchie der Leitebenen Abschnitt 2.1.3). Die *Datenbereitstellung* dient der Integration der Daten. Die *Analyse* fokussiert auf die Auswertung der Daten mittels unterschiedlicher Analyseverfahren. Die Phase der *Optimierung* bezieht sich auf die Ableitung und Umsetzung konkreter Verbesserungsmaßnahmen auf Basis der Analyseergebnisse, um eine Prozessanpassung zu realisieren. Die Ausführung des angepassten Prozesses bildet die Grundlage für die Generierung neuer Daten und die erneute Durchführung der drei Phasen, um eine kontinuierliche Verbesserung zu erreichen. In Abbildung 3 werden die vier identifizierten Herausforderungen H_i anhand dieses Zyklus strukturiert und im Folgenden beschrieben.

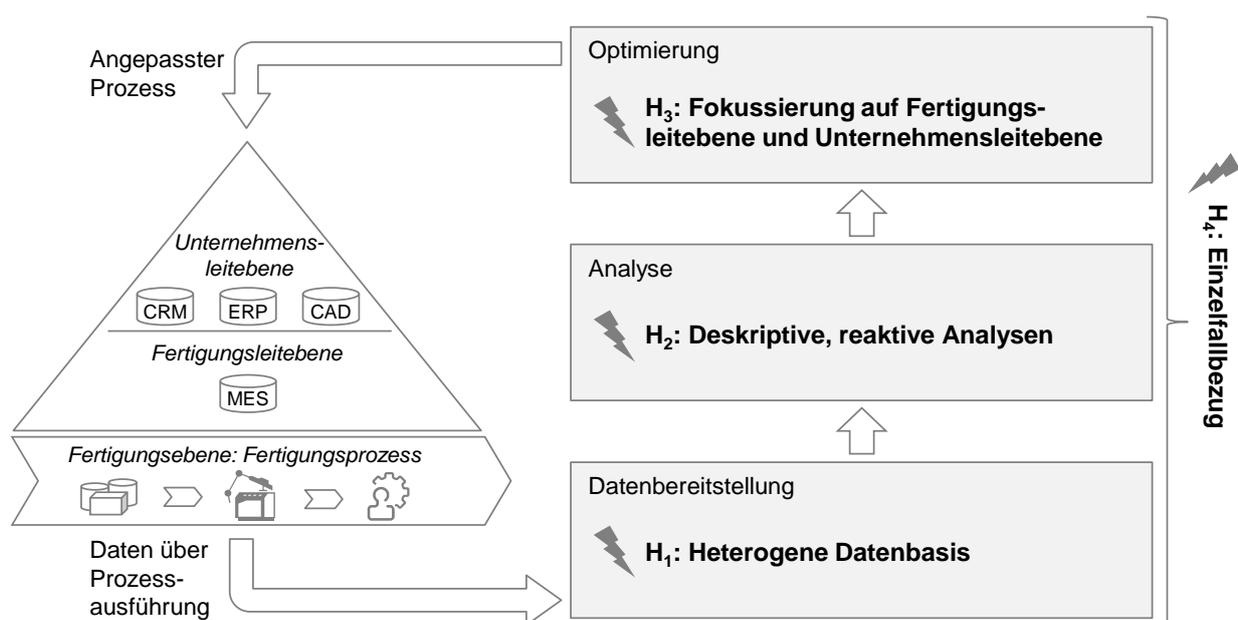


Abbildung 3: Herausforderungen (H_i) der datengetriebenen Optimierung von Fertigungsprozessen

Herausforderung H₁: Heterogene Datenbasis

Die für die Optimierung von Fertigungsprozessen relevanten Daten sind heterogen, d.h. sie sind über verschiedene IT-Systeme verteilt und werden in unterschiedlichen technischen Formaten gespeichert (Kemper et al. 2013). Neben prozessorientierten Daten (Synonym: Prozessdaten) zum Prozessfluss, z.B. Maschineneinstellungen und Messergebnissen, geht es zusätzlich um operative Daten, welche die Prozesssubjekte näher beschreiben, z.B. Wartungsdaten zu Maschinen oder Daten zu den eingesetzten Materialien und deren Lieferanten. Neben diesen strukturierten Daten geht es außerdem um unstrukturierte Daten, z.B. Störungsberichte, Schichtprotokolle oder Fotos von Fertigungsfehlern. Existierende Business-Intelligence-Anwendungen verwenden typischerweise nur isolierte, strukturierte Daten, meistens ausschließlich Prozessdaten. Eine integrierte Betrachtung wird dabei vernachlässigt. Das Erkennen übergreifender Zusammenhänge, z.B. zwischen Eigenschaften der Prozesssubjekte und der Prozessleistung, ist somit deutlich erschwert.

Herausforderung H₂: Deskriptive, reaktive Analysen

Existierende Business-Intelligence-Anwendungen in der Fertigung, speziell MES, basieren meist auf deskriptiven, d.h. rein beschreibenden, Analyseverfahren auf der Grundlage von Kennzahlen und werden meist reaktiv nach dem Eintreten von Abweichungen oder zur reinen Prozessüberwachung eingesetzt (Kletti 2006). Ein Beispiel ist die Generierung von Kennzahlenberichten mit MES. In den Daten enthaltene Muster und Trends bleiben somit meistens unentdeckt, was eine Erkennung von Prozessanomalien und eine proaktive Ableitung von Gegenmaßnahmen verhindert.

Herausforderung H₃: Fokussierung auf Fertigungsleitebene und Unternehmensleitebene

Die Analyseergebnisse existierender Business-Intelligence-Anwendungen fokussieren auf Zielgruppen auf der Fertigungsleitebene und der Unternehmensleitebene, z.B. Fertigungsleiter. Es mangelt an einer direkten Rückkopplung mit der Fertigungsebene (Bracht et al. 2011). Das heißt, es erfolgt kein systematisches Herunterbrechen und Aufbereiten der aus dem Prozessgeschehen gewonnenen Analyseergebnisse für operative Zielgruppen, wie Werker im Fertigungsprozess, abgesehen von einfachen Kennzahlendarstellungen. Dies erschwert prozessintegrierte Optimierungsansätze sowie die Einbindung des Fachwissens operativer Mitarbeiter in den Verbesserungsprozess.

Herausforderung H₄: Einzelfallbezug

Die Heterogenität von Fertigungsprozessen und IT-Systemen in unterschiedlichen Branchen und Unternehmen führt dazu, dass Business-Intelligence-Anwendungen in der Fertigung typischerweise einzelfallspezifisch implementiert werden (Harding et al. 2006). Zudem ist für eine Realisierung eine Vielzahl unterschiedlicher IT-Komponenten zur Datenbereitstellung, Analyse und Optimierung erforderlich, die in einem Gesamtsystem zu integrieren sind. Dies führt zu einer hohen Realisierungskomplexität und einem niedrigen Wiederverwendungsgrad, was die Kosten und das Risiko für die Umsetzung von Business-Intelligence-Anwendungen in der Fertigung erhöht.

1.4 Zielsetzung, Lösungsansatz und Forschungsziele

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Konzeption, prototypische Implementierung und Evaluation einer integrierten Business-Intelligence-Plattform zur kontinuierlichen datengetriebenen Optimierung von Fertigungsprozessen, die AdMA-Plattform, welche die beschriebenen Herausforderungen adressiert. Dabei liegt der Fokus auf einer ganzheitlichen Optimierung des Fertigungsprozesses. Das heißt, es werden nicht isolierte Prozessschritte betrachtet, sondern der Gesamtprozess mit allen Schritten und Ressourcen wird hinsichtlich definierter Ziele verbessert. Hierbei geht es nicht um die Verbesserung der Produktionsplanung und -steuerung, sondern um den eigentlichen Fertigungsprozess, wie er im Rahmen des Fertigungsmanagements mittels MES verwaltet wird.

Aufgrund der strukturellen Ähnlichkeit der Zielsetzung und der Herausforderungen orientiert sich diese Arbeit konzeptionell am Deep-Business-Optimization-Rahmenwerk (Niedermann et al. 2010, Niedermann und Schwarz 2011), welches eine Plattform zur präskriptiven Analyse von Geschäftsprozessen auf der Grundlage einer Integration prozessorientierter und operativer Daten definiert. Grundlegende konzeptionelle Unterschiede zwischen Fertigungs- und Geschäftsprozessen – sowohl hinsichtlich der zugrundeliegenden Metamodelle als auch der zugehörigen IT-Unterstützung – verhindern jedoch eine direkte Anwendung des Rahmenwerks im Fertigungskontext und erfordern die Entwicklung einer domänenspezifischen Lösung. Der in der vorliegenden Arbeit verfolgte Lösungsansatz besteht demzufolge in der Definition einer ganzheitlichen Datenbasis über den gesamten Fertigungsprozess, auf der Data-Mining-basierte prädiktive und präskriptive Analyseverfahren angewendet und zielgruppenorientiert bereitgestellt werden. Dieser Lösungsansatz basiert methodisch auf dem Design-Science-Ansatz (Hevner et al. 2004) und dem Grundgedanken der gestaltungsorientierten Wirtschaftsinformatik (Österle et al. 2010).

Es geht dementsprechend um eine systematische und nachvollziehbare Entwicklung generalisierter, für ein bestimmtes Anwendungsproblem relevanter und nutzenstiftender IT-Artefakte und deren systematische Evaluation.

Aus der Zielsetzung sowie den in Abschnitt 1.3 beschriebenen Herausforderungen ergeben sich die nachfolgend beschriebenen Forschungsziele (siehe Abbildung 4). Jede Herausforderung H_i wird auf ein entsprechendes Forschungsziel FZ_i abgebildet, um daraus die zugehörigen Forschungsanforderungen FA_{ij} zur Erreichung des jeweiligen Ziels abzuleiten.

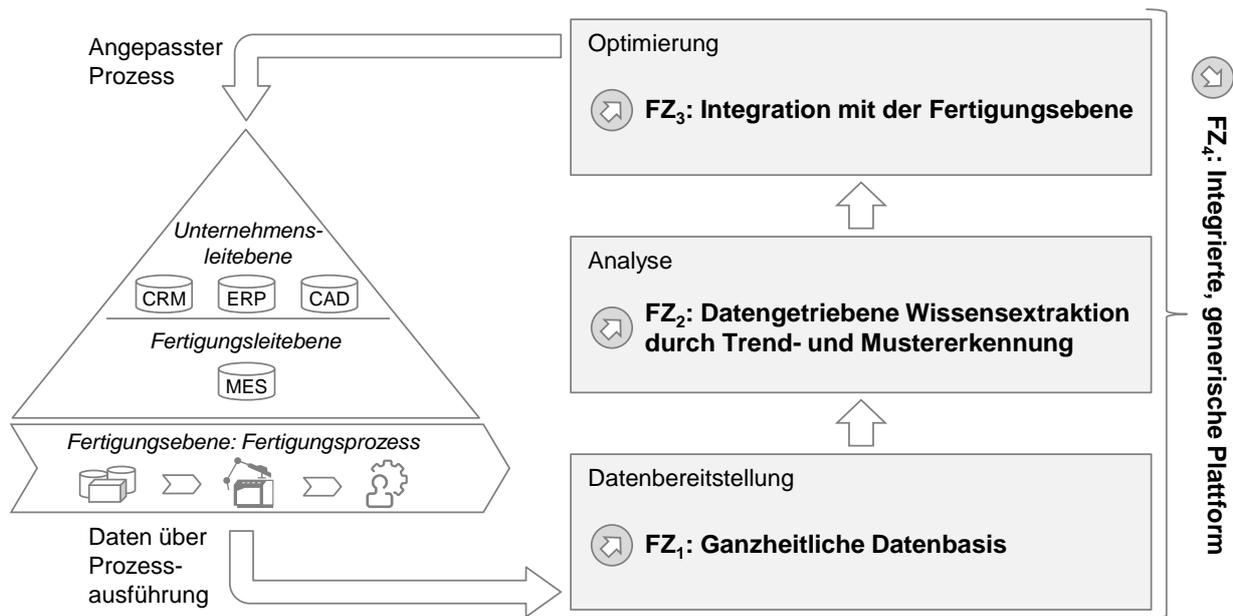


Abbildung 4: Forschungsziele (FZ_i) dieser Arbeit

Forschungsziel FZ₁: Ganzheitliche Datenbasis

Das Ziel ist die Integration heterogener Daten in einer ganzheitlichen Datenbasis als Grundlage für unterschiedliche Analyseverfahren. Diese Datenbasis integriert strukturierte Prozessdaten mit zugehörigen strukturierten operativen Daten über den gesamten Fertigungsprozess (FA₁₁) und ermöglicht zusätzlich eine flexible Integration unstrukturierter Daten (FA₁₂). In diesem Rahmen sind auch Analyseergebnisse, wie Kennzahlenberichte und Data-Mining-Modelle, mit Bezug zum Fertigungsprozess zu integrieren, um sie für eine Wiederverwendung und weitergehende Analysen bereitzustellen (FA₁₃).

Forschungsziel FZ₂: Datengetriebene Wissensextraktion durch Trend- und Mustererkennung

Das Ziel ist es, in der Datenbasis verborgene Muster und Trends über den gesamten Fertigungsprozess zu erkennen, um daraus Wissen zur Prozessoptimierung zu gewinnen. Es geht darum, über rein deskriptive Kennzahlenanalysen hinauszugehen und prädiktiv Ursachenanalysen und

Prognosen der Prozessleistung über den gesamten Prozess durchzuführen (FA₂₁) und präskriptiv Handlungsempfehlungen für eine proaktive Optimierung abzuleiten (FA₂₂).

Forschungsziel FZ₃: Integration mit der Fertigungsebene

Das Ziel ist eine Bereitstellung und Rückkopplung von Analyseergebnissen für und mit Mitarbeitern auf der Fertigungsebene, um eine prozessintegrierte Optimierung zu unterstützen. Es geht darum, Informationen mobil und personalisiert bereitzustellen (FA₃₁) und dabei in einem ganzheitlichen Ansatz unterschiedliche Informationsbedarfe zu adressieren (FA₃₂). Zudem ist das Fachwissen der Mitarbeiter, z.B. in Form von Verbesserungsvorschlägen, zu kodifizieren, um eine Rückkopplung zu unterstützen (FA₃₃).

Forschungsziel FZ₄: Integrierte, generische Plattform

Das Ziel ist die Erstellung einer Business-Intelligence-Plattform, die alle konzeptionell erforderlichen Komponenten für die datengetriebene Optimierung, d.h. für die Datenbereitstellung, Analyse und Optimierung inklusive des Benutzerzugriffs, integriert (FA₄₁) und auf einem generischen, d.h. einzelfallunabhängigen, Ansatz basiert (FA₄₂). Es geht darum, generische Datenstrukturen, Analyseverfahren und Benutzerschnittstellen zu entwickeln, um die Realisierungskomplexität im Einzelfall zu verringern und allgemeingültige Konzepte für die Fertigungsindustrie zu definieren.

1.5 Forschungsbeiträge und eigene Publikationen

Anhand der Forschungsziele werden die Forschungsbeiträge FB_i dieser Arbeit nachfolgend aufgegliedert und die zugehörigen eigenen Publikationen genannt. Hervorzuheben ist, dass die Forschungsbeiträge sowohl auf konzeptioneller Ebene erbracht als auch im Rahmen der Realisierung der AdMA-Plattform prototypisch implementiert und evaluiert werden.

Ganzheitliche Datenbasis (FZ₁):

Wissensrepository für die Fertigung (FB₁) (siehe Kapitel 4, 5)

- *Generisches multidimensionales Datenmodell (FB₁₁):* Entwicklung eines generischen multidimensionalen Datenmodells, das strukturierte operative und prozessorientierte Daten über den Fertigungsprozess integriert und einzelfallunabhängig für unterschiedliche Typen von Fertigungsprozessen anwendbar ist
- *Prozessorientierte Artefaktintegration (FB₁₂):* Entwicklung eines Konzepts zur flexiblen Verknüpfung von Artefakten, d.h. von (unstrukturierten) Dokumenten sowie von Analyseergebnissen, mit prozessorientierten und operativen Daten des multidimensionalen Datenmodells

- *Linkbasierte Architektur (FB₁₃)*: Entwicklung einer technischen Architektur zur flexiblen Integration strukturierter und unstrukturierter Daten mithilfe informationsintensiver Links zur Umsetzung der Artefaktintegration bzw. des Wissensrepository für die Fertigung

Publikationen zum Wissensrepository für die Fertigung:

(Gröger et al. 2012c, Gröger et al. 2014b, Gröger et al. 2014c)

**Datengetriebene Wissensextraktion durch Trend- und Mustererkennung (FZ₂):
Prädiktive und präskriptive Fertigungsprozess-Analyse (FB₂) (siehe Kapitel 3, 6)**

- *Ursachenanalyse (FB₂₁)*: Entwicklung eines prädiktiven Data-Mining-basierten Analyseverfahrens zur datengetriebenen Identifikation von Ursachen für Kennzahlenabweichungen und Störungen eines Fertigungsprozesses
- *Laufzeitprognostik (FB₂₂)*: Entwicklung eines prädiktiven Data-Mining-basierten Analyseverfahrens zur datengetriebenen Vorhersage von möglichen Störungen und Kennzahlenabweichungen während der Prozessausführung
- *Proaktive Empfehlungsgenerierung (FB₂₃)*: Entwicklung eines präskriptiven Data-Mining-basierten Analyseverfahrens zur proaktiven datengetriebenen Generierung von Handlungsempfehlungen zur Vermeidung einer prognostizierten Kennzahlenabweichung während der Prozessausführung

Publikationen zur prädiktiven und präskriptiven Fertigungsprozess-Analyse:

(Gröger et al. 2012a, Gröger et al. 2014a)

**Integration mit der Fertigungsebene (FZ₃):
Mobiles Prozess-Dashboard (FB₃) (siehe Kapitel 7)**

- *Personalisierungskonzept (FB₃₁)*: Entwicklung eines Konzepts zur mobilen personalisierten Informationsbereitstellung für unterschiedliche Zielgruppen in der Fertigung, insbesondere Werker und Fertigungsleiter
- *Informationsbedarfe (FB₃₂)*: Erhebung und Definition prozessorientierter Informationsbedarfe von Werkern zur Realisierung eines ganzheitlichen Informationsangebotes auf der Fertigungsebene
- *Dashboard-Dienste (FB₃₃)*: Konzeption funktionaler Dashboard-Dienste zur Adressierung der Informationsbedarfe

Publikationen zum mobilen Prozess-Dashboard:

(Gröger et al. 2013a, Gröger et al. 2013b, Gröger und Stach 2014)

Weiterführende Publikationen: (Hoos et al. 2014a, Hoos et al. 2014b)

Integrierte, generische Plattform (FZ₄):**Advanced-Manufacturing-Analytics-Plattform (FB₄) (siehe Kapitel 3)**

- *Integrierte Gesamtarchitektur (FB₄₁):* Entwicklung einer konzeptionellen Plattformarchitektur bestehend aus drei integrierten Schichten für Datenbereitstellung, Analyse und Optimierung
- *Generische Komponenten (FB₄₂):* Konzeption generischer Komponenten zur Datenbereitstellung, Analyse und Optimierung, die eine einzelfallübergreifende Anwendung der Plattform für Unternehmen der Fertigungsindustrie ermöglichen

Publikationen zur AdMA-Plattform als Gesamtansatz:

(Gröger et al. 2012b, Gröger und Stach 2014)

Weiterführende Publikationen: (Kassner et al. 2014)

1.6 Aufbau der Arbeit

Im Folgenden wird der weitere Aufbau der Arbeit anhand einer Übersicht über die Kapitel beschrieben.

Kapitel 2 umfasst die *konzeptionellen Grundlagen* der Arbeit sowohl hinsichtlich der Produktion und Fertigung als auch mit Blick auf IT-Konzepte zur datengetriebenen Optimierung unter dem Begriff Business Intelligence. Davon ausgehend werden *verwandte Arbeiten*, speziell existierende Business-Intelligence-Anwendungen für die Fertigung, analysiert und anhand der identifizierten Schwachstellen für eine datengetriebenen Optimierung von Fertigungsprozessen abgegrenzt.

Kapitel 3 gibt einen *Überblick über die AdMA-Plattform* als integrierte Business-Intelligence-Plattform für die datengetriebene Optimierung von Fertigungsprozessen anhand ihrer konzeptionellen Architektur bestehend aus drei Schichten. Die Datenbereitstellungsschicht umfasst das Wissensrepository für die Fertigung, das die Grundlage für die Analysedienste der Prozessanalytischschicht darstellt. Die Bereitstellung der Analyseergebnisse erfolgt mittels des mobilen Prozess-Dashboard in der Schicht für die Prozessoptimierung und den Benutzerzugriff.

Gegenstand des *Kapitels 4* ist das *Wissensrepository für die Fertigung* als zentrale Datenhaltung der AdMA-Plattform. Es dient der Integration strukturierter und unstrukturierter Daten über den gesamten Fertigungsprozess sowie der Verwaltung von Wissen im Sinne von aus den Daten gewonnenen Analyseergebnissen und basiert auf einem generischen multidimensionalen Datenmodell.

In *Kapitel 5* wird die *linkbasierte Architektur* als eine Architekturvariante zur technischen Umsetzung des Wissensrepository für die Fertigung detailliert. Die linkbasierte Architektur stellt einen generischen Ansatz für die flexible Ad-hoc-Integration von strukturierten Daten eines Data Warehouse mit unstrukturierten Daten im Sinne von Content unter Verwendung informationsintensiver Links dar.

Im Zentrum von *Kapitel 6* steht die *präskriptive Fertigungsprozess-Analyse* als ein Data-Mining-basiertes Analyseverfahren der AdMA-Plattform zur proaktiven Optimierung eines Fertigungsprozesses. Es geht um die datengetriebenen Generierung konkreter Handlungsempfehlungen zur Vermeidung einer prognostizierten Kennzahlenabweichung während der Prozessausführung.

Das *Kapitel 7* fokussiert auf das *mobile Prozess-Dashboard* als eine repräsentative Anwendung für den Benutzerzugriff der AdMA-Plattform. Es ermöglicht die mobile personalisierte Bereitstellung von Analyseergebnissen und ergänzenden Informationen für Werker und Fertigungsleiter unter Verwendung mobiler Endgeräte, wie z.B. Tablet-PCs.

In *Kapitel 8* geht es um die *prototypische Implementierung und Evaluation* der AdMA-Plattform. Die experimentelle Evaluation demonstriert die Anwendung des Prototyps im Praxisbeispiel der Nockenwellenherstellung. Im Rahmen der konzeptionellen Evaluation wird die Erfüllung der Forschungsziele untersucht. Eine kriterienorientierte Bewertung und ein Vergleich der AdMA-Plattform mit verwandten Ansätzen sind schließlich Gegenstand der komparativen Evaluation.

Kapitel 9 beinhaltet das *Fazit* der Arbeit und einen *Ausblick* auf zukünftige Arbeiten, welche die ganzheitliche Analyse strukturierter und unstrukturierter Daten, die Entwicklung einer Methode zur Prozessselektion und -bewertung für die datengetriebene Optimierung sowie die Übertragung der AdMA-Plattform auf weitere Anwendungsbereiche umfassen.

Publikationen von Christoph Gröger

- Gröger, C.; Stach, C. (2014): The Mobile Manufacturing Dashboard. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops), 24-28 March, 2014, Budapest, Hungary. Piscataway: IEEE, S. 138-140.
- Gröger, C.; Schwarz, H.; Mitschang, B. (2014a): Prescriptive Analytics for Recommendation-based Business Process Optimization. In: Proceedings of the 17th International Conference on Business Information Systems (BIS), Larnaca, Cyprus, 21-23 May, 2014. Cham: Springer, S. 25-37.
- Gröger, C.; Schwarz, H.; Mitschang, B. (2014b): The Deep Data Warehouse. Link-based Integration and Enrichment of Warehouse Data and Unstructured Content. In: Proceedings of the 18th IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Conference (EDOC), 01-05 September, 2014, Ulm, Germany. Los Alamitos: IEEE, S. 210-217.
- Gröger, C.; Schwarz, H.; Mitschang, B. (2014c): The Manufacturing Knowledge Repository. Consolidating Knowledge to Enable Holistic Process Knowledge Management in Manufacturing. In: Proceedings of the 16th International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS), 27-30 April, 2014, Lisbon, Portugal: SciTePress, S. 39-51.
- Gröger, C.; Hillmann, H.; Hahn, F.; Mitschang, B.; Westkämper, E. (2013a): The Operational Process Dashboard for Manufacturing. In: Procedia CIRP 7, S. 205-210.
- Gröger, C.; Silcher, S.; Westkämper, E.; Mitschang, B. (2013b): Leveraging Apps in Manufacturing. A Framework for App Technology in the Enterprise. In: Procedia CIRP 7, S. 664-669.
- Gröger, C.; Niedermann, F.; Mitschang, B. (2012a): Data Mining-driven Manufacturing Process Optimization. In: Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 Vol III (WCE), 4-6 July, 2012, London, U.K. International Association of Engineers (IAENG). Hong Kong: Newswood, S. 1475-1481.
- Gröger, C.; Niedermann, F.; Schwarz, H.; Mitschang, B. (2012b): Supporting Manufacturing Design by Analytics. Continuous Collaborative Process Improvement enabled by the Advanced Manufacturing Analytics Platform. In: Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD), May 23-25, 2012, Wuhan, China. Los Alamitos: IEEE, S. 793-799.
- Gröger, C.; Schlaudraff, J.; Niedermann, F.; Mitschang, B. (2012c): Warehousing Manufacturing Data. A Holistic Process Warehouse for Advanced Manufacturing Analytics. In: Proceedings of the 14th International Conference on Data Warehousing and Knowledge Discovery (DaWaK), Vienna, Austria, 03-06 September, 2012. Berlin: Springer, S. 142-155.