Schriftenreihe der Hochschulgruppe
für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (HAB)

Wolfgang Kersten, Hans Koller, Hermann Lödding (Hrsg.)

Industrie 4.0
Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern

GITO

Wolfgang Kersten, Hans Koller, Hermann Lödding (Hrsg.)

Industrie 4.0

Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern

Industrie 4.0
Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern

Wolfgang Kersten, Hans Koller, Hermann Lödding (Hrsg.)

Prof. Dr. Hans Koller
Helmut Schmidt Universität
Professur für Betriebswirtschaftslehre, insbes. Industriebetriebslehre & Technologiemanagement
Holstenhofweg 85
22043 Hamburg

Prof. Dr. Dr. h. c. Wolfgang Kersten
Technische Universität Hamburg-Harburg
Institut für Logistik und Unternehmensführung
21071 Hamburg

Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding
Technische Universität Hamburg-Harburg
Institut für Produktionsmanagement und -technik
21071 Hamburg

ISBN 978-3-95545-083-0

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Veröffentlicht im GITO Verlag 2014
Gedruckt und gebunden in Berlin 2014

© GITO mbH Verlag Berlin 2014

GITO mbH Verlag
für Industrielle Informationstechnik und Organisation
Detmolder Straße 62
10715 Berlin
Tel.: +49.(0)30.41 93 83 64
Fax: +49.(0)30.41 93 83 67
E-Mail: service@gito.de

Internet: www.gito.de

Vorwort

Die Fortschritte der Informationstechnik eröffnen ungeahnte Chancen für die industrielle Produktion: Informationen über Maschinen, Bauteile und Aufträge können zu geringen Kosten und in hoher Detaillierung erfasst und im Netzwerk weitergeleitet werden. Gleichzeitig nimmt die Fähigkeit zu, auch große Informationsmengen automatisch verarbeiten, Diagnosen treffen und Maßnahmen einleiten zu können. Entsprechend konzentrieren sich Forschung und Industrie darauf, viel versprechende Konzepte zu entwickeln, um die neuen Möglichkeiten gewinnbringend zu nutzen. Dabei kann man leicht übersehen, dass die sog. vierte industrielle Revolution auch den Menschen betrifft und unsere Arbeit zum Teil grundlegend verändern wird.

Der vorliegende Tagungsband stellt Forschungsergebnisse der Mitglieder der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation vor.

Die Beiträge behandeln das Thema aus der Perspektive der Modellierung, des Menschen und der industriellen Anwendung, so dass ein umfassender Überblick entsteht.

Wir danken allen Autoren herzlich für ihre Beiträge, Herrn Titov und Herrn Dr. Friedewald für die sorgfältige Gestaltung des Tagungsbandes.

Hamburg, im Juli 2014

Wolfgang Kersten

Hans Koller

Hermann Lödding

Inhaltsverzeichnis

Modellierungsansätze für Industrie 4.0 11

Die Arbeit (auch) vom Menschen her denken: Modellierung produktiver Arbeit – Eine Kernaufgabe bei Industrie 4.0 13

Peter Kuhlang, Thomas Finsterbusch, Markus Busenbach, Bernd Britzke, Thomas Mühlbradt, Knut Kille

Erhöhung der Ressourceneffizienz durch ein Modellierungs- und Analysetool zur Unterstützung kognitiver Prozesse 37

Markus Gram, Hubert Biedermann

Modellbasierte Gestaltung vernetzter Systeme in der Fabrik im Fokus der Energie- und Ressourceneffizienz 53

Hendrik Hopf, Egon Müller

Die Bedeutung von Industrie 4.0 als Enabler für logistische Modelle 79

Peter Nyhuis, Jonas Mayer, Thorben Kuprat

Industrie 4.0: Auswirkungen auf das Supply Chain Risikomanagement .. 101

Wolfgang Kersten, Meike Schröder, Marius Indorf

Der Mensch und Industrie 4.0 127

Industrie 4.0 – Die Rolle des Menschen in der vierten industriellen Revolution 129

Uwe Dombrowski, Christoph Riechel, Maren Evers

Chancen zur Bewältigung des Fachkräftemangels in KMU durch die Urbane Produktion von morgen 155

Dominik T. Matt, Erwin Rauch

Integration von Lösungskompetenz operativer Mitarbeiter des Shop-Floors in die Produktionsplanung und -steuerung 177

Lukas Lingitz, Philipp Hold, Robert Glawar, Wilfried Sihn

Umgang mit Paradoxien von Industrie 4.0 – Die Bedeutung reflexiven Arbeitshandelns 199

Uta Wilkens, Thomas Süße, Bernd-Friedrich Voigt

Humanzentrierte Entscheidungsunterstützung in intelligent vernetzten Produktionssystemen 211

Egon Müller, Ralph Riedel

Erweiterung einer kognitiven Architektur zur Unterstützung der Mensch-Roboter-Kooperation in der Montage 239

Christopher M. Schlick, Marco Faber, Sinem Kuz, Jennifer Bützler

Industrie 4.0 in der Anwendung 265

Industrie 4.0 – Wege und Lösungsbeispiele 267

Michael Schenk

Der Einfluss von Cyber-Physical Systems auf die Gestaltung von Produktionssystemen 279

Norbert Gronau

Augmented Reality zur kundenintegrierten Variantenplanung 297

Fedor Titov, Axel Friedewald, Hermann Lödding

Ansätze für eine Online-Optimierung der Losgrößen in der Serienfertigung 317

Wilhelm Dangelmaier

Intelligenter Störungsassistent im Serienanlauf als Industrie 4.0-Anwendungsfall 343

Dieter Spath, Bastian Pokorni, Oliver Ganschar, Sebastian Schlund

Wissensentdeckung in vernetzten, industriellen Datenbeständen 373

Jochen Deuse, Olga Erohin, Daniel Lieber

IT-Sicherheit als besondere Herausforderung von Industrie 4.0 397

Sander Lass, David Kotarski

Modellierungsansätze für Industrie 4.0

Die Arbeit (auch) vom Menschen her denken: Modellierung produktiver Arbeit – Eine Kernaufgabe bei Industrie 4.0

Peter Kuhlang, Thomas Finsterbusch, Markus Busenbach, Bernd Britzke, Thomas Mühlbradt, Knut Kille

Erhöhung der Ressourceneffizienz durch ein Modellierungs- und Analysetool zur Unterstützung kognitiver Prozesse

Markus Gram, Hubert Biedermann

Modellbasierte Gestaltung vernetzter Systeme in der Fabrik im Fokus der Energie- und Ressourceneffizienz

Hendrik Hopf, Egon Müller

Die Bedeutung von Industrie 4.0 als Enabler für logistische Modelle

Peter Nyhuis, Jonas Mayer, Thorben Kuprat

Industrie 4.0: Auswirkungen auf das Supply Chain Risikomanagement

Wolfgang Kersten, Meike Schröder, Marius Indorf

Die Arbeit (auch) vom Menschen her denken: Modellierung produktiver Arbeit – Eine Kernaufgabe bei Industrie 4.0

Peter Kuhlang, Thomas Finsterbusch, Markus Busenbach, Bernd Britzke, Thomas Mühlbradt, Knut Kille

1 Einleitung

Viele Beschäftigte in der Industrie fragen sich, wie ihre Arbeit in fünf oder in zehn Jahren aussehen wird. Diese Fragestellung wird konkreter, wenn sie z. B. in Verbindung mit der demografischen Entwicklung im Kontext von Produktivität und Leistung gebracht wird. Denn man sucht Antworten zu Themen wie:

- Werde ich - auch noch im Alter von 65 (oder mehr) Jahren - in der Lage sein die Arbeit qualitativ, körperlich und psychisch zu erledigen?
- Wie werden sich die Erwartungen an meine Leistungserbringung entwickeln?
- Kann ich das Arbeitstempo überhaupt mitgehen? Wo liegen die Grenzen bei Tempo und Auslastung?

Aus Unternehmersicht stellen sich ähnlich gelagerte Fragen:

- Was kann man tun, um einerseits die Leistungsfähigkeit der Mitarbeiter zu erhalten und andererseits diese sinnvoll und produktiv einzusetzen?
- Was kann man tun, um die Mitarbeiter zu motivieren und wo liegt – ähnlich der Drehzahl bei einem Motor – der „optimale Punkt“ für Produktions- und Arbeitssysteme im Zusammenwirken von Menschen und Maschinen?
- Wie kann man die Produktivität systematisch entwickeln, um wettbewerbsfähig zu bleiben?

Kernpunkt der Antworten auf diese Fragen ist die Art und Weise der Modellierung menschlicher Arbeit, also die Beschreibung bzw. die Darstellung menschlicher Arbeit, das Vergleichen von Ablaufvarianten und die Entwicklung planerischer Bestlösungen (Arbeitsmethoden). Hierbei reicht das Spektrum von einer deskriptiven Modellierung um Lösungsansätze für Ist-Soll-Betrachtungen zu entwickeln und zu bewerten über die Tatsache, dass die Möglichkeiten der Gestaltung von Arbeitsplätzen/-abläufen von der Genauigkeit bzw. der Exaktheit der Modellierung menschlicher Arbeit abhängt bis hin zur Digitalisierung menschlicher Arbeit.

Bei der Modellierung menschlicher Arbeit wiederum taucht unweigerlich die Frage auf, mit welcher Sprache menschliche Arbeit und die damit verbundenen Leistungsanforderungen modelliert werden können, damit Sie im Sinne einer ganzheitlichen Gestaltung als Visualisierungs-, Dokumentations- und Kommunikationsinstrument von möglichst vielen betrieblichen Akteuren (z. B. Planung, Arbeitssicherheit, Gesundheitsschutz, Qualitätssicherung) genutzt werden kann.

Es zeigt sich, dass insbesondere die Prozesssprache MTM (Methods-Time Measurement) und hier im Besonderen das MTM-Grundverfahren wichtige Anforderungen an die Modellierung menschlicher Arbeit (Einhandarbeit, Beidhandarbeit, Bewegungslängen, Körperbewegungen usw.) erfüllt. Dazu liefert eine MTM-Modellierung über die Prozessbausteine „Fügen“ wichtige Hinweise zur montagefreundlichen Produktgestaltung und über die Prozessbausteine „Greifen“ Varianten z. B. zur Gestaltung der logistischen Systeme. Essentiell für die Prozessmodellierung ist, dass die MTM-Prozessbausteine Standardzeiten (Normzeiten) beinhalten, was konsequenterweise dazu führt, dass die Visualisierung von Leistungserwartung und Mitarbeiterauslastung auf Basis einer einheitlichen Bezugsleistung realisiert wird. Vor diesem Hintergrund erklärt sich auch die mit MTM in Beziehung gebrachte Formulierung des „Urmeters menschlicher Leistung“.

Neuentwicklungen wie bspw. das Ergonomic Assessment Worksheet (EAWS) machen es möglich, zusätzlich auch die Ergonomie an den Arbeitsplätzen zu erfassen und zu bewerten, sodass planerisch gesichert werden kann, dass ergonomisch unakzeptable bzw. schlechte Bedingungen vermieden werden können. Mit der Entwicklung eines vollkommen neuen Bausteinsystems „Human Work Design“ (HWD) wird eine inhaltliche Verzahnung der Ablaufmodellierung mit ergonomischen Kriterien erreicht, so dass bei Anwendung von HWD ergonomische Kriterien methodisch zwangsläufig in die Planungen der Arbeitsabläufe integriert werden.

Mit diesen Entwicklungen werden die Prozesssprache MTM und ihre systemimmanente Normleistung zu einem zentralen Element in betrieblichen Arbeits- und Produktionssystemen und ermöglicht somit ein gemeinsames, interdisziplinäres Verständnis bei der Gestaltung menschlicher Arbeit.

Des Weiteren gewinnt die Prozesssprache MTM vor dem Hintergrund der Verschmelzung von IT und Produktion in der Industrie 4.0 besondere Bedeutung, da sie bereits in digitaler Form in verschiedenen Softwareapplikationen (z. B. TiCon®) zur Verfügung steht und somit zum integrierenden Bestandteil der Digitalen Fabrik wird.

Dieser Beitrag beleuchtet grundlegende Aspekte und Standpunkte aus Sicht der Modellierung und Gestaltung menschlicher Arbeit im Kontext der Arbeitswelt 4.0. Seine grundsätzlichen Betrachtungen stellen die Voraussetzung für die beginnende Einordnung, Abgrenzung und Positionierung von MTM – im institutionellen und instrumentellen Sinne – im Kontext der Cyber-Physischen Produktionssysteme (CPPS) dar.

Daher legen die nachfolgenden Ausführungen neben grundlegenden Betrachtungen zum MTM-Verfahren, der MTM-Normleistung auch das Produktivitätsmanagementverständnis entlang des Produktentstehungs-prozesses (PEP) und Neuentwicklungen von MTM als wesentliche Elemente für den sich intensivierenden wissenschaftlichen und anwendungsorientierten Diskurs zur Industrie 4.0 dar.

2 Woher kommt MTM?

2.1 Die zwei Dimensionen bzw. Ausprägungen von MTM

Zur Erleichterung bzw. Erklärung des Verständnisses sind in Abbildung 1 zwei Aspekte des Begriffs MTM aufgeführt:

- Der institutionelle Aspekt bezeichnet die Deutsche MTM-Vereinigung e.V. und des Internationalen MTM-Direktorates.
- Der instrumentelle Aspekt steht für die Anwendung von MTM als MTM-Konzept und MTM-Verfahren.

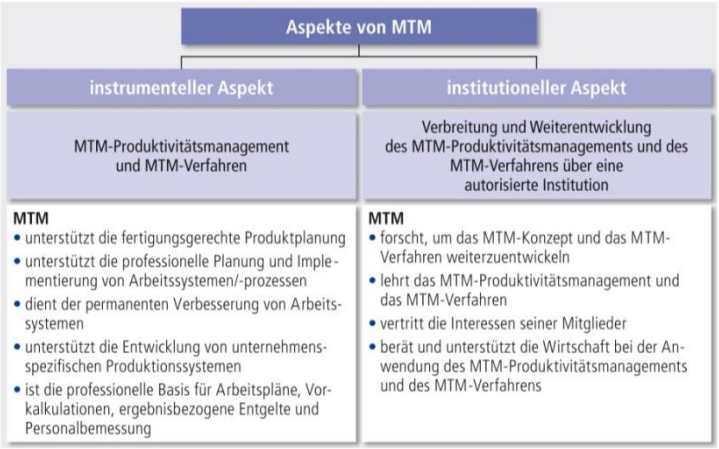


Abbildung 1: Die beiden Aspekte von MTM (Bokranz/Landau, 2012)

Dabei ist das MTM-Konzept des Produktivitätsmanagements analog der Methoden des Industrial Engineerings an der Wertschöpfungskette ausgerichtet. Dies basiert auf der Erkenntnis, dass

- in jeder PEP-Phase spezifische Lösungsmethoden und –prinzipien einzusehen sind,
- in jeder Phase andere Probleme zu lösen sind und
- es andere Ursachen für Produktivitätsverluste gibt.

Auf diese Weise prägt sich die Präventionsfunktion (Von Anfang an richtig!) des MTM-Konzeptes aus. Während der Produkt- und Prozessentstehung wirkt MTM antizipierend und hilft, Probleme während der Arbeitssystemplanung – also kostengünstig – zu lösen.

2.2 Vorentwicklungen

Der Ursprung der detaillierten und filigranen Beschreibung von Arbeitsprozessen mit Hilfe von Symbolen liegt bei Gilbreth. Frank Bunker Gilbreth erkannte als Maurerlehrling im Jahre 1884, dass bei der Errichtung von Ziegelmauern jeder Maurer für die gleiche Aufgabenstellung andere Bewegungen ausführte. Gilbreths Ziel war es deshalb, festzustellen, welches der sinnvollste Ablauf sei. Unterstützt wurde Frank Bunker Gilbreth später von seiner Ehefrau Lillian Evelyn Moeller Gilbreth, die seine Arbeit nach seinem Tode fortsetzte und auch das Arbeitsstudium in Deutschland beeinflusste. Er stellte fest, dass bei gleicher Fertigkeit, gleicher Fähigkeit und gleicher Anstrengung die Ausführungszeit für einen Arbeitsablauf des arbeitsausführenden Menschen innerhalb bestimmter Grenzen nur von der eingesetzten Methode abhängt (Bokranz/Landau 2006, S. 109)

Bei seinen Forschungen filmte Gilbreth die menschlichen Arbeitsbewegungen. Dabei stellte er fest, dass es sinnvoll ist, den Arbeitsablauf zu untergliedern. Dies macht es möglich, die Ablaufstruktur und die Einflussgrößen des Ablaufs zu erkennen. Die Ablaufgliederung und die Systematisierung der Einflussgrößen vermitteln erweiterte Einsichten zu den konstruktiven und technologischen Ursachen der Prozessdefizite. Gilbreth löste den Arbeitsprozess in zwei Stufen auf: Die tiefste Auflösung bezeichnete er als Bewegungselemente bzw. als Elementarbewegungen wie Greifen, Zusammenfügen, Transport usw. In einer gröberen Ebene wurden Kategorien wie zögernde Bewegungen, Verluste usw. benannt (vgl. Abbildung 2).

Therbligs					MTM-1 (MTM-Grundbewegungen)
	Bezeichnungen und Kurzzeichen		Zeichen	Bewegungs-klassifikation	
1	Bewegen ohne Last (Transport Empty TE)		hohle Hand	II. grobe Bewegungen	Hinlangen R (Reach)
2	Bewegen mit Last (Transport Loaded TL)		Hand mit Inhalt		Bringen B (Move)
3	Suchen (Search SH)		suchendes Auge	III. zögernde Bewegungen	Greifen G (Grasp)
4	Auswählen (Select ST)		zeigt auf einen Gegenstand		
5	Greifen (Grasp G)		unbelasteter Magnet	I. Hauptbegriffe	
6	Einrichten (Position P)		aufgestellter Kegel		Fügen P (Position)
7	Vorrichten (Preposition PP)		Hand platziert einen Gegenstand		
8	Fügen (Assemble A)		zusammenfügen zum Gestell		
9	Ausführen (Use U)		vom englischen USE		Prozesszeit PT (Process Time)
10	Demontieren (Disassemble DA)		vom Gestell entfernen		Trennen D (Disengage)
11	Loslassen (Release Load RL)		umgekehrte Handfläche		Loslassen RL (Release)
12	Überlegen (Plan PN)		an die Stirn tippen	V. von Überlegungen begleitet	Blickverschieben ET (Eye Travel), Prüfen EF (Eye Focus)
13	Prüfen (Inspect I)		Linse		
14	Halten (Hold H)		haltender Magnet	IV. Verluste	keine adäquaten Prozessbausteine bei MTM
15	Erholen (Rest for overcoming Fatigue R)		ruhende Figur		
16	unvermeidbare Verzögerung (Unavoidable Delay UD)		Figur fällt auf die Nase		
17	vermeidbare Verzögerung (Avoidable Delay AD)		schlafende Figur		
				keine adäquaten Therbligs	Drücken AP (Apply Pressure)
					Drehen T (Turn)
					div. Körper-, Bein-, Fußbewegungen

Abbildung 2: Symbole der Therbligs nach Gilbreth (Hilf, 1957)

In Umkehrung seines Namens bezeichnete Gilbreth die Bewegungselemente als Therbligs. Diese gelten als die Vorläufer von MTM. Einige der Grundelemente sind schwierig zu verallgemeinern und andere können noch in weitere Arbeitsbewegungen und Griffelemente unterteilt werden. Das System der Therbligs wurde erst nach dem Tod von Gilbreth im Jahre 1924 präsentiert. Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass die Therbligs keinen Zeitanteil ausweisen, sie bezeichnen lediglich den elementaren Inhalt der Bewegungen, bieten eine Symbolik und eine Erklärung.

Durch Gilbreth und seine Mitarbeiter erfolgten zahlreiche Mikro-Bewegungsstudien mit Hilfe der Therbligs, unterstützt durch Filmaufnahmen. Die Bewegungsanalysen erfolgten getrennt für die rechte und die linke Hand. Daher wurde diese Darstellung als Beidhandanalyse bezeichnet.

Eine wichtige Erkenntnis der Bewegungsstudien war, dass bei allen wiederkehrenden Verrichtungen von Menschen noch großes Verbesserungspotenzial besteht. Dabei ist es unerheblich, ob Maschinen zum Einsatz kommen oder nicht. Dies ist auch unabhängig davon, ob es sich um Produktions-, Lagerhaltungs- oder Verwaltungsvorgänge handelt. Es ging Gilbreth dabei weniger um die Steigerung der Arbeitsleistung als um die Optimierung der Arbeitsmethode und die Verbesserung der Arbeitsplatzgestaltung. Aber auch ermüdungsfreies Arbeiten und die Anleitung der Mitarbeiter waren wichtig für ihn.

Gilbreth war also mehr als ein Analytiker von Elementarbewegungen, er war in der Geschichte des Arbeitsstudiums der Neuzeit einer der ersten Arbeitsgestalter. So bezog sich das erste Patent, das er erhielt, auch auf die Gestaltung eines Baugerüstes.

Um die versteckten Verbesserungspotenziale zu erkennen, erwiesen sich damals folgende Arbeitsschritte als sinnvoll:

1. Wiederkehrende Arbeitsabläufe sind genau zu beobachten und kritisch zu hinterfragen. Mögliche Fragestellungen sind dabei: Welche Vorgänge tragen zum Arbeitsfortschritt bzw. zur Wertschöpfung bei? Welche Arten von Vorgängen beinhalten keinen Arbeitsfortschritt? Welche Vorgänge sind umständlich und aufwendig?
2. Die Arbeitsabläufe sind zu dokumentieren. Zur standardisierten Beschreibung der menschlichen Bewegungsabläufe verwendete Gilbreth die Therbligs. Die Therbligs sind geeignet, die Verbesserungsansätze zu verdeutlichen. Jedes Therblig, das nicht dem Arbeitsfortschritt dient, wird eliminiert.

Insbesondere mit dem heutigen Erkenntnisstand ist klar, dass die bloße Symbolsprache von Gilbreth zahlreiche Nachteile hatte. Die Bedingungen und Einflussgrößen wurden lediglich verbal beschrieben, die Zeit fehlte gänzlich. Gilbreth stellte aber fest, dass bei gleichen Bedingungen die Zeit für das Ausführen der Arbeitselemente bei bestimmter Handfertigkeit,

Geschicklichkeit und Kraftanstrengung gleich ist. Aus dieser Erkenntnis entstanden später die so genannten Systeme vorbestimmter Zeiten (SvZ).

2.3 Entwicklung der Prozesssprache MTM

Der Auslöser für die Entwicklung von MTM war das Verbot der Stoppuhr in der amerikanischen Rüstungsindustrie während des 2. Weltkrieges. Die USA waren genötigt, in einer nationalen Gewaltaktion eine leistungsfähige Rüstungsindustrie zu schaffen.

Dabei galt es unter der Überschrift „Bedingungen“ möglichst alles auszuschalten, was zu Arbeitskonflikten führen könnte. Bei der Suche nach früheren Streikauslösern wurden Vorgabezeitkonflikte benannt, insbesondere die Messung mit der Stoppuhr und in diesem Zusammenhang die Interpretation der gemessenen Zeit (Glatz/Nadig, 2003).

Der Begriff „Systeme vorbestimmter Zeiten“ wurde aus dem hauptsächlichen Anwendungszweck geprägt. Es galt für Tätigkeiten mit Wiederholcharakter um vorab zielsicher die Dauer zu bestimmen und zu klären, auf Basis welcher Arbeitsmethode diese Zeit zustande kam. Der Begriff des SvZ wurde in die Lehre sowohl von Planern und Arbeitsvorbereitern als auch in die Arbeitswissenschaft übernommen. So wurden die SvZ anderen Methoden zur Zeitermittlung (z. B. Zeitmessung oder Schätzen und Vergleichen) gegenübergestellt, was vor allem zur Folge hatte, dass MTM als Methode zur Zeitermittlung bekannt wurde. Darüber hinaus sind SvZ auch in der REFA-Lehre unter der Gesamtüberschrift Datenermittlung integriert.

Vor dem Hintergrund der Struktur der Therbligs und der späteren Entwicklung von MTM ist zumindest aus heutiger Sicht die Benennung als System vorbestimmter Zeiten unglücklich und teilweise irreführend. Der Begriff verweist lediglich auf die Nutzung zur Zeitbestimmung und lässt die Aspekte der Prozessstrukturierung und präventiven Arbeitsgestaltung unberührt.

2.4 Arbeitsstrukturierender Erkenntnisse

Im deutschsprachigen Raum wurde Gilbreth häufig als Vater des Bewegungsstudiums bezeichnet. In den 50er und 60er Jahren gab es zu diesem Thema zahlreiche Veröffentlichungen, weil es in der Industrie vor allem darum ging, durch Arbeitsplatzgestaltung und Bewegungsoptimierung den Ausstoß zu erhöhen.

Bemerkenswert ist, dass in der aus Japan kommenden Literatur zur Ablaufoptimierung die Gedanken zur Prozessstrukturierung grundsätzlich aufgenommen und verarbeitet worden sind. Imai (1992), Ishiwata (2001) und Sekine (1995) greifen in ihren Ausführungen zur Erkennung von Verbesserungspotenzialen auch auf Gilbreth zurück. Dabei wird der Nutzen der Prozessauflösung vor allem aus folgenden Sichtweisen beschrieben:

- Imai (1992) bemerkt bezugnehmend auf ein Beispiel bei Nissan Motors: „Die kleinste Zeiteinheit menschlicher Arbeit … ist ein Hundertstel einer Minute bzw. 0,6 Sekunden. Jeder Verbesserungsvorschlag, welcher zumindest 0,6 Sekunden einspart, also die Zeit, die ein Arbeiter zum Ausstrecken seiner Hand oder zum Zurücklegen eines Schrittes braucht, wird vom Management berücksichtigt.“
- Prozessvisualisierungen und standardisierte Prozessbeschreibungen (mittels Prozesssprache) helfen, Prozessdefizite sichtbar zu machen.
- Um effizienter zu werden, müssten die Einflussgrößen auf manuelle Abläufe sichtbar gemacht werden. Die Prozessauflösung muss so hoch sein, dass erkennbar wird, ob Verbesserungen durch montagegerechte Produktgestaltung, Logistikgestaltung oder bessere Ergonomie erreichbar sind. Die Einflussgrößen zeigen, welche Auswirkungen technische Veränderungen auf den Zeitbedarf haben.

Seit der ursprünglichen Entwicklung von MTM wurden im Laufe der Zeit verschiedene MTM-Prozessbausteinsysteme entwickelt, die im MTM-Bausteinsystem zusammengefasst sind.

3 Das MTM-Bausteinsystem

Das MTM-Bausteinsystem stellt in Gänze MTM-1, MTM-2, UAS und MEK in den Kontext zur Prozesstypologie, zu Prozessmerkmalen und zur Prozesskomplexität (Abbildung 3).

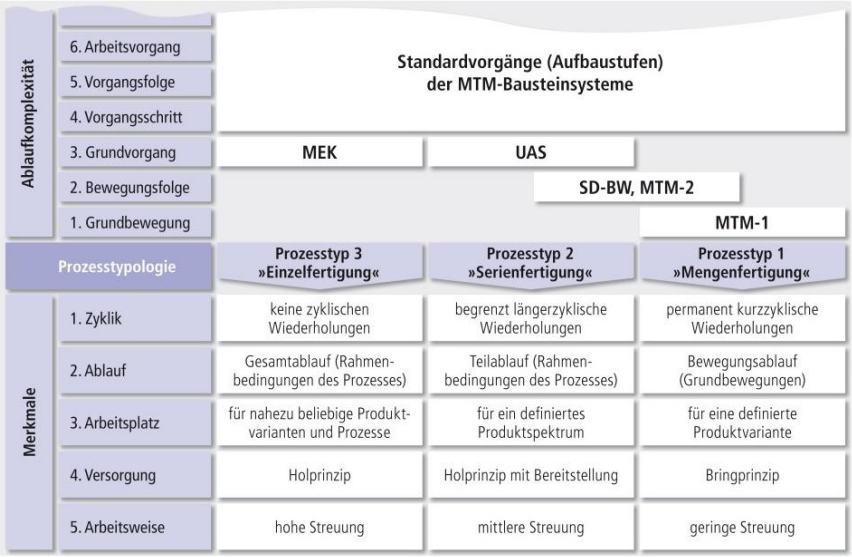


Abbildung 3: Die wichtigsten Prozessbausteinsysteme des MTM-Bausteinsystems im Kontext von Prozesstypologie, Ablaufkomplexität und Prozessmerkmalen (Bokranz/Landau, 2013)

Gleichzeitig werden damit die Anwendungsbedingungen für die einzelnen Bausteinsysteme aufgezeigt. Nach dem Prinzip vom Groben zum Feinen (von Arbeitsvorgang zur Grundbewegung) wurden Begriffe für sechs Hierarchiestufen der Ablaufkomplexität benannt (vgl. Abbildung 4). Im betrieblichen Alltag ist es sinnvoll und notwendig ein solches Gebilde und

Begriffsgefüge einheitlich zu nutzen, um die Kommunikation zwischen unterschiedlichen Werken und Struktureinheiten zu vereinfachen.

Hierarchieebene		Definition und Kennzeichnung	Beispiele
Standardvorgangsebene	6. Arbeitsvorgang	Summe von Vorgangsfolgen, bei der die Mengeneinheit 1 eines Auftrags erstellt und ein geschlossener Wertschöpfungsschritt erzielt wird. Er wiederholt sich typischerweise beim Erfüllen eines Auftrags und bildet insofern einen geschlossenen Zyklus ab. Arbeitsvorgänge werden in Vorgangsfolgen, manchmal auch in Vorgangsschritte unterteilt. Andere Bezeichnungen sind Vorgang oder Arbeitsgang.	Teil komplett montieren und prüfen; Teile im Schweißautomaten punktschweißen.
	5. Vorgangsfolge	Folge von Vorgangsschritten, die bereits zu Teilresultaten führen und bei einem hohen Arbeitsteilungsgrad bereits geschlossene Arbeitsinhalte ausmachen.	Halterung verschrauben; Teil in eine Vorrichtung spannen und ausrichten.
	4. Vorgangsschritt	Folge von Grundvorgängen, die zu einem sichtbaren, am Arbeitsgegenstand auszumachenden Arbeitsfortschritt führt.	Eine Schraube eindrehen; ein Teil in die Vorrichtung legen.
Grundvorgangsebene	3. Grundvorgang	Kombination einer Folge von bis zu fünf Grundbewegungen, gebildet durch additive Verknüpfung und statistische Bewertung von Häufigkeiten. Grundvorgänge lassen sich zeitlich wieder auf die Grundbewegungen zurückprojizieren, auf denen sie basieren.	Teil aufnehmen und ansetzen; Teil und Hilfsmittel gleichzeitig handhaben.
	2. Bewegungsfolge	Kombination einer Folge von bis zu drei Grundbewegungen, gebildet durch additive Verknüpfung und statistische Bewertung von Häufigkeiten. Bewegungsfolgen lassen sich zeitlich wieder auf die Grundbewegungen zurückprojizieren, auf denen sie basieren.	Teil aufnehmen; Teil platzieren.
	1. Grundbewegung	Prozessbaustein mit höchster Auflösung, der in seiner Beschreibung und in Bezug auf seine Sollzeit nicht mehr zu unterteilen ist.	Hinlangen zu einem Teil.

Abbildung 4: Die Hierarchieebenen zur Kennzeichnung der Komplexitätsstufe von MTM-Prozessbausteinen (Bokranz/Landau, 2012)

4 Die MTM-Normleistung

Die Grundidee von MTM ist die Prozessgestaltung unter Nutzung von MTM-Prozessbausteinen. Ein Prozessbaustein besteht aus einem definierten Stück Prozess (Arbeitsablauf) und einem zugehörigen Zeitwert (Normzeit). Deshalb entstehen aus der MTM-Anwendung zwei wichtige Ergebnisse:

- Der mit Hilfe von MTM-Codes beschriebene Arbeitsablauf und
- der aus der Summe der Einzelbausteine resultierende Normzeitwert. Dieser Normzeitwert hat den Charakter einer Grundzeit tg, ist also bei der Berechnung von Vorgabezeiten um Verteilzeiten, Erholzeiten und evtl. andere Zuschläge zu ergänzen.

Mit Hilfe eines Nivellierverfahrens, der LMS-Technik (benannt nach den Entwicklern Lowry, Maynard und Stegemerten), konnten die aus Filmaufnahmen an industriellen Arbeitsplätzen unterschiedlicher Fertigungsbereiche gewonnenen Zeiten auf ein einheitliches Leistungsniveau gebracht werden, so dass die Tabellenzeiten überall, wo menschliche Arbeit, gleich welcher Art, geleistet wird, allgemein anwendbar wurden. Ein nicht hoch genug einzuschätzender Vorteil dieser Verfahren besteht darin, dass nunmehr jede mit einem Verfahren vorbestimmter Zeiten vorgenommene Beschreibung eines Arbeitsvorganges ein und dieselbe Normvorstellung hinsichtlich des in den Elementarzeiten berücksichtigten Leistungsniveaus beinhaltet (vgl. Helms, 1991).

Bei der Entwicklung von MTM bestand von Anfang an das Ziel, Bausteine bzw. ein System zu schaffen, das die Chance hat, international anerkannt zu werden. Um die Zeiten für die einzelnen Bausteine realitätsnah und praktisch abgesichert zu ermitteln, wurden Filmaufnahmen von Arbeitstätigkeiten in unterschiedlichen Branchen und von den verschiedensten Arbeitspersonen durchgeführt. Dabei wurde der Leistungsgrad direkt vor Ort bestimmt. Dank der großen Anzahl von Filmen und Daten entstand eine sehr stabile Standardleistung und mit der MTM-1 Normzeitwertkarte quasi das „Urmeter menschlicher Leistung“.

Dadurch können die machfolgend beschriebenen Herausforderungen bzw. Aufgaben gelöst werden (Britzke, 1994).

MTM, insbesondere MTM-1, führt stringent zu produkt- und prozessoptimierenden Denk- und Gestaltungsansätzen. Die Normzeit ist ein Indiz dafür, wie gut der Prozess gestaltet ist. Die Gestaltung basiert

- auf der elementaren Ebene durch das Sichtbarmachen von Einflussgrößen (z. B. Produktgestaltung durch vereinfachtes Fügen, Arbeitsplatzgestaltung durch Optimierung der Bewegungslängen, Logistikgestaltung durch Verbesserung der Greifbedingungen bei der Teileentnahme),

- auf der Ebene der Realisierung ergonomischer Regeln zur Arbeitsgestaltung (z. B. durch das bewusste Gestalten von Beidhandarbeit, der Vermeidung von unnötig belastenden Arbeitssituationen usw.),
- auf der Ebene der Layoutgestaltung (in erster Linie durch das Vermeiden von Wegen und die richtige Teileanordnung zum Vermeiden von Bücken).

Bei Neu- und Veränderungsplanungen können die entstehenden Arbeitsabläufe mit MTM-Prozessbausteinen dargestellt werden. Entsprechend werden die Mitarbeiter an den Arbeitsplätzen auch – den technischen Gegebenheiten folgend – gleich belastet bzw. ausgelastet. Dies kann unabhängig von der konkreten Arbeitsorganisation realisiert werden. So können Arbeitssysteme schon in der Planung wirkungsvoll optimiert werden.

Sowohl während der Planung als auch im Istzustand lässt sich durch MTM-Analysen feststellen, wie hoch die Auslastung an den einzelnen Arbeitsplätzen ist. Die Darstellungen der Auslastung an den einzelnen Arbeitsplätzen sind essentiell für die Ermittlung und Festlegung von Schwerpunkten für Verbesserungsprojekte.

Die Bedeutung der MTM-Normleistung und damit das Verständnis des MTM-Verfahrens im Industrial Engineering haben sich in den letzten zwei Jahrzehnten gewandelt.

5 Industrial Engineering – Produktivitätsmanagement mit MTM

5.1 Gewandeltes Bild von MTM

Einen Aufrütteleffekt in der Automobilindustrie und bei Zulieferern erzeugte die MIT-Studie (vgl. Womack et al. 1995). Darin wurde deutlich, dass dem Industrial Engineering eine Hauptträgerschaft für Prozessgestaltung und Prozessoptimierung zukommt. Dies hat vor allem damit zu tun, dass für den Erfolg von Produktionssystemen die richtige Auswahl von Methoden und

Werkzeugen für die Prozessplanung und -optimierung sowie die Konstanz und Konsequenz ihrer Anwendung maßgeblich ist.

Seit der Veröffentlichung dieser Studie entstand ein neues Bild von MTM, welches vor allem durch folgende Punkte charakterisiert werden kann:

- MTM-Anwendung heißt Planung und Optimierung der Arbeitssysteme und Arbeitsabläufe über die gesamte Prozesskette. Mit ProKon und den MTM-Prozessbausteinsystemen für unterschiedliche Prozesstypen steht eine durchgängige instrumentalisierte Strategie zur Prozessplanung, Prozessoptimierung bzw. Prozessverbesserung zur Verfügung. Würde man die MTM-Anwendung auf das Thema Zeitermittlung reduzieren, ließe man den größten Anteil des Potenzials für Produktivitätsverbesserung ungenutzt.
- Zentraler Punkt der MTM-Anwendung ist die Verwendung von Prozessbausteinen. Integrierter Bestandteil ist dabei das planerische Durchdenken und Optimieren der künftigen Arbeitsabläufe, als dessen Ergebnis eine transparente und nachvollziehbare Beschreibung des Arbeitsablaufs entsteht. Mit dieser Beschreibung werden die wesentlichen Eckpunkte für die Gestaltung der Arbeitssysteme festgelegt.
- MTM-Prozessbausteine (das betrifft vor allem die höher aggregierten MTM-Bausteine) sind ihrem Charakter nach inhaltlich und zeitlich definierte Arbeitsstandards. Voraussetzung für deren Anwendung sind Arbeitsbedingungen, die anerkannten Normen entsprechen. Der geplante MTM-Ablauf entspricht der Arbeitsmethode, mit der das Zeitziel erreicht werden kann.
- Durch den klaren Ausweis der Einflussfaktoren auf die Erschwernisse der Arbeit und damit auf die zeitliche Dauer bzw. von Ablaufindikatoren hat sich MTM als wirkungsvolles Diagnoseinstrument etabliert. Verschwendung wird sichtbar gemacht und quantifiziert. Mittels Variantenvergleichen im

Planungsstadium wird eine ausgewogene Optimierung gesichert. Die Auflösung des Arbeitsablaufs in gestaltungsrelevante Einflussgrößen gibt Zielrichtungen vor und ist erkenntnisfördernd.

- MTM-gestaltete Arbeitsabläufe entsprechen Soll-Abläufen und sind somit Benchmark. Sie bieten die Möglichkeit zum Vergleich mit den praktisch realisierten Abläufen. Durch die hohe Transparenz bestehen gute Chancen, Defizite und Abweichungen vom Soll, ggf. auch Planungsfehler, zu erkennen.
- Mit der Festlegung des Prozesstyps und des zugehörigen Prozessbausteinsystems (z. B. UAS, MEK) werden sowohl der Organisationsgrad des Arbeitssystems als auch Perfektion und Routine des Mitarbeiters in Form der MTM-Normleistung berücksichtigt. Wenn MTM eingeführt ist, sind Produktivitätsentwicklungen ausschließlich durch Arbeitsgestaltung und Prozessverbesserungen, nicht aber durch Intensitätserhöhung realisierbar. Die Anwendung von MTM schließt somit permanentes Drehen an der Intensitätsschraube aus. Wenn dieser Zusammenhang den Mitarbeitern bekannt ist, entsteht eine Motivation für den Kontinuierlichen Verbesserungsprozess (KVP) und ähnliche Aktivitäten.
- MTM fungiert in der Unternehmenspraxis als Kommunikationshilfe. Es eröffnet Chancen, qualifiziert darüber zu sprechen, ob der Soll-Ablauf mit der Realität übereinstimmt. Dies objektiviert auch die Diskussion um Zeitvorgaben, denn in erster Linie wird über die Zweckmäßigkeit der Arbeitsmethode und nicht über die Zumutbarkeit von Vorgabezeiten diskutiert. Die Kenntnis von MTM eröffnet die Möglichkeit, alle Beteiligten besser in die Prozessgestaltung einzubinden. Denn die Mitarbeiter vor Ort sind damit in der Lage, die Arbeitsabläufe gemeinsam mit den Planern sowohl ablauftechnisch als auch ergonomisch zu gestalten, indem sie in qualifizierter Weise ihre Arbeitserfahrungen einbringen.

5.2 Produktive Prozesse als Kern des Industrial Engineering

In den 1990er Jahren sind Industrial Engineering Strukturen in den Unternehmen abgebaut worden. Damit einher ging arbeitsorganisatorisches Know-how verloren (vgl. Stowasser, 2009, Kuhlang, 2013, S.26).

Parallel zu dieser Entwicklung gab es eine exorbitante Zunahme an „Patentrezepten“ für die Produktionsoptimierung und die Arbeitsorganisation (vgl. Westkämper, 2010).

Verblüffend ist, dass ein Zuwachs an Methoden und Vorgehensweisen bei gleichzeitiger Reduzierung der inhaltlich koordinierenden Strukturen (Industrial Engineering, Arbeitsvorbereitung) stattgefunden hat. Diese Defizite wurden zunehmend erkannt und artikuliert, so setzte ab ca. 2005 eine Renaissance des Industrial Engineerings ein (Deuse et al., 2009).

Auch wird darauf verwiesen, dass der kombinierte Methodeneinsatz (z. B. MTM und Lean-Methoden, vgl. Wilhelm 2007) für die Gestaltung verschwendungsarmer Produktionsprozesse erfolgreich praktiziert wurde.

1993 wurde erstmals eine MTM-Planungssystematik für die Serienfertigung mit dem Ziel einer investitionsarmen Gestaltung zukunftsfähiger Arbeitsstrukturen vorgestellt (Becks, 1993). Seitdem wurde dieses Konzept weiterentwickelt. Wesentliche Schritte der Entwicklung waren:

- Vereinfachung von ProKon mit den Zielen geringer Anwendungsaufwand und bessere Aussagekraft,
- Softwaregestützte Anwendung von MTM für
    - Vereinfachte Bausteinverwaltung und Bausteinnutzung
    - Taktung
    - Mehrstellenarbeit
    - Grafische Prozessmodellierung
    - Ergonomiebewertung

- Entwicklung branchenspezifischer Bausteinsysteme (z. B. MTM-Logistik),
- Verzahnung von MTM mit anderen Vorgehensweisen (z. B. Wertstrom, Kaizen).

Darüber hinaus steht mit dem Buch „Handbuch Industrial Engineering“ (Bokranz/Landau 2012) erstmals ein Grundlagenwerk zur Verfügung, welches MTM in umfassender Sicht darstellt. Zu betonen ist, dass die funktionellen Eigenschaften von MTM (Abbildung 5)

- Modellbildungsimmanenz,
- Simulationsfähigkeit,
- Komplexitätsvariation und
- Bezugsleistungstreue

deutlich herausgearbeitet worden sind. Der ehemals dominierende Aspekt der Zeitbestimmung tritt zunehmend in den Hintergrund, da bei einer softwaregestützten MTM-Anwendung (z. B. TiCon®) parallel zur Notation der Prozessbausteine sofort der Zeitaufwand für den Arbeitsablauf errechnet wird.

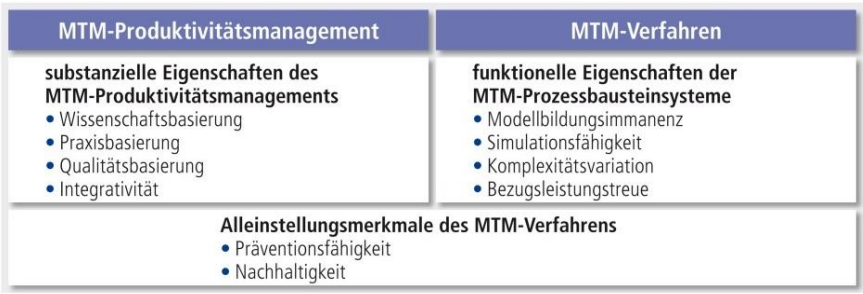


Abbildung 5: Alleinstellungsmerkmale und wichtige Eigenschaften von MTM (Bokranz/Landau, 2012)

Daraus ergibt sich in Verbindung mit der Geschäftsstrategie des Unternehmens und dem Produktionssystem eine Gesamtdarstellung des

MTM-Konzeptes im PEP und des Produktivitätsmanagements mit dem MTM-Verfahren (vgl. Abbildung 7).

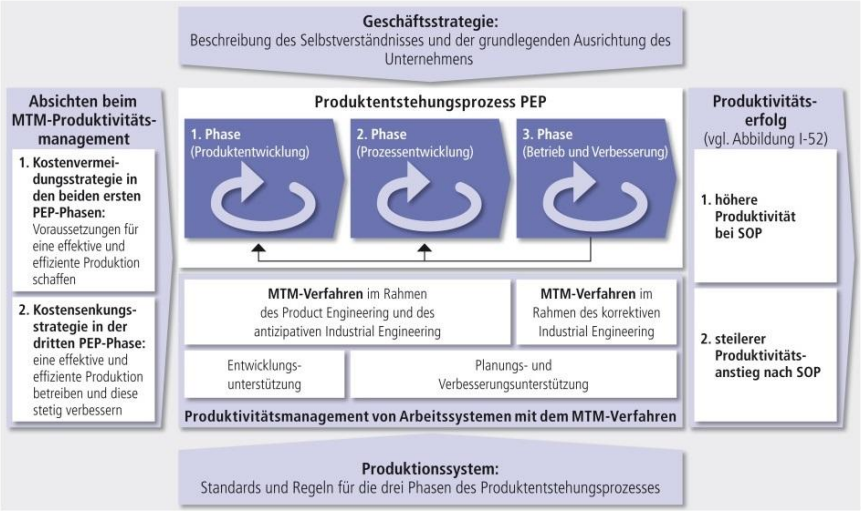


Abbildung 6: Das MTM-Konzept und die Integration des MTM-Verfahrens im Modell (Bokranz/Landau, 2012)

Dieses Gesamtkonzept umfasst folgende Sachverhalte:

1. Es werden nachhaltig produktive, risikobeherrschte, wirtschaftliche und menschengerechte Arbeitssysteme und -prozesse entwickelt (zweite Phase des PEP) und über ihre Betriebsphase hinweg verbessert (dritte Phase des PEP).
2. Die Aufgaben des Industrial Engineering beginnen in der Vorbereitungsphase, die Produktentwicklung begleitend und enden zunächst mit dem Produktionsbeginn. Dann begleitet das Industrial Engineering die Produktion über die Lebensdauer des Produktes hinweg und erfüllt dabei in erster Linie Rationalisierungsaufgaben, die z. B. durch das Werkstattmanagement initiiert werden. Die Aufgaben des Industrial Engineering sind nach drei Zeitphasen zu unterscheiden:

- Beschreibungsphase: Analyse und Dokumentation von Ist-Zuständen, d. h. was vorhanden, gegeben und woran Kritik zu üben ist.
- Planungsphase: Entwicklung von Soll-Zuständen, das ist der Entwurf und die umsetzungsreife Ausplanung künftiger Zustände.
- Umsetzungsphase: Realisierung von Soll-Zuständen, d. h. das Schaffen verbesserter Ist-Zustände, die nachfolgend weiter zu verbessern sind.

Für die Arbeitstechniken der Industrial Engineers ist kennzeichnend, dass sie diese drei Arbeitsphasen unterstützen. Da Industrial Engineering-Arbeit Projektarbeit ist, müssen Industrial Engineers Könner auf dem Gebiet des Projektmanagements sein.

3. Industrial Engineering ist durch seine Interdisziplinarität gekennzeichnet, denn die Arbeit der Industrial Engineers umfasst technische, arbeitswissenschaftliche, arbeitswirtschaftliche, betriebswirtschaftliche, organisatorische, juristische, psychologische, pädagogische und informationswissenschaftliche Fragestellungen.
4. Ziel der Anwendung von Methoden des Industrial Engineerings ist es, die Profitabilität und Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen zu sichern und dabei die Mitarbeiterbelange gebührend zu berücksichtigen. Weiterhin ist kennzeichnend, dass der Industrial Engineer Projektarbeit leistet, d. h. Industrial Engineering steht für eine Fach-, nicht aber für eine Managementfunktion.

Dies führt zu einem erweiterten Verständnis von Industrial Engineering als Methodenmanagement im Rahmen des Produktivitätsmanagements. In den drei Phasen des PEP stellt MTM zahlreiche Unterstützungsinstrumente zur Verfügung. Beispielsweise sind dies die bewährten Methoden ProKon (Produktionsgerechte Konstruktion) sowie z. B. MTM-UAS (Universelles Analysiersystem) und MTM*ergonomics*® für die Darstellung der

Arbeitsabläufe während der Planung bzw. bei Prozessoptimierungen. Die Neuentwicklungen Human Work Design und Ergonomic Assessment Worksheet (EAWS) weisen den Weg von MTM zur ganzheitlichen Gestaltung und Modellierung menschlicher Arbeit.

6 Human Work Design und Ergonomic Assessment Worksheet – Ganzheitliche Gestaltung menschlicher Arbeit

Um menschliche Arbeitsabläufe ganzheitlich, insbesondere unter ergonomischen Aspekten, gestalten zu können, müssen Einflussgrößen wie Körperhaltung, Bewegungsrichtung u.a. erfasst werden. Unter dem Titel „Human Work Design“ entsteht in Zusammenarbeit von der Deutschen MTM-Vereinigung e.V. und deren Mitgliedsunternehmen (AUDI AG, DAIMLER AG, VOLKSWAGEN AG und MIELE & Cie. KG) sowie Wissenschaftspartnern (IAD der TU Darmstadt und dem IAW der RWTH Aachen) ein neues MTM-Bausteinsystem. Mit dem Bausteinsystem Human Work Design wird erstmals für die methodische als auch physische Bewertung eine standardisierte Prozessbeschreibung geliefert.

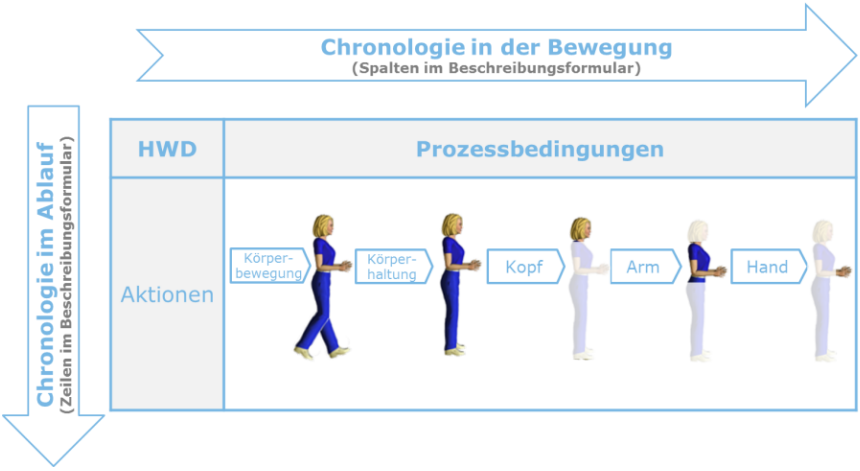


Abbildung 7: Chronologische Modellierung menschlicher Arbeit mit Human Work Design (Finsterbusch et al., 2014)

Durch die Kopplung physischer Bewertungsverfahren (z. B. EAWS) kann die ergonomische Gestaltung menschlicher Arbeit über die Prozesskette quantifiziert werden. Durch die Erfassung ergonomischer Einflussgrößen liefert Human Work Design eine bisher nicht gekannte Qualität bei der Beschreibung menschlicher Arbeitsabläufe (Abbildung 7).

Mit dem neuen Prozessbausteinsystem Human Work Design werden ergonomische Einflussgrößen (z. B. Bewegungsrichtung) erfasst, die in den bisherigen Prozessbausteinsystemen keinen Niederschlag gefunden haben. Damit wird es möglich, parallel zu den beiden Ergebnisgrößen „Modellierung des Ablaufs“ und „Zeit“ einen weitere Einflussgröße „Ergonomie“ zu aktivieren und damit einen wesentlichen Schritt in Richtung ganzheitliche Gestaltung zu gehen.

Human Work Design repräsentiert durch die Verwendung von Piktogrammen sowie durch die konsequente chronologische Modellierung deutlicher und klarer eine Prozesssprache als dies durch die bisherigen Prozessbausteinsysteme erfolgte. Somit erschließt sich die Modellierung menschlicher Bewegungen einem viel größeren Personenkreis, da es einfach wird, einen Ablauf zu beschreiben und zu verstehen; dies war – bedingt durch die bisherige Kodierung der Prozessbausteine - „nur“ MTM-ausgebildeten Personen möglich.

Das vom Menschen abgeleitet Bewegungsmodell (Körper, Kopf, Arm und Hand) ermöglicht die simultane Gestaltung ergonomischer und produktiver Arbeit. Gleichzeitig wird durch die Kopplung physischer Bewertungsverfahren (z. B. EAWS) eine Standardisierung bei der Bewertung von Belastungsdauer (Sollzeitermittlung durch MTM-Normzeitwert, MTM-Normleistung) und der Intensität (Belastungshöhe der Arbeitsmethode und deren Einflussgrößen) erreicht. Dies schafft bei allen Beteiligten (Arbeitnehmer und Arbeitgeber) ein gemeinsames Verständnis und fördert über die Prozesskette eine interdisziplinäre Zusammenarbeit bei der Planung und Gestaltung menschlicher Arbeit (Finsterbusch et al., 2014).

7 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag adressiert grundlegende Aspekte menschlicher Arbeit im Kontext der Industrie 4.0 und gibt Hinweise, wie aus menschlicher Sicht der „optimale Punkt“ für Produktions- und Arbeitssysteme im Zusammenwirken von Menschen und Maschinen bestimmt werden kann (bzw. könnte). Besonders vor dem Hintergrund der Industrie 4.0 ist eine fundierte Kenntnis der Prinzipien und Grundlagen manueller Arbeit bzw. guter Arbeitsgestaltung von besonderer Bedeutung, um im Kontext der Cyber-Physischen Produktionssysteme die Modellierung produktiver Arbeit auch aus Sicht des Menschen her durchführen zu können.

Insbesondere die Prozesssprache und die immanente Normleistung bieten grundlegende Antworten zu den einleitend gestellten Fragen nach den Anforderungen an menschliche Leistung. Sie wird, bspw. durch ihre Ausprägung in Form der MTM-Normzeiten, zu einem zentralen Element in betrieblichen Arbeits- und Produktionssystemen, ermöglicht ein gemeinsames, interdisziplinäres Verständnis bei der Gestaltung menschlicher Arbeit und gewinnt somit vor dem Hintergrund der Verschmelzung von IT und Produktion in der Industrie 4.0 zentrale Bedeutung. Ergänzend dazu bietet das Industrial Engineering Verständnis von MTM für Unternehmen einen geeigneten Rahmen zur systematischen Entwicklung der Produktivität von Arbeits- und Produktionssysteme.

Perspektivisch betrachtet ist

a) dieser Beitrag Voraussetzung für die - beginnende - Einordnung, Abgrenzung und Positionierung von MTM als nationale und internationale Organisation und als Methode bzw. Instrument zur Planung, Gestaltung und Bewertung menschlicher Arbeit im sich intensivierenden Diskurs der Industrie 4.0 und

b) wird MTM bei der Entwicklung, Planung, Gestaltung und Umsetzung von Human-orientierten Cyber-Physischen Produktionssysteme (HCPPS) eine zentrale Rolle spielen.

Literatur

Becks, C.: Investitionsarme Gestaltung zukunftsorientierter Arbeitsstrukturen – MTM-Planungssystematik für die Serienfertigung. In: Zeitschrift Personal 9/93, Wirtschaftsverlag Bachem 1993

Bokranz, R. / Landau, K.: Handbuch Industrial Engineering. Produktivitätsmanagement mit MTM. Schaeffer-Pöschel, Stuttgart 2012

Bokranz, R. / Landau, K.: Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen. MTM-Handbuch. Schaeffer-Pöschel, Stuttgart 2006

Britzke, B.: Verfügen wir über einen soliden Leistungsmaßstab?. In: Planung+Produktion, Publica-Press Heiden, Heft 10, Oktober 1994, S. 17

Deuse, J. / Schallow, J. / Sackermann, R.: Arbeitsgestaltung und Produktivität im globalen Wettbewerb. In: Arbeit, Beschäftigungsfähigkeit und Produktivität im 21. Jahrhundert - 55. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V., 4.-6.3.2009, GfA-Press, Dortmund, S. 19-23.

Finsterbusch, T. et al.: Human Work Design- Ganzheitliche Arbeitsgestaltung mit MTM. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.): Gestaltung der Arbeitswelt der Zukunft - 60. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Dortmund : GfA-Press, 2014, S. 324–326

Glatz, H. / Nadig, F.: MTM Geschichte und Entwicklung. In: Personal. MTM-Report 2003. Verlagsgruppe Handelsblatt Düsseldorf, 2003, S. 21-25

Helms, W.: MTM – Ein Verfahren vorbestimmter Zeiten. In: Personal, MTM-Report 91/92, Köln 1991

Hilf, H. H.: Arbeitswissenschaft. Grundlagen der Leistungsforschung und Arbeitsgestaltung. Hanser, München 1957

Imai, M.: KAIZEN. Der Schlüssel zum Erfolg der Japaner im Wettbewerb. Wirtschaftsverlag Langen Müller Herbig, München 1992

Ishiwata, J.: Die flexible Fabrik. Moderne Industrie, Landsberg 2001

Kuhlang, P.: "Industrial Engineering – Systematische Gestaltung produktiver, industrieller Wertströme", Habilitationsschrift, Wien, Techn. Univ., 2013.

Sekine, K.: Produzieren ohne Verschwendung. Moderne Industrie, Landsberg 1995

Stowasser, S.: Produktivität und Industrial Engineering. In: Landau, K. (Hrsg.): Produktivität im Betrieb. Tagungsband der GfA Herbstkonferenz 2009, S. 201-211. Ergonomia, Stuttgart 2009

Wilhelm, B.: Kundenwünsche wirtschaftlich umsetzen – was machen die Japaner anders? mi-Kongress „Die Kraft der 2. Lean Welle“, Ludwigsburg 2007

Westkämper, E.: MTM – ein System mit Zukunft. In: Britzke, B. (Hrsg.): MTM in einer globalisierten Wirtschaft. Arbeitsprozesse systematisch gestalten und optimieren. mi-Wirtschaftsbuch, München, erscheint 2010

Womack, J. P. / Jones, D. T. / Roos, D.: The machine that changed the world, Macmilian Publishing Company, New York, 1990

Erhöhung der Ressourceneffizienz durch ein Modellierungs- und Analysetool zur Unterstützung kognitiver Prozesse

Markus Gram, Hubert Biedermann

1 Einführung

Die Erhöhung der Ressourceneffizienz als Beitrag zur Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit ist für produzierende Unternehmen in einem sich dynamisch entwickelnden Umfeld eine große Herausforderung. Insbesondere in komplexen Fabrikstrukturen ist eine ganzheitliche Steigerung der Ressourceneffizienz äußerst schwierig. Dieser Beitrag zeigt am Beispiel eines Unternehmens der Nichteisenmetallindustrie, in welchem die Produktionsstruktur eine hohe Komplexität aufweist, wie die Ressourceneffizienz erhöht werden kann. Fokus der Methodik ist die Identifikation von Verlusten innerhalb des Produktionssystems, die sich negativ auf die Effizienz auswirken. Zur methodischen Unterstützung wurde ein Tool entwickelt, das neben der Modellierung des Produktionssystems auch unterschiedliche zeitliche Analysen des ganzheitlichen Verhaltens desselben zulässt. Dieses Instrumentarium ermöglicht es kritische Anlagen entlang des Wertstroms zu identifizieren und dessen Verluststruktur transparent darzustellen. Hierdurch werden kognitive Prozesse beim Disponenten angeregt, die zu schlussfolgerndem Denken desselben führen und Handlungen nach sich ziehen, die die Ressourceneffizienz erhöhen.

2 Der kognitive Prozess

Kognitive Prozesse sind gedankliche Vorgänge des Menschen, die ihm ermöglichen Kenntnisse über seine Umwelt sowie von sich selbst zu erlangen. Diese Abläufe sind als die gedankliche Kontrolle und Steuerung von Verhalten zu sehen (Kroeber-Riel & Gröppel-Klein, 2013, p. 304). Kognition wird nach MATLIN als Aneignung, Speicherung, Verarbeitung und Nutzung von Wissen angesehen. Wissen ist hierbei die Ansammlung von Informationen mit Ausrichtung auf den Menschen (Büscher, Kuz, Ewert,

Schilberg, & Jeschke, 2012, p. 585; Matlin, 2012). Abbildung 1 zeigt das Informationsverarbeitungsmodell von WICKENS. Hierbei wird von einer gewissen Reizstärke ausgegangen, die erreicht werden muss, um die Wahrnehmungsschwelle zu überwinden. Mithilfe der gespeicherten Information im Gedächtnis kommt es zu einer Strukturierung der aufgenommenen Reize (visuell, akustisch,…) und einer Herauslösung der relevanten Informationen (Erkennen der Information). Je nach der Klarheit und Komplexität der Information führt dies in der Phase der Kognition nach dem Dreiebenenmodell nach RASMUSSEN zu unterschiedlichen Aktionen (Rasmussen, Pejtersen, & Goodstein, 1994). Diese erfolgen auf unterschiedlichen Niveaus (fertigkeitsbasierend, regelbasierend und wissensbasierend) im beschriebenen Entscheidungs- und Problemlösungsprozess. Die getroffenen Entscheidungen verursachen eine verbale oder manuelle Reaktion des Menschen auf den wahrgenommenen Reiz (Schmidt, Schlick, & Grosche, 2008, p. 81f).

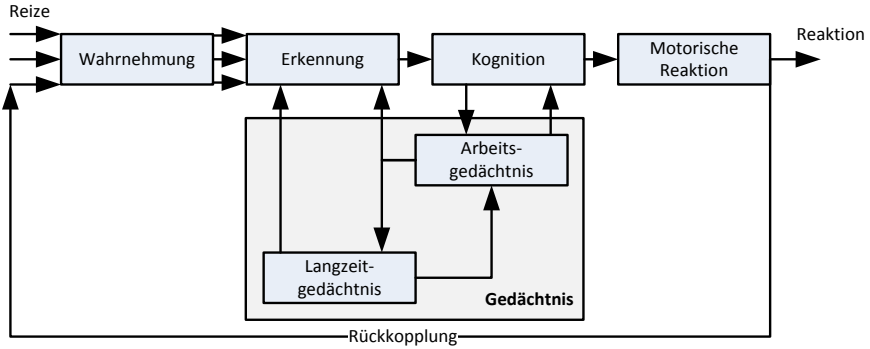


Abbildung 1 Der menschliche Informationsverarbeitungsprozess(Schmidt et al., 2008, p. 82; Wickens, 1991)

In dem Prozessmodell hat die Nutzung der gespeicherten Informationen im Gedächtnis zur Erkennung von Situationen eine besondere Bedeutung. Für die Verarbeitung der Informationen wird Energie benötigt die durch Ressourcen bereitgestellt wird. Diese sind in erster Linie von dem Menschen

abhängig und dementsprechend individuell, situativ variabel und limitiert (Schmidt et al., 2008, p. 82).

Eine Problematik bei der Erfassung liegt bei komplexen Sachverhalten zumeist in der Fähigkeit des Menschen entscheidende Reize zu identifizieren, zu deuten und adäquate Maßnahmen abzuleiten (Pruckner, 2011, p. 22). Hierzu sind im Kontext der Produktion entsprechende Lösungen entwickelt worden, die als kognitive Produktionssysteme bezeichnet werden.

3 Kognitive Produktionssysteme

Der beschriebene kognitive Prozess kann auf technische Systeme übertragen werden, die für die Verarbeitung von Informationen vorgesehen sind. In Bezug auf technische Systeme sind nach STROHNER folgende Eigenschaften für einen kognitiven Prozess erforderlich (Büscher et al., 2012, p. 585; Strohner, 1995):

- *Wahrnehmung*, als sensorische Erfassung von Daten und Weiterverarbeitung zu Information wie auch Beobachtung des Systems und dessen Umwelt
- *Schlussfolgerung*, als induktive und deduktive Wissensgewinnung basierend auf dem bestehenden Wissen
- *Erinnerung,* als Verschlüsselung und Speicherung von vergangenen Ergebnissen des kognitiven Prozesses für eine spätere Nutzung
- *Planung*, als kognitive Vorgänge zu erstellen eines Plans von Aktionen mit Grundlagen für die Entscheidungsfindung
- *Entscheidungsfindung*, als Abstimmung der Entscheidung mit einem Zielzustand
- *Lernende Handlung* als sensorische Information und Wissen das neues Wissen und Verhalten schafft.

Forschung im Bereich von kognitiven technischen Systemen wird vor allem in der Robotik, Automation und Produktionsplanung betrieben. Diese

Systeme zeichnen sich durch kognitive Kontrollmechanismen wie z.B. rückbezügliche und situationsabhängige Verhaltensformen aus. Eine weitere Charakteristik ist die integrierte kognitive Fähigkeit des Systems. Hierzu zählen Wahrnehmung, Schlussfolgerung, Lernen und Planen und das Wissen was gerade in der physischen Welt gerade gemacht wird (Zäh, Ostgathe, Friedrich, & Hoisl, 2007).

Abbildung 2 zeigt die Architektur eines kognitiven Systems wie auch die Wechselwirkung der einzelnen Tätigkeiten. Es ist ersichtlich, dass der Aufbau dem des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses annähernd gleicht.

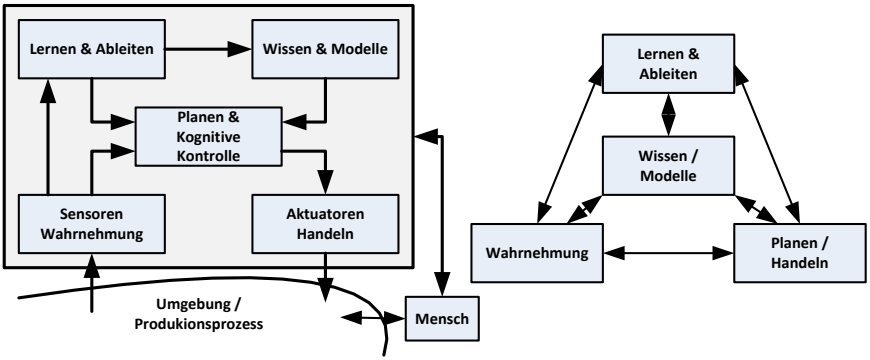


Abbildung 2 Kognitive Systemarchitektur und Wechselwirkungen (Zäh et al., 2007)

Die Grundlage von solchen Systemen ist die situationsbezogene Informationsverarbeitung, die eine echtzeit- und betriebsbegleitende Überwachung aller Ressourcen des Produktionssystems ermöglicht (Zäh, Ostgathe, & Wiesbeck, 2010).

Das in diesem Beitrag vorgestellte IT Tool erfüllt den Zweck die Wahrnehmung auf Veränderungen im Produktionssystem in Bezug auf auftretende Verluste zu verbessern. Durch die Visualisierung des Systems werden relevante Informationen (Verlustquellen) aktuell und strukturiert zur Verfügung gestellt. Im folgenden Kapitel wird das betrachtete komplexe Produktionssystem beschrieben.

4 Komplexe Produktionssysteme in der Prozessindustrie

Die Erzeugung von Gütern erfordert immer aufwendigere Produktionsprozesse, deren Ausprägungen auch als Systeme zur Gütererzeugung angesehen werden können. Ein Produktionssystem besteht aus einzelnen Elementen (Subsysteme), die miteinander in Verbindung stehen. Je nach hierarchischer Einteilung können diese Teile des Systems Werke, Anlagen, Baustellen oder auch Arbeitsplätze sein. Weitere Einteilungsmöglichkeiten des Systems ergeben sich durch die Art der Beziehungen woraus sich Subsysteme wie z.B. Materialfluss, Informationsfluss,… ableiten lassen. Das Gesamtsystem ist in einer Umwelt (Supersystem) implementiert, mit der es unterschiedlich interagiert (natürlich, technisch, wirtschaftlich,…) (Dyckhoff, 2006, p. 4f; Günther & Tempelmeier, 2011, p. 2ff).

Die Struktur eines Systems kann durch ihre Komplexität beschrieben werden, wobei ein äußerst komplexes System bei einer sehr hohen Anzahl an Systemelementen und Beziehungen, die eine hohe Veränderungsdynamik aufweisen, vorliegt (Schuh, 2005, p. 5; Ulrich & Probst, 1995, p. 61). Die Unternehmenskomplexität wird erhöht durch die Zunahme der Anzahl an Produkten, Teilen, Zulieferer, Kunden, Organisationseinheit,… die koordiniert werden müssen und dessen Beziehungen untereinander wie auch deren Häufigkeit der Veränderung sowohl der Beziehungen als auch der erstgenannten Elemente (Adam, 2011, p. 30ff). Komplexe Produktionssysteme zeichnen sich weiters durch einen zeitlichen veränderlichen Produktmix, unterschiedliche Prozesstypen, hohe Komplexität der Arbeitspläne, Umrüstzeiten, die von der Produktionsreihenfolge abhängig sind, parallele Maschinen, fixierte Kundentermine und sekundäre Ressourcen aus (Mönch, 2006, p. 1).

Abbildung 3 zeigt ein komplexes Produktionssystem in der Nichteisenmetallindustrie das den erwähnten Kriterien entspricht. Die Grafik zeigt alle Elemente (Anlagen) des Systems und ihre Verknüpfungen (Materialbewegungen) innerhalb eines Betrachtungszeitraums von einem Jahr. Für die Herstellung von 34 Produktfamilien werden 81 Anlagen

eingesetzt, wobei sich die Bearbeitungsreihenfolgen deutlich unterscheiden. Die farbliche Kennzeichnung der Anlagen zeigt die unterschiedlichen Dispositionsbereiche innerhalb des Produktionssystems. Weiters sind der Materialeingang und der Ausgang in der Darstellung sichtbar.

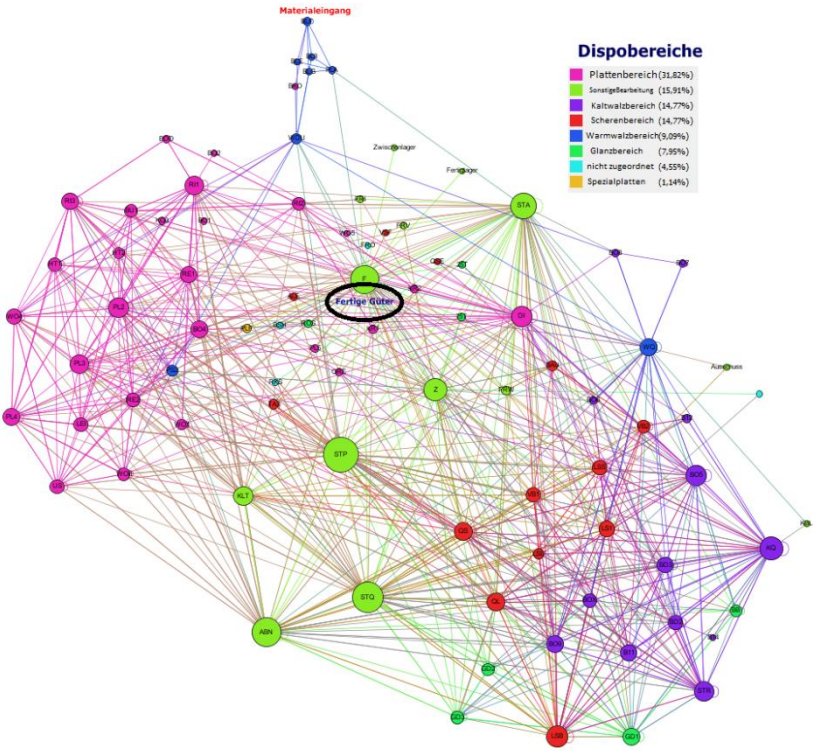


Abbildung 3 Komplexes Produktionssystem in der Nichteisenmetallindustrie

Die Planung und Steuerung des Produktionssystems erfolgt vorwiegend dezentral, wobei eine Optimierung nach z.B. logistischen Zielgrößen auf einzelne Bereiche beschränkt ist. Weiters ist durch die hohe Komplexität

eine Intransparenz gegeben, wodurch Turbulenzen in der Auftragsabwicklung zu spät erkannt werden (Erlach, 2010, p. 171f). Durch die stationäre Gebundenheit und auftretende Verluste (Ausfälle, Wartung, Qualitätsverluste,…) der Anlagen treten weitere Turbulenzen auf, die zu Verlusten in Form von Wartezeiten und Beständen führen. Für eine optimale Auftragsabwicklung ist eine Vermeidung dieser Verluste notwendig.

Neben der dezentralen Disposition, die keine ganzheitliche Sichtweise des Produktionssystems ermöglicht, ist die kognitive Komplexität des Menschen begrenzt. Hierunter versteht man die Fähigkeit die Komplexität und Dynamik der Arbeitssituation zu beherrschen. Gründe für dieses Defizit sind die Unvollständigkeit des Wissens, wie auch die natürlichen Grenzen der menschlichen Informationsaufnahme und –verarbeitung (Jost, 2008, p. 181f).

Das vorgestellte Tool soll insbesondere dem Defizit der unvollständigen Information entgegenwirken. Im folgenden Kapitel wird auf den Sachverhalt im Kontext der Ressourceneffizienz als Basis des entworfenen IT-Tools näher eingegangen.

5 Ressourceneffizienz in der Produktion

Der in diesem Beitrag zugrunde liegende Ressourcenbegriff entstammt der Produktionstheorie. Ausgehend von einem Input-Transformations-Output System werden Produktionsfaktoren, die in diesem Kontext als Ressourcen bezeichnet werden, als Inputfaktoren für die Leistungserstellung (Output) bereitgestellt (Müller-Christ, 2011, p. 310ff). Das Zusammenwirken der nach GUTENBERG definierten Produktionsfaktoren Betriebsmittel (Anlage), Mensch (Personal), Material und Energie erzeugt einen Output. Dieses Modell des Wertschöpfungsprozesses kann sowohl für das Produktionssystem als Ganzes wie auch für seine kleinsten Elemente (Arbeitssystem) angenommen werden. Mithilfe dieser elementarsten Elemente ist es möglich, ein produzierendes Unternehmen als ein Netzwerk von

Wertschöpfungsprozessen zu modellieren (Albach, 1989, p. 63; Dyckhoff, 2006, p. 44; Gutenberg, 1958).

Der rationelle Einsatz der Produktionsfaktoren wird als Effizienz bezeichnet (Müller-Christ, 2011, p. 310f). Ob ein Transformationsprozess wertschöpfend ist, zeigt sich durch die Relation des bewerteten Outputs zu dem bewerteten Input von größer eins. Ein Verhältnis kleiner eins wird auch als ein Verlust angesehen (Töpfer, 2007, p. 75). Es kann weiters eine Unterscheidung der Effizienz in technische und ökonomische getroffen werden:

"Als technische Effizienz bezeichnet man den Zustand, bei dem keine Produktionsfaktoren verschwendet werden. Ökonomische Effizienz im Sinne der Mikroökonomie liegt vor, wenn die Minimalkostenkombination realisiert [...] wird. [...] Ökonomische Effizienz in diesem Sinne setzt technische Effizienz voraus, aber es gilt nicht das Umgekehrte."(*Vahlens großes Wirtschaftslexikon*, 1994, p. 493)

Zur Erhöhung der Effizienz eines Produktionssystems ist die Vermeidung jeglicher Verluste die innerhalb des Systems auftreten anzustreben. Unter Verluste bzw. Verschwendung werden jegliche Tätigkeiten innerhalb eines Produktionssystems verstanden die nicht wertschöpfend sind bzw. die für den Kunden keinen Wert darstellen. Hierbei unterscheidet man Fehlleistungen (fehlerhaft erbrachte Leistung) wie auch Blindleistungen (generieren keine Wertschöpfung). Stützleistungen hingegen sind notwendig um eine Nutzleistung zu ermöglichen (z.B. Transport).(Brunner, 2011, p. 44; Simon, 2005, p. 307).

Diese Einteilung der Tätigkeiten nach ihrem Verhältnis zur erzeugten Wertschöpfung kann noch weiter verfeinert werden. Hierzu sind im Lean Management als auch in der TPM Philosophie eine Vielzahl an unterschiedlichen Verlusten definiert, die innerhalb eines Produktionssystems auftreten können (Bicheno & Holweg, 2008, p. 24ff; M. Gram & Künstle, 2011; Nakajima, 1988; Ohno, 2009, p. 52; Suzuki, 1994, p. 55).

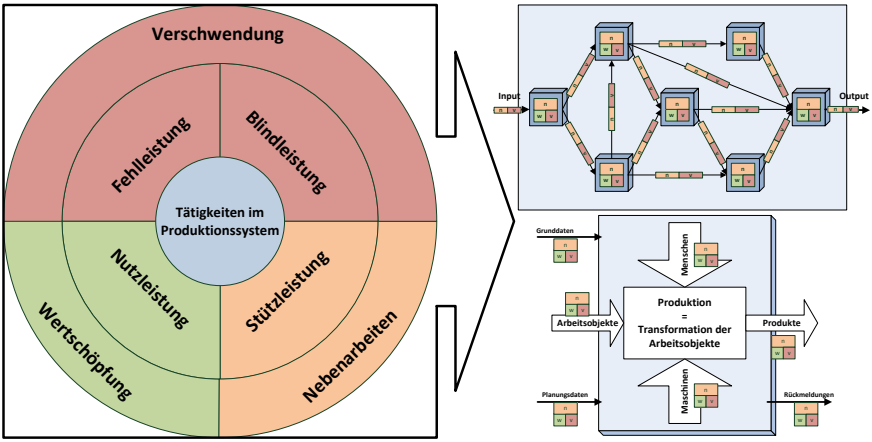


Abbildung 4 Wertschöpfende und nichtwertschöpfende Aktivitäten, Tätigkeiten und Prozesse innerhalb eines Produktionssystems (Markus Gram, 2014a)

Abbildung 4 zeigt die Strukturierung der Tätigkeiten als auch deren Auftreten innerhalb eines generischen Produktionssystems und Arbeitssystems. Reduzierte Effizienz in Form von Verlusten kann in jedem Element des Systems (Anlagen) auftreten wie auch zwischen den einzelnen Elementen (Transport, Lagerung).

In komplexen Produktionssystemen ist eine Verlustidentifikation und -vermeidung sehr schwierig. Zur Unterstützung der Disposition Verluste innerhalb des Produktionssystems identifizieren und entsprechende Gegenmaßnahmen für ihre Vermeidung zeitgerecht einleiten zu können, wird im nächsten Kapitel ein IT-Tool vorgestellt, dass dies möglich macht.

6 IT Tool zur Unterstützung der Disposition

Zur kognitiven Unterstützung der Disponenten sowie zur besseren Erfassung der Komplexität des Produktionssystems ermöglicht das Tool unterschiedliche Analysepfade. Abbildung 5 zeigt die Integration des Tools zur Unterstützung des kognitiven Prozesses der Disponenten wie auch die unterschiedlichen Analysearten (Markus Gram, 2014b).

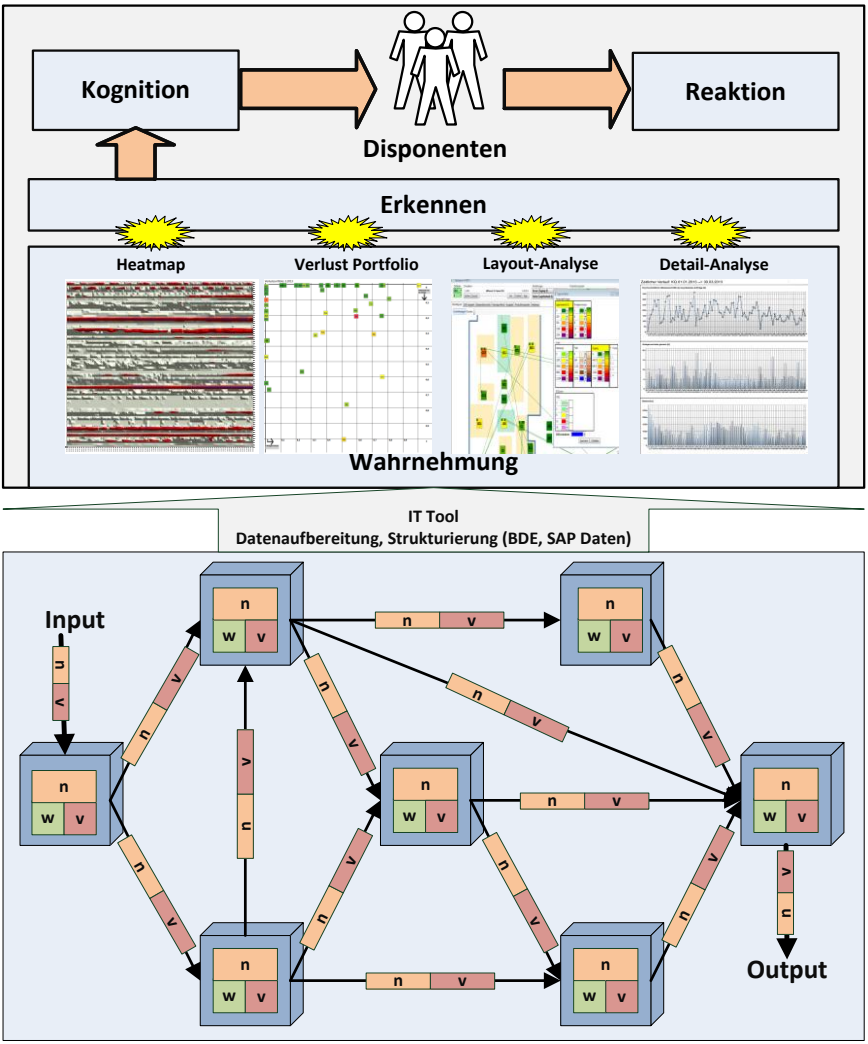


Abbildung 5 Aufbau und Nutzung des IT-TOOLs

Als Datenbasis für dieses Tool dienen das im Unternehmen integrierte BDE System sowie das in der Ablaufplanung eingesetzte ERP-System (SAP). Diese Daten werden auf einem SQL Server zusammengeführt und Struktur-,

Verlust- als auch Bewegungsdaten aufbereitet und für das IT-Tool bereitgestellt. Das Tool erstellt hieraus unterschiedliche Analysesichten die es ermöglichen Verluste innerhalb des Produktionssystems zu erkennen. Die Verluste werden anhand einer Verlust-Scorecard Systematik strukturiert, um einen einheitlichen Vergleich im gesamten Produktionssystem zu ermöglichen (Markus Gram, 2013a, 2013c).

Zur Wahrung des Gesamtüberblicks über das Produktionssystem dient die Layout-Analyse und die Heatmap Darstellung. In der Layoutanalyse werden tagesgenau die vollzogenen Materialbewegungen im Modell des realen Produktionssystems dargestellt. Durch eine definierbare Farbskala können hohe Materialmengenzugänge wie auch lange Wartezeiten des Materials vor den Anlagen ersichtlich gemacht werden. Gleichermaßen ist es möglich, die Anlagen nach dem Lagerbestand vor der Anlage als auch nach Anlagenverlustintensität farblich zu kennzeichnen. Die Heatmap-Darstellung ermöglicht es anlagenbezogen den zeitlichen Verlauf des Lagerbestandes, der Wartezeiten, der Anlagenverluste und der Zugänge zu analysieren. Eine Gegenüberstellung von zwei unterschiedlichen Werten wie z.B. Lagerbestand und Anlagenverluste ist möglich und zeigt entsprechende Abhängigkeiten. Die Gewichtung des Heatmaps erfolgt nach einem festgelegten Farbschema. Durch diese beiden Darstellungsformen ist es dem Disponenten möglich, kritische Anlagen in Bezug auf auftretende Verluste zu identifizieren und entsprechende Detailanalysen pro Anlage durchzuführen (Markus Gram, 2014a).

Das Verlustportfolio zeigt die Verlustausprägung der Anlagen entlang des Wertstroms. Hierzu werden die Anlagen nach Anlagen- und Logistikverluste (Transport, Wartezeit) in das Portfolio eingezeichnet. In diesem spezifischen Fall ist eine Auswertung für jede der 34 Produktfamilien für einen festgelegten Betrachtungszeitraum möglich (Markus Gram, 2013b, p. 131).

Mittels dieser unterschiedlichen Sichtweisen auf das Produktionssystem werden durch geeignete Visualisierung den Disponenten die Verlustintensitäten als visueller Reiz erkenntlich gemacht. Durch eine Detailanalyse und dem Wissen der Personen über anlagenspezifische

Charakteristiken sowie durch das Produktionsprogramm bedingte Gegebenheit ist es möglich entsprechend verlustmindernde Maßnahmen wie z.B. Änderung des Produktionsprogramms, der Instandhaltungsstrategie etc. abzuleiten und auf die dynamische Verlustentwicklung zu reagieren.

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Das Verstehen von Abläufen und der Konsequenz von planerischen dispositiven Handlungen in komplexen Produktionssystemen ist eine große Herausforderung für die am Produktionsprozess beteiligten Personen. Das Erfahrungswissen über die Zusammenhänge im Produktionsvollzug ist bei langjährigen Mitarbeitern teilweise vorhanden. Es beschränkt sich jedoch auf Teile des Produktionssystems und ist durch neue Produkte und Produktionsabläufe rasch nicht mehr aktuell. Mithilfe des vorgestellten IT-Tools ist es möglich die notwendige Transparenz zu schaffen, die es ermöglicht das Produktionssystem ganzheitlich analysieren zu können. Vorrangiger Fokus ist die Identifizierung von Verlusten innerhalb des Systems. Die unterschiedlichen Sichtweisen unterstützen die Disponenten bei der Entscheidungsfindung zur Verfolgung der Produktionsziele und der Verlustreduktion. Durch das Einspielen von Plandaten (Kampagnenplanung) ist es weiters möglich, zukünftiges Verhalten des Systems zu simulieren und entsprechende Änderungen der Reihenfolge wie auch der Größe von Kampagnen zu treffen. Das IT-Tool wird in einem Unternehmen der Nichteisenmetallindustrie zur Unterstützung der Disposition erfolgreich eingesetzt.

Literatur

Adam, D. (2011). Produktions-Management. Gabler Verlag.

Albach, H. (1989). Zur Theorie der Unternehmung: Schriften und Reden von Erich Gutenberg : aus dem Nachlass. Springer.

Bicheno, J., / Holweg, M. (2008). The Lean toolbox: The essential guide to Lean transformation. Picsie Books.

Brunner, F. J. (2011). Japanische Erfolgskonzepte: KAIZEN, KVP, Lean Production Management, Total Productive Maintenance, Shopfloor Management, Toyota Production Management. Hanser Verlag.

Büscher, C. et al. (2012). Kognitive Planungs- und Lernmechanismen in selbstoptimierenden Montagesystemen. In S. Jeschke, I. Isenhardt, F. Hees, & K. Henning (Eds.), Automation, Communication and Cybernetics in Science and Engineering 2011/2012. Springer.

Dyckhoff, H. (2006). Produktionstheorie: Grundzüge industrieller Produktionswirtschaft. Springer DE.

Erlach, K. (2010). Wertstromdesign: Der Weg zur schlanken Fabrik. Springer.

Gram, M. (2013a). A Systematic Methodology to Reduce Losses in Production with the Balanced Scorecard Approach. Manufacturing Science and Technology, 1(1), 12–22.

Gram, M. (2013b). Instrument zur Unterstützung des Wandels zu einer ressourceneffizienten Produktion. In H. Biedermann, S. Vorbach, & W. Posch (Eds.), Ressourceneffizienz: Konzepte, Anwendungen und Best-Practice Beispiele (p. 131).

Gram, M. (2013c). Vorgehensweise zur Unterstützung des systematischen Wandels zu einer ressourceneffizienten Produktion. Logistics Systems Engineering, München: Rainer Hampp Verlag, 135–150.

Gram, M. (2014a). IT unterstützter Wandel zu einer ressourceneffizienten Produktion. In ASMET Forum "Junge Forschung." leoben: ASMET The Austrian Society for Metallurgy and Materials.

Gram, M. (2014b). Wandel zu einer ressourceneffizienten Produktion in der Prozessindustrie. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 1–3. doi:10.1007/s00501-014-0261-1

Gram, M., / Künstle, S. (2011). Effiziente Produktion durch Vermeidung der Verlustquellen im Anlagenbetrieb Identifizierte Verlustquellen in Produktion und Instandhaltung und deren Einfluß auf die eingesetzten Produktionsfaktoren. In H. Biedermann (Ed.), Lean Maintenance (pp. 113 – 133). TÜV Media.

Günther, H.-O., / Tempelmeier, H. (2011). Produktion und Logistik. Springer DE.

Gutenberg, E. (1958). Einführung in die Betriebswirtschaftslehre. Springer DE.

Jost, P.-J. (2008). Organisation und Motivation: Eine ökonomisch-psychologische Einführung. Springer.

Kroeber-Riel, W., / Gröppel-Klein, A. (2013). Konsumentenverhalten. Vahlen.

Matlin, M. W. (2012). Cognition, 8th Edition. Wiley Global Education.

Mönch, L. (2006). Agentenbasierte produktionssteuerung komplexer produktionssysteme. Springer.

Müller-Christ, G. (2011). Sustainable Management: Coping with the Dilemmas of Resource-Oriented Management. Springer.

Nakajima, S. (1988). Introduction to TPM: total productive maintenance. Productivity Press.

Ohno, T. (2009). Das Toyota-Produktionssystem. Campus Verlag GmbH.

Pruckner, M. (2011). Die Komplexitäts-Falle: Wie sich die Komplexität auf den Menschen auswirkt: Vom Informationsmangel bis zum Zusammenbruch. BoD – Books on Demand.

Rasmussen, J. / Pejtersen, A. M., / Goodstein, L. P. (1994). Cognitive systems engineering. Wiley.

Schmidt, L. / Schlick, C. M., / Grosche, J. (2008). Ergonomie und Mensch-Maschine-Systeme. Springer.

Schuh, G. (2005). Produktkomplexität managen: Strategien - Methoden - Tools. Hanser.

Simon, W. (2005). Managementtechniken. GABAL Verlag GmbH.

Strohner, H. (1995). Kognitive Systeme: eine Einführung in die Kognitionswissenschaft. Westdeutscher Verlag.

Suzuki, T. (1994). TPM in Process Industries. Productivity Press.

Töpfer, A. (2007). Betriebswirtschaftslehre: Anwendungs - und Prozessorientierte Grundlagen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Ulrich, H., / Probst, G. J. B. (1995). Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln: ein Brevier für Führungskräfte. Haupt.

Vahlens großes Wirtschaftslexikon: A - E. (1994). Beck, Dt. Taschenbuch-Verl.

Wickens, C. D. (1991). Processing resources and attention. Multiple-Task Performance, 3–34.

Zäh, M. F. et al. (2007). Kognitive Produktionssysteme – auf dem Weg zur intelligenten Fabrik der Zukunft. Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, (9), 525–530.

Zäh, M. F. / Ostgathe, M., / Wiesbeck, M. (2010). Ganzheitliches Datenmodell für kognitive Produktionssysteme. Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, (04), 309–315.

Modellbasierte Gestaltung vernetzter Systeme in der Fabrik im Fokus der Energie- und Ressourceneffizienz

Hendrik Hopf, Egon Müller

1 Einleitung

Energie- und Ressourceneffizienz stellen aufgrund knapper Ressourcen und politischer Zielstellungen wesentliche Zielgrößen für Unternehmen dar, welche zunehmend auch Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit ausüben. Der Energie- und Ressourcenverbrauch eines produzierenden Unternehmens wird maßgeblich durch die Produktion determiniert. Aus diesem Grund haben energie- und ressourceneffiziente Fabriksysteme an Bedeutung gewonnen. Der Fabrikplanung kommt dabei eine besondere Rolle zu, weil gerade in frühen Planungsphasen das Energieniveau und der Ressourcenbedarf einer Fabrik durch die Auswahl von Systemen und deren Verknüpfung in Prozessen maßgeblich definiert werden.

Durch neuartige Informations- und Kommunikationstechnologien, die derzeit im Kontext von Industrie 4.0 entstehen, werden der Fabrikplanung und dem Fabrikbetrieb erweiterte Informationen zur Verfügung gestellt, die zuvor in einer derartigen Detaillierung nicht erfasst oder verarbeitet werden konnten. Dies wird u. a. an den Entwicklungstendenzen im Bereich des Energiedatenmanagements deutlich, die darauf abzielen, große Mengen an Energiedaten und -informationen permanent bereitzustellen und zu verarbeiten (Hopf et al., 2013). Die intelligente Vernetzung der Systeme einer Fabrik und die Anreicherung der Planungsaktivitäten mit Energie- und Ressourceninformationen könnten demnach einen Beitrag für die nachhaltige Gestaltung von Fabriken liefern. Hierfür werden neue oder angepasste Modelle, Methoden und Werkzeuge benötigt, die den Planungsprozess unterstützen.

In diesem Beitrag wird der Stand der Forschung zur energie- und ressourceneffizienten Fabrik zusammengefasst, wobei insbesondere methodische Instrumente zur Planung und Modellierung von Fabriksystemen dargestellt werden. Darauf aufbauend wird ein Modellierungsansatz vorgestellt, mit dem Fabriksysteme auf Basis modell- und systemtheoretischer Grundlagen abgebildet werden können. Dabei wird die Vernetzung der verschiedenen Systeme einer Fabrik in Stoff- und Energieflüssen fokussiert.

2 Stand der Forschung

2.1 Objektbereich – Energie- und Ressourceneffiziente Fabrik

Die energieeffiziente Fabrik ist ein neuartiger Fabriktyp, der mit möglichst wenig Energieeinsatz auf die Herstellung von Sach- und Dienstleistungen ausgerichtet ist und bei dem der Energiefluss für Gestaltungszwecke hervorgehoben wird (Müller et al., 2009, S. 2; Wirth, Schenk & Müller, 2011, S. 801). Hierfür umfasst sie energieoptimierte Systeme und Prozesse, wobei diese nicht separat voneinander, sondern als Gesamtheit mit ihren komplexen Wirkbeziehungen gesehen werden. Weiterhin wird der Energiebedarf zumindest teilweise durch erneuerbare Energien gedeckt, die selbst erzeugt, gespeichert und genutzt werden. Geschlossene Energiekreisläufe der Fabrik tragen zur Minimierung von Energieverlusten bei (Neugebauer, 2013, S. 5). Mit Hilfe des Energiemanagements wird die Zielgröße Energieeffizienz ganzheitlich in die Aufbau- und Ablauforganisation dieser Fabrik integriert. Die energieeffiziente Fabrik agiert als aktiver Teilnehmer in der Energiewandlungskette als Verbraucher, aber auch als Erzeuger und Speicher von Energie (Müller et al., 2013, S. 626).

In einem weiterreichenden Blickwinkel ist die ressourceneffiziente Fabrik vor allem durch die ressourcensparsame und -schonende Nutzung von Energien und Materialien gekennzeichnet (Schenk, Wirth & Müller, 2014, S. 57). Dabei gilt es, bei zunehmender Produktionsmenge, den Einsatz von

Ressourcen zu senken, um damit die Ressourcenproduktivität zu erhöhen (Hesselbach, 2012, S. 7).

2.2 Methodenbereich – Methoden, Modelle und Werkzeuge

Bereich Fabrikplanung

Die Planungsmethode von Engelmann (2009) untersetzt den Fabrikplanungsprozess mit energierelevanten Themen und Faktoren zur rationellen Energienutzung. Auf dieser Grundlage werden im Planungshandbuch von Müller et al. (2009) die Bedeutung und die Potenziale der energieeffizienten Fabrik sowie Lösungsvarianten detailliert beschrieben und die Methodik zur energieeffizienzorientierten Fabrikplanung spezifiziert. Das Peripheriemodell (Schenk, Wirth & Müller, 2014, S. 135-138; Wirth, 1989, S. 25) ist dabei neben Anderen ein grundsätzliches Instrument, um die energetischen Zusammenhänge zwischen den Systemen der Haupt- und Hilfsprozesse zu erklären.

Ein Ansatz für die Planung grüner Fabrik wird von F. Müller et al. (2013) beschrieben, welches Vision und Rahmen, Planungsprozess, Methoden und unterstützende Werkzeuge beinhaltet und als modulares Planungsvorgehen zusammengefasst wird.

Ein weiteres Planungsvorgehen stellt die synergetische Fabrikplanung nach Wiendahl, Reichardt und Nyhuis (2009, S. 417-491) dar. Dabei wird nicht vordergründig auf die Effizienzbetrachtung von Energien und Ressourcen abgezielt, jedoch auf die direkte Verknüpfung der Planungsbereiche Standort, Gebäude, Haustechnik sowie (Produktions-) Prozesse und Einrichtungen.

Neben diesen Planungsmethoden werden in weiteren Forschungsarbeiten Teilaspekte des Fabrikplanungsprozesses aufgegriffen. So wird bspw. ein Konzept für ein nachhaltigkeitsorientiertes Fabrikprofil, welches ökologische, ökonomische, logistische, technische und soziale Gestaltungskriterien umfasst, die bei der Planung berücksichtigt werden sollten, von Dombrowski und Riechel (2013) vorgestellt.

Neben (Müller et al., 2009) sind weitere umfangreiche Werke entstanden, die für die Planung und für den Betrieb energie- und ressourceneffizienter Fabriken besonders relevant sind. Hesselbach (2012) liefert ein Handbuch für die Gestaltung einer energie- und klimaeffizienten Produktion. Von Duflou et al. (2012) wird ein umfassender Überblick über den Stand der Technik von energie- und ressourcenorientierten Methoden und Technologien gegeben. Das Sammelwerk von Neugebauer (2014) beschreibt Ansätze und Lösungen für die ressourcenorientierte Produktion.

Bereich Fabrikbetrieb

Neben den vorgestellten Planungsmethoden sind vor allem Ansätze für die Prozessplanung sowie die Produktionsplanung und -steuerung entwickelt worden. Dazu gehören Vorgehen, die auf Basis zustandsbasierter Energieverbrauchsprofile Maßnahmen zur Optimierung ableiten und bewerten sowie diese in Planungs- und Steuerungssysteme integrieren (Haag, 2013; Verl et al., 2011; Weinert, 2010).

Zur Analyse und Optimierung von Prozessketten unter energetischen Gesichtspunkten wird in vielen Untersuchungen auf den Energiewertstrom zurückgegriffen, um auf Basis einer Ist-Aufnahme Verbesserungsmöglichkeiten abzuleiten (Bogdanski et al., 2013; Erlach & Westkaemper, 2009; Reinhart et al., 2011; Schillig, Stock & Müller 2013).

In Hesselbach et al. (2008) wird hervorgehoben, dass in Produktionssystemen dynamische interne und externe Wirkzusammenhänge zwischen Produktionsprozessen, Gebäude und Einrichtungen vorliegen, die u. a. mit Hilfe von Simulationsmodellen untersucht werden können. Vor diesem Hintergrund wird in mehreren Forschungsarbeiten die Erweiterung von Simulationsmethoden und -werkzeugen erforscht (Junge, 2007; Herrmann et al., 2011; Stahl et al., 2013; Stoldt et al., 2013; Thiede, 2012; Wolff, Kulus & Dreher, 2012).

In Ergänzung existieren noch weitere Instrumente, die speziell zur energetischen oder ökologischen Bilanzierung und Bewertung von Produkten und Prozessen genutzt werden können. Dazu gehören u. a. der

kumulierte Energieaufwand (VDI, 2012), die Materialflusskostenrechnung (DIN, 2011a), die Ökobilanzierung (DIN, 2009b) und die Stoffstromanalyse (Tschandl & Posch, 2012).

Weiterhin stellen Energiemanagement (DIN, 2011b) bzw. auch Umweltmanagement (DIN, 2009a) umfassende organisatorische Instrumente dar, um betriebliche Abläufe kontinuierlich zu verbessern. Ein wesentlicher Bestandteil davon ist das Energiedatenmanagement als ein technologisches Werkzeug, mit dessen Hilfe Energiedaten und -informationen für Planungs- und Steuerungszwecke zur Verfügung gestellt werden (Hopf et al., 2013).

2.3 Zwischenfazit

Die dargestellten Ansätze beschäftigen sich mit unterschiedlichen Aspekten der Energie- und Ressourceneffizienz im Bereich der Fabrikplanung und des Fabrikbetriebs. Diese Vielfältigkeit unterstreicht die Komplexität und die Herausforderungen, die diese Thematik mit sich bringt.

Bei näherer Betrachtung hat sich herausgestellt, dass der Großteil der Beiträge im Bereich des Fabrikbetriebs angesiedelt ist und dabei die Analyse und Optimierung (bestehender) Prozesse oder Systeme fokussiert wird. Dabei wird der Betrachtungshorizont oftmals – gerade bei empirischen Untersuchungen unter Anwendung von Energiemessungen – auf einzelne Maschinen oder Anlagen begrenzt.

Es bleibt schließlich festzustellen, dass die Fabrik ein sehr komplexes System darstellt. Für dessen ganzheitliche Betrachtung bietet sich ein verallgemeinertes Modell an, mit dem der Systemaufbau und die Systemfunktionsweise beschrieben werden. Dadurch wird die Ausgangsbasis geschaffen, mit der die Zielgrößen Energie- und Ressourceneffizienz bereits in frühen Planungsstadien bei der Gestaltung des Fabriksystems berücksichtigt werden können. Der Kern eines derartigen Modellansatzes wird im folgenden Kapitel hergeleitet.

3 Modellierung des Fabriksystems

3.1 Fabrik als System

Das Gestaltungsobjekt Fabrik wird in der Fabrikplanung nach systemtheoretischen Ansätzen auch als Fabriksystem aufgefasst. Durch diese Betrachtungsweise wird das komplexe Gebilde Fabrik in einzelne Bestandteile und deren Beziehungen zerlegt, womit die Grundlage für die systematische Betrachtung des Planungsobjektes geschaffen wird. Grundsätzlich ist die Fabrik ein sozio-technisches System, in dem Mensch und Technik zusammenwirken. Im Folgenden werden die technischen Systemaspekte fokussiert, um daran vor allem die Aspekte bezüglich des Systemaufbaus und der Vernetzung erklären zu können.

Das System Fabrik ist im Allgemeinen als eine Menge von Elementen, zwischen denen Relationen (Prozesse und Strukturen) bestehen, die über eine Randstruktur in eine Umgebung eingebunden ist, zu verstehen (Schmigalla, 1995, S. 81). Ropohl (2009, S. 77-78) spezifiziert ein System als Modell einer Ganzheit, die einen funktionalen Zusammenhang zwischen Attributen (Ein- und Austräge, Zustände) hat (Funktion), aus mit miteinander verknüpften Elementen besteht (Struktur) und die sich von ihrer Umgebung bzw. von einem Supersystem abgrenzen lässt (Hierarchie). Nach dieser Definition liegt ein vollständiges Systemmodell vor, wenn diese drei Systemkonzepte – Funktion, Struktur und Hierarchie – beschrieben sind (Ropohl, 2009, S. 77). Die einzelnen Systemkonzepte stellen demzufolge Teilaspekte des Gesamtsystems dar, so dass diese als Partialmodelle dienen. Dieser Ansatz wird im nächsten Schritt auf das Fabriksystem übertragen und die einzelnen Systemkonzepte herausgearbeitet.

3.2 Hierarchisches Fabriksystemkonzept

Mit dem hierarchischen Systemkonzept wird das Betrachtungsobjekt sowohl in übergeordnete Systeme eingeordnet als auch in untergeordnete Systeme – kleinste Stufe sind die Elemente, die nicht weiter aufgelöst werden – eingeteilt.

Das Fabriksystem als abstraktes Objekt ist eingebunden in die natürliche Umwelt vereinfacht zusammengefasst als Biosphäre, Atmosphäre, Boden und Wasser (Schmigalla, 1995, S. 36). Die Fabrik ist dadurch ein Teil des ökologischen Systems bzw. ökologischer Systeme. Weiterhin wird sie von wirtschaftlichen, sozio-kulturellen, politischen, rechtlichen und technischen Umfeldern (künstliche Umwelt) umgeben, mit denen vielfältige Beziehungen bestehen (Dyckhoff, 2006, S. 5).

Um ein einheitliches Begriffsverständnis aufzubauen und Betrachtungen nach Top-down- oder auch Bottom-up-Prinzipien durchführen zu können, wird in der Fabrikplanung auf die hierarchische Ordnung bzw. Gliederung der Fabrik zurückgegriffen. Damit wird die Fabrik zunächst in das übergeordnete Netzwerk (z. B. Unternehmensverbände) eingeordnet und dann in ihre prinzipiellen, hierarchisch gegliederten Bestandteile zerlegt. Hierfür werden in der Regel fünf (teilweise auch sechs oder mehr Ebenen) definiert (u. a. Schenk, Wirth & Müller, 2014, S. 136-137; Schmigalla, 1995, S. 37; VDI, 2011, S. 7; Wiendahl, Reichardt & Nyhuis, 2009, S. 131, 134):

- Ebene 5: Netz, Netzwerk, Produktions-, Wertschöpfungsnetzwerk
- Ebene 4: Fabrik, Produktionsstandort, Werk
- Ebene 3: Fabrikgebäude, Gebäude
- Ebene 2: Abschnitt, Abteilung, Bereich, Gruppe, Segment, Zelle
- Ebene 1: Arbeitsplatz, Arbeitsstation, Maschine.

Die Einordnung der Subsysteme in die Hierarchieebenen erfolgt nach organisatorischen (z. B. Zuständigkeiten), wirtschaftlichen (z. B. Kostenverantwortung) oder technischen (z. B. Funktionen/Prozesse) Aspekten. Weiterhin sind die Subsysteme einer Ebene dadurch gekennzeichnet, dass sie gewisse Autonomie aufweisen und dass sie jeweils gemeinsam genutzte Elemente besitzen, wie z. B. Transport- und Speicherelemente bzw. Schnittstellen für die Ein- und Ausgaben nach außen.

3.3 Funktionales Fabriksystemkonzept

Im funktionalen Konzept wird das System als „Black Box“ mit seinen Eingaben, Ausgaben und Zuständen aufgefasst, wobei der innere Aufbau des betrachteten Objektes nicht von Bedeutung ist, sondern nur dessen Verhalten bzw. Funktion innerhalb seiner Umgebung (Ropohl, 2009, S. 75-76). Dadurch werden die Wirkungen auf das Fabriksystems von seiner Umwelt sowie umgekehrt die Auswirkungen auf die Umwelt deutlich. Außerdem können damit die grundsätzlichen Funktionen der Fabriksubsysteme dargestellt werden.

Wie bereits beschrieben, ist das Fabriksystem in der obersten Hierarchieebene umgeben von natürlicher und künstlicher Umwelt. Das bedeutet, dass das Fabriksystem auf der einen Seite von der Umwelt beeinflusst wird, aber auch auf der anderen Seite Einfluss auf die umgebende Umwelt auswirkt. Die Auswirkungen auf die natürliche Umwelt werden durch Umweltbeeinflussungen, wie die Entnahme und Zufuhr von Stoffen und Energien aus bzw. in die Umwelt sowie die Inanspruchnahme von Boden und Landschaft, deutlich (Löffler, 2003, S. 6).

Das Fabriksystem übernimmt innerhalb der übergeordneten Systeme die grundsätzliche Funktion der Herstellung von Erzeugnissen als Ausgaben (Fabrik als Erzeuger), wofür Eingaben ge- und verbraucht werden (Fabrik als Verbraucher). Nach der systemtheoretischen Betrachtung nimmt das Fabriksystem Stoffe, Energien und Informationen auf, wandelt, transportiert und speichert diese und gibt sie in veränderter verwertbarer und nicht verwertbarer Form wieder an die Umgebung ab, wobei sich der Zustand des Systems ändert (Ropohl, 2009, S. 120). Auf dieser Grundlage wird in Abbildung 1 ein allgemeines Funktionsmodell dargestellt.

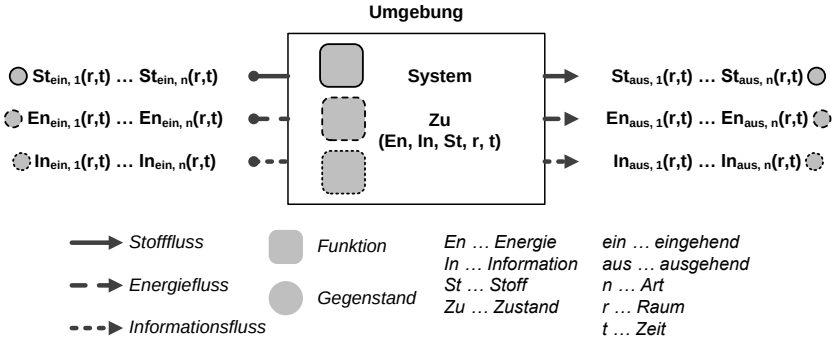


Abbildung 1: Funktionsmodell eines Systems

Demnach ist das System in ein oder mehrere Flüsse eingebunden und ver-/gebraucht bzw. erzeugt verschiedene Stoffe (St), Energien (En) und Informationen (In), die auf eine definierte Zeit (t) und einen definierten Raum (r) bezogen sind, und führt dadurch eine oder mehrere Funktionen aus. Mit den gleichen Attributen wird auch der Zustand (Zu) des Systems beschrieben. Die Stoff-, Energie- und Informationsflüsse sind weiter unterteilbar (1 … n), so dass bspw. neben dem Produkt- auch die Medienflüsse für Wasser, Druckluft etc. (alle Teil des Stoffflusses) abgebildet werden. Mit diesem Modell kann jedes System der Fabrik hinsichtlich seines funktionalen Zusammenhanges mit notwendigen Eingaben, erbringbaren Ausgaben und dazugehörigen Zuständen sowie dessen Anbindung in die Fabrikflusssysteme dargestellt werden.

3.4 Strukturales Fabriksystemkonzept

Durch das strukturale Systemkonzept wird das System als Ganzheit von Elementen und deren Beziehungen beschrieben, also die innere Struktur des Systems abgebildet (Ropohl2009, S. 75). Durch diesen Ansatz wird das Fabriksystem zum einen strukturell in übergeordnete Systeme eingebunden und zum anderen in seine Bestandteile aufgelöst und deren Beziehungen zueinander verdeutlicht. Das bedeutet, dass für dieses Fabriksystemkonzept sowohl die Subsysteme bzw. Elemente als auch die Relationen dazwischen jeweils in ihrer Art und Anzahl bestimmt werden müssen.

Der grundsätzliche strukturelle Aufbau der übergeordneten Unternehmensverbände, in denen das Fabriksystem eingegliedert wird, ist in Form von Ketten, Kreisläufen oder Netzwerken darstellbar. Kettenform bedeutet, dass das Fabriksystem ein Teil einer (Wandlungs-) Kette ist und damit von vor- und nachgelagerten Stationen, umgeben ist. Von Kreisläufen wird gesprochen, wenn in den Ketten Rückführungen eingebaut sind. Das heißt, dass das betrachtete Gut vollständig oder teilweise bzw. in veränderter Form in bereits durchlaufene Stationen zurückgeführt wird, um eine erneute Transformation daran durchzuführen. In Netzwerken ist die Anzahl der Stationen meist höher und es bestehen vor allem multidirektionale Beziehungen zwischen den Netzwerkelementen.

Die Funktionen des Fabriksystems innerhalb dieser Verbände sind durch oftmals große räumliche Verteilungen (z. B. Entfernungen zwischen Standorten oder Lieferanten und Kunden), aber auch durch vergleichsweise kurze Ausführungszeiten geprägt. Jedoch sind dabei auch Differenzierungen in Abhängigkeit der jeweiligen Güter vorzunehmen: Stoffe können gut über weite Strecken transportiert werden, wohingegen der Transport und die Speicherung von Energien aufgrund von Übertragungsverlusten und Speichermöglichkeiten eher lokal und zeitlich begrenzt ist.

Zur Strukturierung des Fabriksystems und der damit verbundenen Subsysteme bzw. Elemente werden nachfolgend verschiedene Modellierungsmöglichkeiten erläutert, mit denen das Fabriksystem hinsichtlich seiner hierarchischen, funktionalen, räumlichen und zeitlichen Strukturen beschrieben wird.

Hierarchische Fabriksystemstruktur

Die hierarchischen Strukturen des Fabriksystems ergeben sich aus dem hierarchischen Fabriksystemkonzept, so dass eine Strukturierung in Subsysteme und Elemente vorgenommen wird.

Funktionale Fabriksystemstruktur

Damit in Verbindung stehend und aufbauend auf dem funktionalen Fabriksystemkonzept werden die funktionalen Fabriksystemstrukturen

entwickelt. Hierdurch wird das Fabriksystem in einzelne Funktionsbereiche zerlegt und die Beziehungen zwischen diesen Bereichen bzw. Systemen beschrieben.

Eine verallgemeinerte, funktionsorientierte Gliederung teilt das Fabriksystem zunächst in ein (technisches) Produktionssystem und in ein Gebäudesystem. Zum Produktionssystem werden u. a. Fertigungs-, Montage- und Logistiksysteme und zum Gebäudesystem Innenausbau, Hülle und Tragwerk zugeordnet; dazwischen wird die technische Gebäudeausrüstung eingeordnet, die Prozesstechnik auf Seite des Produktionssystems und Haustechnik auf Seite des Gebäudesystems beinhaltet (Hildebrand, Mäding & Günther, 2005, S. 12-13; Schenk, Wirth & Müller, 2014, S. 140-141). In ähnlicher Weise kann das Fabriksystem auch in technologische und bauliche Systeme sowie in Systeme der Ver- und Entsorgung unterteilt werden (Helbing, 2010, S. 60-62). Zu Letzteren gehören alle Systeme der stofflichen, energetischen und informationellen Ver- und Entsorgung, so dass die technische Gebäudeausrüstung darin inbegriffen ist. Oftmals werden diese Begriffe auch als Synonym verwendet. Diese Dreiteilung des Fabriksystems in die Hauptbestandteile Produktionssystem, Gebäudesystem sowie Ver- und Entsorgungssystem ist für die Betrachtung von Energie- und Ressourceneffizienz von besonderer Bedeutung, da hiermit die grundsätzlichen Zusammenhänge – das sind vor allem die Austauschbeziehungen von Stoffen und Energien – zwischen diesen Bereichen verdeutlicht werden können (siehe Abschnitt 3.5).

Zur weiteren Spezifizierung der funktionalen Strukturen wird auf die Flusssystemtheorie zurückgegriffen, die zur Beschreibung technischer Systeme und Prozesse dient und womit das Fabriksystem mit seinen Flusssystemen bestehend aus Elementen, Gegenständen, Funktionen und Strukturen abgebildet werden kann (Schenk, Wirth & Müller, 2014, S. 124-138; Wirth, 1989, S. 26-35). Die Untersetzung dieses Ansatzes zur Abbildung der Energieflusssysteme einer Fabrik ist in (Hopf & Müller, 2013) beschrieben.

Räumliche Fabriksystemstruktur

Anhand der räumlichen Fabriksystemstrukturen werden die Fabriksubsysteme bzw. -elemente im Raum angeordnet und durch Wege, Leitungen etc. miteinander verbunden. Hierfür werden in der Fabrikplanung verschiedene Strukturierungsverfahren eingesetzt, die vor allem auf die logistische Optimierung des Material-/Produktflusses abzielen. Daneben ist es in diesem Zusammenhang sinnvoll, auch die räumlichen Strukturen unter energetischen Aspekten zu betrachten. Dies ist vor allem darin begründet, dass die Übertragungsverluste durch kurze Wege bzw. Leitungen reduziert werden und dass es derzeit nur eingeschränkte Möglichkeiten zur lokalen Energiespeicherung gibt. Vor diesem Hintergrund sollte geprüft werden, inwiefern Energieerzeuger/-quellen (z. B. Abwärme) und Energieverbraucher/-senken sowie Systeme mit gleichen Anforderungen (z. B. hohe oder niedriger Raumtemperaturen) räumlich zusammengelegt werden können.

Zeitliche Fabriksystemstruktur

Die zeitlichen Fabriksystemstrukturen beschreiben die zeitbezogene, ablauforientierte Verknüpfung der Fabriksubsysteme bzw. -elemente. Die zeitlichen Abläufe in Fabriksystemen werden üblicherweise als Prozesse bzw. Prozessketten modelliert. Im Allgemeinen überführen Prozesse eine Eingabe von einer Quelle in eine geänderte Ausgabe zu einer Senke unter Nutzung von Ressourcen. Der Ressourcenbedarf eines Prozesses wird durch den Einsatz der Betriebsmittel bestimmt. Die Betriebsmittel benötigen zur Funktionserfüllung Stoffe und Energien. Eine Zuordnung des Ressourcenbedarfes zum Betriebsmittel kann vereinfacht als Attribut erfolgen. Jedoch ist dieser Ressourcenbedarf von dem Zusammenwirken des bearbeiteten Gegenstandes, der jeweiligen Funktion und deren Ausführung sowie der Verkettung des Prozesses mit anderen Prozessen abhängig.

Daneben sind weitere Modellierungsansätze anwendbar, mit denen Abläufe in ähnlicher Weise beschrieben werden. Dazu gehören vor allem

Ablaufschemas oder Flussdiagramme. Gerade für die Betrachtung von energie- und ressourcenbezogenen Transformationsprozessen werden häufig Stoffstromanalysen verwendet, die die stofflichen und energetischen Ein- und Ausgaben mengenmäßig für definierte Zeiträume gegenüberstellen. Diese Darstellungen eignen sich daher vor allem für Bilanzierungszwecke.

3.5 Vereinfachtes Gesamtmodell

Anhand der erarbeiteten Systemkonzepte ist es nun möglich, eine Fabrik in Form von Systemmodellen mit den verschiedenen Aspekten abzubilden, d. h., Partialmodelle des Fabriksystems zu erstellen. Wie bereits erwähnt, liegt ein vollständiges Systemmodell vor, wenn das hierarchische, das funktionale und das strukturale Systemkonzept modelliert sind. Da die Fabrik ein sehr komplexes System darstellt, sind jedoch entsprechend den Anforderungen der jeweiligen Planungsaufgabe auch nur Teilaspekte notwendig bzw. überhaupt abbildbar.

Die bereichsübergreifende Beschreibung des Fabriksystems ist für die Betrachtung von Energie- und Ressourceneffizienz von besonderer Bedeutung, da hiermit die grundlegenden Bestandteile der Fabrik und ihr Zusammenwirken verdeutlicht werden können. Daher werden die wesentlichsten Eigenschaften, die sich aus den drei Systemkonzepten ergeben und relevant für Energie- und Ressourceneffizienz sind, in einem vereinfachten Gesamtmodell zusammengefasst (Abbildung 2).

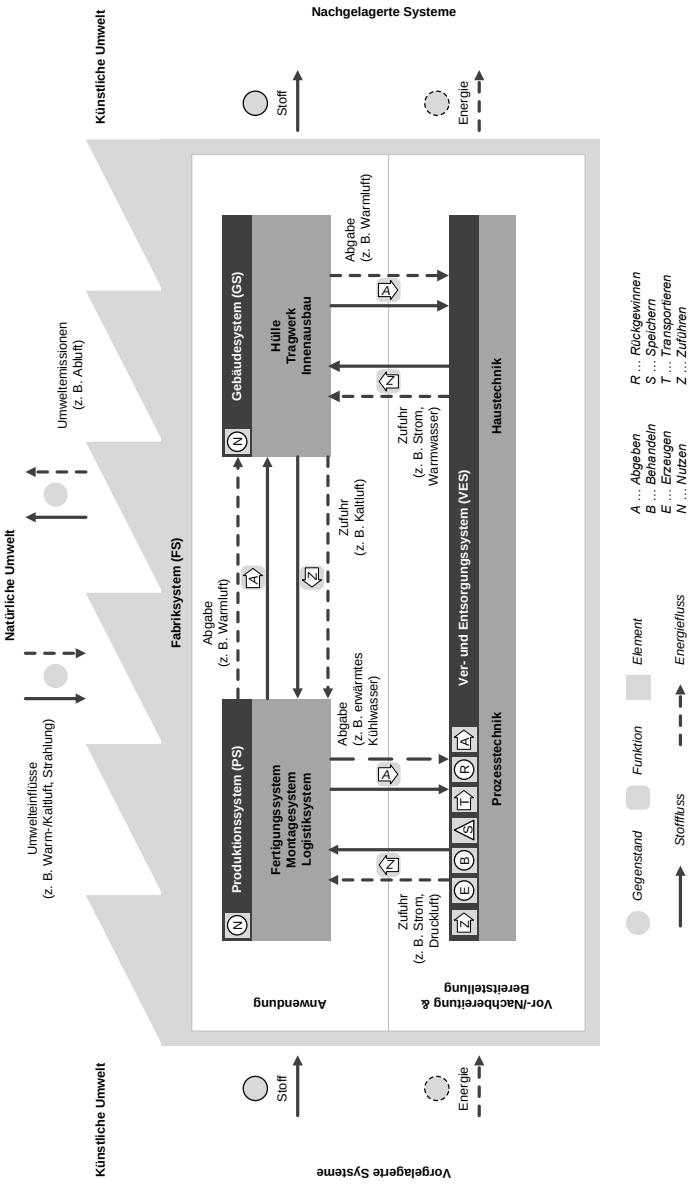


Abbildung 2: Vereinfachtes Gesamtmodell

Das Gesamtmodell ist hierarchisch auf das Fabriksystem, eingebettet in die natürliche und künstliche Umwelt, und seine Subsysteme ausgerichtet. Die funktionalen Zusammenhänge der Systeme umfassen die Behandlung von Stoffen und Energien. Das Fabriksystem wird funktional nach Produktionssystem, Gebäudesystem sowie Ver- und Entsorgungssystem einschließlich der darin befindlichen Subsysteme strukturiert.

Neben diesem Systemaufbau liegt der Fokus auf den Wirkbeziehungen, die sich aus der Vernetzung in den Stoff- und Energieflüssen ergeben. Jedes System benötigt grundsätzlich Energie, um seine Funktion erfüllen zu können, so dass das System immer Teil des Energieflusses ist. Es kann aber weiterhin aufgrund seiner Funktion, z. B. Produktbearbeitung, zu anderen Flüssen, z. B. Stoff-/Produktfluss, gehören. Dann ist das System auf der einen Seite Erzeuger im Stofffluss und auf der anderen Seite Nutzer (als Verbraucher) im Energiefluss. Im Gesamtmodell wird die Hauptfunktion eines Systems durch das jeweilige Symbol veranschaulicht.

Das Fabriksystem nimmt aus seiner Umwelt, bspw. durch Lieferanten oder Versorgungsnetze, Stoffe und Energien auf und gibt sie wieder in veränderter Form, z. B. als Produkte, Abprodukte und Emissionen, ab. Dies wird durch das Ver- und Entsorgungssystem (VES) gewährleistet. Innerhalb dieses Systems werden die Stoffe und Energien aufgearbeitet, gespeichert und für die weitere Nutzung zur Verfügung gestellt. Das Gebäudesystem (GS) benötigt bspw. Wasser, Warmwasser und elektrischen Strom, um den Gebäudebetrieb aufrechtzuerhalten. Das Produktionssystem (PS) verarbeitet grundsätzlich verschiedene Stoffe, um daraus Produkte herzustellen, wofür es wiederum Stoffe und Energien ge- und verbraucht. Aus den GS und PS werden durch das VES die nicht mehr benötigten Stoffe und Energien (z. B. Abfälle, Abwasser, Abwärme) abgeführt, nachbereitet und entsorgt.

3.6 Vorgehen und Beispielhafte Umsetzung

Die Anwendung des Modellierungsansatzes erfolgt prinzipiell in vier wesentlichen Schritten, die entsprechend des Planungsfortschrittes und der notwendigen und möglichen Detaillierung nacheinander, aber auch iterativ durchlaufen werden.

Zunächst wird das Fabriksystem rein qualitativ mit seiner Hierarchie, Funktion und Struktur abgebildet. Hierbei bietet es sich an, die Modellierung nach dem Top-down-Prinzip durchzuführen und das Fabriksystem nach seiner Hierarchie und Struktur immer weiter zu verfeinern. Dazu ist für jedes System das funktionale Modell zu bilden, aus dem sich in der strukturalen Verbindung die Flusssysteme ergeben. Folglich sind an dieser Stelle der Aufbau und die grundsätzliche Verknüpfung der Systeme dargestellt.

Auf Basis dieser qualitativen Beschreibung wird im zweiten Schritt das Fabriksystem mit quantitativen Aspekten versehen. Dies geschieht in Form von benötigten oder erbringbaren Leistungen (z. B. elektrische Leistung pro Betriebszustand) oder Mengen (z. B. Energieverbrauch pro Zeiteinheit), die jedem System zugeordnet werden. Auch hier sollte wieder nach dem Top-down-Prinzip vorgegangen werden. Dieser Schritt wird grundlegend von den vorhandenen Daten beeinflusst, denn oftmals fehlen bspw. Angaben oder Messwerte zu Leistungsbedarfen oder Energieverbräuchen. Daher ist der vorhergehende Schritt von besonderer Bedeutung, weil damit bereits erste Indikatoren zur Beeinflussung der Energie- und Ressourceneffizienz identifiziert werden können ohne quantitative Daten verwenden zu müssen. Sind entsprechende Daten und Informationen vorhanden, so können an dieser Stelle die Gesamtleistungen und -mengen ermittelt und bzgl. Erzeugung und Verbrauch gegenübergestellt werden.

Im nächsten Schritt erfolgt eine Bewertung der entwickelten Lösung für das Fabriksystem. Hierfür werden Kennzahlen verwendet, die die absoluten und relativen Energie- und Ressourcengrößen des Fabriksystems und der Subsysteme wiedergeben.

Im letzten Schritt werden schließlich Gestaltungsansätze abgeleitet, die die Energie- und Ressourceneffizienz positiv beeinflussen. Dies erfolgt iterativ mit den vorangegangenen Schritten.

In Abbildung 3 wird ein Auszug eines beispielhaften Fabriksystems dargestellt. Das System ist als Simulationsmodell nachgebildet. Aufgrund der Übersichtlichkeit wird nur das Produktionssystem sowie das Ver- und Entsorgungssystem betrachtet.

Die Modellierung erfolgt nach dem beschriebenen Vorgehen. Zuerst wird das Fabriksystem hierarchisch in PS und VES eingeteilt, die dazu gehörigen Subsysteme eingefügt, die Systemtypen (z. B. Erzeugungssystem) nach ihrer Funktion festgelegt und die Vernetzung in den Flusssystemen vorgenommen. Dies erfolgt mit Hilfe eines entwickelten Simulationsbausteins, der ein System mit seiner funktionalen Einbindung in die verschiedenen Stoff- und Energieflüsse widerspiegelt (vgl. Abbildung 1). Damit sind der strukturale Aufbau und die funktionale Verknüpfung beschrieben.

Nachfolgend werden die Leistungsaufnahmen und -abgaben für jeden Zustand, den das System einnehmen kann, hinzugefügt. Da es sich hierbei um eine ereignisgesteuerte Ablaufsimulation handelt, müssen keine Verbräuche eingegeben werden. Daran wird auch der entscheidende Vorteil einer derartigen Simulation deutlich: In Abhängigkeit des Systemaufbaus und der Nutzung (z. B. durch die Produktionssteuerung) ergeben sich aus den dynamischen, ereignisabhängigen Zusammenhängen die eingesetzten Mengen an Stoffen und Energien.

Im nächsten Schritt wird das Fabriksystem nach den Simulationsläufen anhand seiner abgerufenen Leistungen und Verbräuche (z. B. absolut und spezifisch pro Ausbringungsmenge oder Fläche) bewertet.

Schließlich erfolgt eine iterative Optimierung, in der bspw. Systeme mit einer hohen Leistungsaufnahme ausgetauscht oder die Nutzungszeiten (z. B. anhand des Schichtkalenders) überarbeitet werden (siehe Kapitel 4).

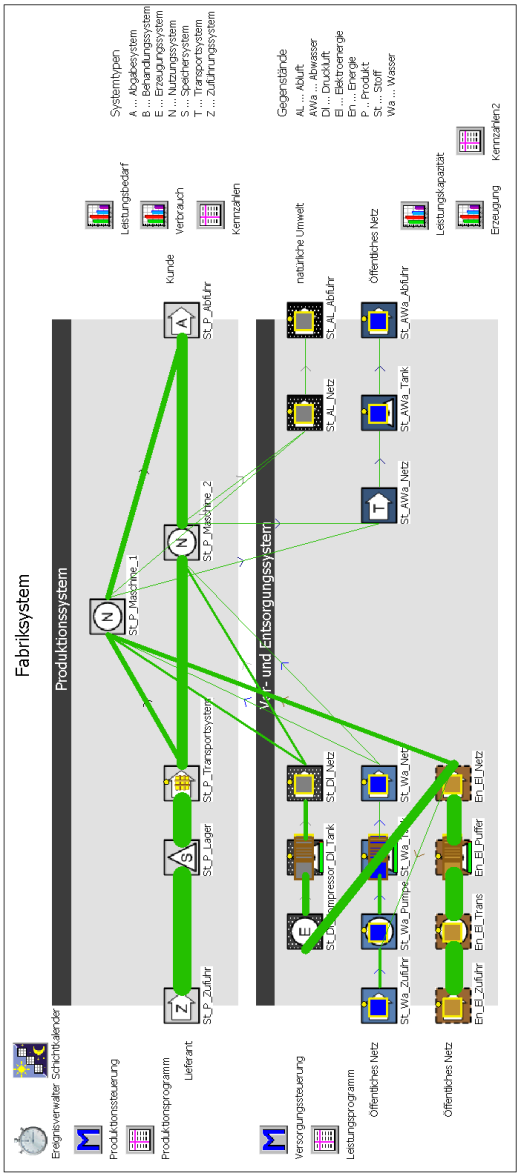


Abbildung 3: Simulationsmodell eines Fabriksystems (Beispiel)

4 Ableitung von Gestaltungsansätzen

Mit Hilfe des beschriebenen Modellierungsansatzes werden der grundsätzliche Aufbau des Fabriksystems, die verschiedenen Funktionsbereiche und die wesentlichen Wirkzusammenhänge zwischen den Systemen dargestellt. Wird dieser Modellansatz für eine reale oder geplante Fabrik instanziiert, können daran grundlegende Handlungs- bzw. Gestaltungsansätze in Hinblick auf Energie- und Ressourceneffizienz abgeleitet werden, wie bspw.

- der Abgleich von installierter Kapazität im VES und des Bedarfes in PS und GS,
- die Substitution von Stoffen und Energien,
- die Raum-/Flächenoptimierung,
- die Weg-/Leitungsminimierung,
- die Auslegung zentraler und dezentraler VES sowie
- der Entwurf von Stoff- und Energiekreisläufen.

In der Praxis wird in Planungsprojekten oftmals zuerst oder nur das PS näher betrachtet. Bei Produktänderungen werden bspw. Anpassungen an Maschinen und Prozessen des PS vorgenommen, wobei jedoch die Anlagen des VES unberücksichtigt bleiben, so dass Über- und Unterdimensionierungen sowie die damit verbundenen Verluste die Folge sein können (z. B. überdimensionierter Druckluftkompressor). Für genau diesen Fall dient das Fabriksystemmodell als Kommunikationsmittel zwischen den beteiligten Fabrik- und Fachplanern, denn die Abstimmung zwischen den Planungsbeteiligten stellt eine große Herausforderung, aber auch ein enormes Potenzial für die Gestaltung energie- und ressourceneffizienter Fabriken dar.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Betrachtung der eingesetzten Stoffe und Energien. So ist bspw. zu hinterfragen, ob energieintensive Medien oder nicht wiederverwertbare Materialien durch Alternativen ersetzt werden

können. Hierfür können die Ein- und Ausgaben der Systeme aus dem Modell herangezogen werden.

Durch die Raum- bzw. Flächenoptimierung, bspw. durch Minimierung der benötigten Räume und Flächen oder Zonierung von Systemen mit gleichen Anforderungen (z. B. an das Raumklima), können vor allem die installierten Leistungen und die Verluste der Haustechnik gering gehalten werden. An dieser Stelle und im Folgenden wird der Bezug des Modells zum räumlichen Layout besonders deutlich, welcher mit reinen Prozessmodellen nicht in der Form abbildbar wäre.

In diesem Zusammenhang können weiterhin Übertragungsverluste (z. B. Druck- oder Wärmeverluste) durch minimale Wege bzw. Leitungen reduziert werden. Es ist auch zu prüfen, ob das VES zentral (z. B. Druckluftnetz mit geringem Druck) oder dezentral (z. B. Kompressor für hohen Druck an Maschine) bzw. in Mischform ausgelegt werden kann.

Schließlich werden diese Ansätze für den Entwurf von Stoff- und Energiekreisläufen in der Fabrik zusammengeführt. Das bedeutet, dass die eingehenden Stoffe und Energien in den Flüssen so miteinander verbunden werden, dass der Großteil dieser Eingaben verwertet bzw. nur ein kleiner Teil nicht verwertbarer Ausgaben erzeugt wird. Dies wird vor allem durch die Kopplung von Erzeugung / Quellen und Verbrauch / Senken und der damit verbundenen Wieder- bzw. Weiterverwendung von Stoffen und Energien erreicht.

Zusammenfassend können diese Gestaltungsansätze bereits in frühe Planungsphasen integriert werden. Sie basieren im Grunde darauf, dass die Fabrik als Gesamtsystem vernetzter Subsysteme in Stoff- und Energieflüssen gesehen wird und dass hiermit ein gezielter Abgleich von Erzeugung und Bereitstellung sowie Nutzung bzw. Verbrauch anvisiert wird.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Fokussierung der Zielgrößen Energie- und Ressourceneffizienz im Fabrikplanungsprozess bietet weitreichendes Potenzial für die Gestaltung nachhaltiger Fabriken. Hierfür sind jedoch entsprechende Instrumente notwendig, um die Komplexität dieser Thematik gering zu halten und die Planungsbeteiligten bei ihren Aufgaben zu unterstützen. Dies kann mit Hilfe von Vorgehensmethoden, definierten Planungsinhalten und assistierenden Werkzeugen geschehen. In Ergänzung bieten sich Modelle an, die den Aufbau der Fabrik und die Abläufe, die darin stattfinden, wiedergeben, um damit Wirkbeziehungen zu beschreiben sowie Handlungs- bzw. Gestaltungsansätze abzuleiten.

Ein derartiger Modellierungsansatz wird in diesem Beitrag skizziert. Dazu wird die Fabrik als komplexes System betrachtet, welches sich aus mehreren Partialmodellen zusammensetzt. Mit diesen werden die hierarchischen, funktionalen und strukturalen Zusammenhänge des Fabriksystems abgebildet. Darauf aufbauend wird ein vereinfachtes Gesamtmodell erstellt, um die Vernetzung der Fabriksubsysteme in den Stoff- und Energiekreisläufen zu verdeutlichen. Ein Vorgehen und ein Beispiel zur Anwendung des Modellierungsansatzes werden näher erläutert. Schließlich werden grundlegende Gestaltungsansätze abgeleitet, mit denen bereits in frühen Planungsphasen Aspekte der Energie- und Ressourceneffizienz berücksichtigt werden können. Der Modellierungsansatz ist modular aufgebaut, so dass er entsprechend der Planungsaufgabe, der notwendigen und möglichen Detaillierung in verschiedener Art und Weise an den Fabrikplanungsprozess adaptiert werden kann.

Literatur

Bogdanski, G. et al. (2012). An Extended Energy Value Stream Approach Applied on the Electronics Industry. In: Emmanouilidis, C. / Taisch, M. / Kiritsis, D.: Advances in Production Management Systems: Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services (pp. 65-72). Berlin, Heidelberg: Springer.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2009a). DIN EN ISO 14001: Umweltmanagement: Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung (ISO 14001:2004 + Cor 1:2009); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14001:2004 + AC:2009. Berlin: Beuth.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2009b). DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement: Ökobilanz: Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006. Berlin: Beuth.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2011a). DIN EN ISO 14051: Umweltmanagement: Materialflusskostenrechnung: Allgemeine Rahmenbedingungen (ISO 14051:2011); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14051:2011. Berlin: Beuth.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2011b). DIN EN ISO 50001: Energiemanagementsysteme: Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung (ISO 50001:2011); Deutsche Fassung EN ISO 50001:2011. Berlin: Beuth.

Dombrowski, U. / Riechel, C. (2013). Sustainable factory profile: a concept to support the design of future sustainable industries. In: Seliger, G.: Proceedings of the 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing: Innovative Solutions (pp. 72-77). Berlin: Universitätsverlag TU Berlin.

Duflou, J. R. et al. (2012). Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology, 61(2), 587-609.

Dyckhoff, H. (2006). Produktionstheorie: Grundzüge industrieller Produktionswirtschaft. Berlin, Heidelberg: Springer.

Engelmann, J. (2009). Methoden und Werkzeuge zur Planung und Gestaltung energieeffizienter Fabriken. Dissertation, TU Chemnitz.

Erlach, K. / Westkämper, E. (2009). Energiewertstrom: Der Weg zur energieeffizienten Fabrik. Stuttgart: Fraunhofer.

Haag, H. (2013). Eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion. Stuttgart: Fraunhofer.

Haberfellner, R. et al. (2012). Systems Engineering: Grundlagen und Anwendung. Zürich: Orell Füssli.

Helbing, K. W. (2010). Handbuch Fabrikprojektierung. Berlin, Heidelberg: Springer.

Herrmann, C. et al. (2011). Energy oriented simulation of manufacturing systems: Concept and application. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology, 60 (1), 45-48.

Hesselbach, J. (2012). Energie- und klimaeffiziente Produktion: Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.

Hesselbach, J. et al (2008). Energy Efficiency through optimized coordination of production and technical building services. In: Conference Proceedings LCE2008: 15th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering (pp. 624-628). Sydney.

Hildebrand, T. / Mäding, K. / Günther, U. (2005). PLUG+PRODUCE: Gestaltungsstrategien für die wandlungsfähige Fabrik. Chemnitz: IBF, TU Chemnitz.

Hopf, H. / Müller, E. (2013). Beschreibung von Energieflusssystemen einer Fabrik auf Basis der Flusssystemtheorie. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 108 (9), 643-646.

Hopf, H. et al. (2013). Management von Energiedaten und -informationen im Energiekompetenzzentrum Logistik und Fabrikplanung. In: Müller, E.: Trends und Strategien für die Produktion von morgen: 10. Fachtagung Vernetzt planen und produzieren - VPP2013 (pp. 139-148). Chemnitz: Wissenschaftliche Schriftenreihe des IBF.

Junge, M. (2007). Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung. Dissertation, Universität Kassel.

Löffler, T. (2003). Integrierter Umweltschutz bei der Produktionsstättenplanung: Methode eines planungsintegrierten Umweltschutzes (PLUIS) und Branchenstudie zur spanenden Metallbearbeitung. Dissertation, TU Chemnitz.

Müller, E. et al. (2009). Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Berlin, Heidelberg: Springer.

Müller, E. et al. (2013). Enabling Energy Management for Planning Energy-Efficient Factories. In: Procedia CIRP, 7, 622-627.

Müller, F. et al. (2013). Green Factory Planning. In: Prabhu, V. / Taisch, M. / Kiritsis, D.: Advances in Production Management Systems: Sustainable Production and Service Supply Chains (pp. 167-174). Berlin, Heidelberg: Springer.

Neugebauer, R. (2013). Forschung für die Produktion in Deutschland: Maximale Wertschöpfung aus minimalen Ressourceneinsatz. In: Neugebauer, R.: Tagungsband 3. Kongress Ressourceneffiziente Produktion (pp. 3-16). Leipzig: Fraunhofer.

Neugebauer, R. (2014). Handbuch Ressourcenorientierte Produktion. München Wien Carl Hanser.

Reinhart, G. et al. (2011). Energiewertstromdesign: Ein wichtiger Bestandteil zum Erhöhen der Energieproduktivität. In: wt Werkstattstechnik online, 101, 253-260.

Ropohl, G. (2009). Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.

Schenk, M. / Wirth, S. / Müller, E. (2014). Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. Berlin, Heidelberg: Springer.

Schillig, R. / Stock, T. / Müller, E. (2013). Energiewertstromanalyse: Eine Methode zur Optimierung von Wertströmen in Bezug auf den Zeit- und den Energieeinsatz. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 108 (1-2), 20-26.

Schmigalla, H. (1995). Fabrikplanung: Begriffe und Zusammenhänge. München: Carl Hanser.

Stahl, B. et al. (2013). Combined Energy, Material and Building Simulation for Green Factory Planning. In: Nee, A. Y. C. / Song, B. / Ong, S.-K.: Re-engineering Manufacturing for Sustainability (pp. 493-498). Singapore: Springer.

Stoldt, J. et al. (2013). Generic Energy-Enhancement Module for Consumption Analysis of Manufacturing Processes in Discrete Event Simulation. In: Nee, A. Y. C. / Song, B. / Ong, S.-K.: Re-engineering Manufacturing for Sustainability (pp. 165-170). Singapore: Springer.

Thiede, S. (2012). Energy Efficiency in Manufacturing Systems. Berlin, Heidelberg: Springer.

Tschandl, M. / Posch, A. (2012). Integriertes Umweltcontrolling: Von der Stoffstromanalyse zum Bewertungs- und Informationssystem. Wiesbaden: Gabler.

VDI Verein Deutscher Ingenieure (2011). VDI-Richtlinie 5200 Blatt 1: Fabrikplanung: Planungsvorgehen. Berlin: Beuth.

VDI Verein Deutscher Ingenieure (2012). VDI-Richtlinie 4600: Kumulierter Energieaufwand (KEA): Begriffe, Berechnungsmethoden. Berlin: Beuth.

Verl, A. et al. (2011). Modular Modeling of Energy Consumption for Monitoring and Control. In: Hesselbach, J. / Herrmann, C.: Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing (pp. 341-34). Berlin, Heidelberg: Springer.

Weinert, N. (2010). Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme. Stuttgart: Fraunhofer.

Wiendahl, H.-P. / Reichardt, J. / Nyhuis, P. (2009). Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. München, Wien: Carl Hanser.

Wirth, S. (1989). Flexible Fertigungssysteme: Gestaltung und Anwendung in der Teilefertigung. Berlin: VEB Verlag Technik.

Wirth, S. / Schenk, M. / Müller, E. (2011). Fabrikarten, Fabriktypen und ihre Entwicklungsetappen. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 106 (11), 799-802.

Wolf, D. / Kulus, D. / Dreher, S. (2012). Simulating Energy Consumption in Automotive Industries. In: Bangsow, S.: Use Cases of Discrete Event Simulation: Appliance and Research (pp. 59-86). Berlin, Heidelberg: Springer.

Die Bedeutung von Industrie 4.0 als Enabler für logistische Modelle

Vorteile von Industrie 4.0 durch die Verbesserung von Entscheidungs-unterstützungen auf Grundlage logistischer Modelle

Peter Nyhuis, Jonas Mayer, Thorben Kuprat

1 Die Vision der Industrie 4.0 und ihre Merkmale

Spätestens seit der Aufnahme in die „Hightech-Strategien“ der Bundesregierung zur Wahrung und zum Ausbau der führenden Position des Produktionsstandortes Deutschland hat Industrie 4.0 Einzug in Industrie und Forschung erhalten. Im Mittelpunkt der Industrie 4.0 steht insbesondere die echtzeitfähige, intelligente, horizontale und vertikale Vernetzung von Menschen, Maschinen, Objekten sowie von Informations- und Kommunikationstechnik-Systemen in Produktionsumgebungen (Bauer et al., 2014). Als zentrale Vision der Industrie 4.0 ist ein sich selbst organisierendes Netzwerk von Arbeits-, Transport- und Lagersystemen zu nennen (Russwurm, 2013). Wesentliche Handlungsfelder der Industrie 4.0 stellen dabei die Smart Factory, cyber-physische Systeme (CPS), cyber-physische Produktionssysteme (CPPS), das Internet der Dinge, Big Data-Analysen sowie hochauflösende Sensortechniken dar. In diesem Zusammenhang repräsentieren cyber-physische Systeme um Sensoren und eingebettete Systeme erweiterte physikalische Systeme innerhalb der Produktion. In einem Verbund bilden mehrere CPS ein CPPS. Mithilfe von Sensoren werden CPS in die Lage versetzt, unmittelbar Daten zu erfassen, erfasste Daten zu verarbeiten und auszuwerten, durch Aktoren auf Veränderungen zu reagieren sowie über digitale Kommunikationseinrichtungen mit weiteren cyber-physischen Systemen zu interagieren (acatech, 2011). In Echtzeit erfolgt ein eigenständiger und wechselseitiger Datenaustausch zwischen diesen Systemen, der eine gegenseitige Steuerung der Systeme innerhalb eines CPPS ermöglicht. Auf Basis dieser hochauflösenden Daten wird die

Transparenz innerhalb der Produktion erhöht (Russwurm, 2013). Auswerteroutinen und Algorithmen als Bestandteil von Big Data-Analysen dienen cyber-physischen Systemen der Extraktion von Erkenntnissen aus großen Datenmengen. Merkmale dieser Analysen sind das Vorhandensein großer Datenvolumina, in Echtzeit generierte Daten und eine hohe Datenvarietät (McAfee & Brynjolfsson, 2012).

Cyber-physische Systeme in Kombination mit einer anforderungsgerechten Sensortechnik und Big Data-Analysen stellen einen zukunftsträchtigen Ansatz dar, um die für eine zuverlässige Durchführung der Produktionsplanung und -steuerung benötigten Daten echtzeitnah sowie in der erforderlichen Qualität und Auflösung bereitzustellen (Schuh et al., 2013b). Durch eine Verknüpfung einzelner CPS innerhalb einer Produktion ist ein cyber-physisches Produktionssystem aufbaubar (Reinhart, 2013). Resultat der aufgezeigten Entwicklungsrichtungen ist die Vision der „smart factory“, die durch einen Verbund von CPS gekennzeichnet ist und somit ein echtzeitfähiges und hochflexibles Produktionssystem realisiert (Geisberger & Broy, 2012).

2 Datensituation in heutigen Produktionssystemen

Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung benötigen eine vollständige und konsistente Datenbasis bestehend aus Stamm- und Bewegungsdaten, um valide Planungsergebnisse generieren sowie sinnvolle Steuerungsentscheidungen treffen zu können. Steuerungsentscheidungen in der Produktion bedingen darüber hinaus echtzeitbasierte Daten und Datenanalysen. Trotz der Existenz zahlreicher IT-basierter Unterstützungssysteme zur Datenerfassung und -auswertung in der Produktion entsprechen die Datenqualität (z.B. in Bezug auf Datenaktualität, -auflösung, -konsistenz) nicht den Anforderungen der Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung. Ein wesentlicher Grund für dieses Defizit liegt in der mangelnden Integration der verschiedenen IT-Unterstützungssysteme. Eine mangelnde Integration der Systeme führt dazu, dass für die Auftragsabwicklung benötigte Daten nicht in allen

Unternehmensbereichen zur benötigten Zeit und in ausreichender Qualität verfügbar sind (Hering, Meißner & Reschke, 2013). Weiterhin erfolgen Rückmeldungen von Produktionsdaten in KMU in 57 % und in Großunternehmen in 39 % der Fälle in schriftlicher und damit nicht digitalisierter Form. Als Folge sind Rückmeldungen von Produktionsdaten in Echtzeit in vielen heutigen Produktionssystemen noch nicht realisierbar (Schuh et al., 2013b). Ebendiese echtzeitbasierten Daten sind jedoch notwendig, um auf unvorhersehbare Ereignisse oder Störungen innerhalb der Produktion angemessen reagieren zu können und eine echtzeitfähige Produktionssteuerung zu realisieren (Ostgathe, 2012).

Ein weiteres Defizit heutiger Datenrückmeldungen liegt in nicht anforderungsgerechten Positionierungen der Rückmeldepunkte innerhalb von Produktionssystemen (Ostgathe, 2012). Mangelnde Visualisierungen der Daten spiegeln sich in einer geringen Akzeptanz und Nutzung der Daten durch die zuständigen Mitarbeiter wider (Hering, Meißner & Reschke, 2013). Fehlerhafte Rückmeldungen führen weiterhin zu diversen Inkonsistenzen in den Daten. Exemplarisch seien fehlerhafte Aggregationen der Daten, ungenaue manuelle Rückmeldungen, fehlende Informationen über die belegten Arbeitssysteme, fehlende Start- oder Endtermine von Prozessschritten sowie zeitliche Überschneidungen zwischen Arbeitsschritten genannt (Schuh et al., 2011; Nyhuis & Wiendahl, 2012; Schuh et al., 2013a).

Resultat der beschriebenen Defizite sind Rückmeldedaten, die nicht in Echtzeit, in geringer Auflösung und dementsprechend in nicht ausreichender Qualität bereitgestellt werden. Als Folge werden im Rahmen der Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung Daten über Mittelwerte aggregiert oder über Schätzwerte erweitert (Hering, Meißner & Reschke, 2013). Eine echtzeitfähige Abbildung von Produktionssystemen ist somit nicht möglich, wodurch Planungen und Entscheidungen innerhalb der Produktionsplanung und -steuerung nicht optimal durchgeführt werden können.

Im Rahmen der Entwicklungen von Industrie 4.0 werden mittels neuartiger Sensoren die echtzeitnahe Generierung hochauflösender Produktionsrückmeldedaten durch CPS realisierbar, wodurch ein Anstieg der Datenquantität als auch der Datenqualität zu vermuten ist (Schuh et al., 2013b). Des Weiteren ist anzunehmen, dass sich auch die Datenauflösung durch die Implementierung von CPS in Produktionssystemen erhöhen wird (Schuh et al., 2011). Folgerichtig ist durch die Entwicklung von CPS und ihrer Integration in Produktionssystemen eine Verbesserung hinsichtlich der Verfügbarkeit von Stamm- und Bewegungsdaten erzielbar. Als Resultat dieser Entwicklung ist ein echtzeitfähiges Abbild der Produktion generierbar.

3 Entwicklung logistischer Modelle

Die Abbildung produktionslogistischer Zusammenhänge ist für die Erfüllung von Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung unabdingbar. Speziell vor dem Hintergrund einer wachsenden Bedeutung logistischer Zielgrößen bilden logistische Modelle grundlegende Werkzeuge, die logistische Leistungsfähigkeit von Unternehmen zu analysieren, zu verbessern sowie produktionslogistische Zusammenhänge abzubilden.

Die Nutzung logistischer Modelle zeichnet sich durch eine hohe Transparenz in Bezug auf die produktionslogistischen Zusammenhänge der dargestellten Daten aus. Eine erleichterte Ableitbarkeit von Ursache-Wirkzusammenhängen innerhalb der betrachteten Prozesse wird somit gewährleistet. Zudem sind logistische Modelle sowohl struktur- als auch zeitunabhängig einsetzbar. Die situationsabhängige Anpassung erfolgt lediglich über die Inputdaten, ein großer Erstellungsaufwand beim Einsatz in neuen Produktionsumgebungen ist vermeidbar. Grundvoraussetzung für die Anwendbarkeit logistischer Modelle und ihrer Verbreitung in der Industrie sind produktionsbezogene Rückmeldedaten in ausreichender Aktualität, Menge und Qualität. Folgerichtig liefern die beschriebenen Forschungsrichtungen im Rahmen von Industrie 4.0 einen wesentlichen Beitrag für eine Ausweitung der Anwendungsmöglichkeiten dieser Modelle.

Am Institut für Fabrikanlagen und Logistik der Leibniz Universität Hannover sind in den vergangenen Jahrzehnten Beschreibungs-, Wirk- und Entscheidungsmodelle produktionslogistischer Systeme mit dem Ziel einer ganzheitlichen Analyse des Produktionsprozesses und der Entwicklung einer Theorie der Logistik entwickelt worden. Basis für die Modellentwicklungen ist das Trichtermodell nach Bechte (Bechte, 1980). Lieferketten jeglicher Struktur sind durch die Prozesselemente Lager, Transport, Fertigung und Montage modellierbar. Im Folgenden wird der Modellbegriff in Bezug auf die Produktionslogistik näher erläutert sowie existierende Beschreibungs- und Wirkmodelle für Lager-, Fertigungs- und Montageprozesse beschrieben.

3.1 Der Modellbegriff

Im Allgemeinen stellt ein Modell ein Abbild der Realität dar. Neben der abbildenden Funktion muss ein Modell es dem Anwender zusätzlich ermöglichen, Probleme im beschriebenen Prozess aufzudecken und Informationen für die Ableitung von Handlungsmaßnahmen zu extrahieren (Nyhuis & Wiendahl, 2012). Stachowiak weist einem Modell drei wesentliche Hauptmerkmale zu. Dies ist zum einen das Abbildungsmerkmal. Dieses Merkmal stellt die bereits erwähnte Abbildung der Realität dar. Zum anderen wird ein Modell durch das Verkürzungsmerkmal charakterisiert. Ein Modell stellt nur die relevanten Ausschnitte der Realität dar und vernachlässigt nicht relevante Aspekte. Das dritte Merkmal ist das sogenannte pragmatische Merkmal und beschreibt den Personen-, Zeit- und Zweckbezug eines Modells (Stachowiak, 1973).

Um die ganzheitliche Beschreibung einer Produktion gewährleisten zu können, werden am IFA für die genannten Prozesselemente Beschreibungs-, Wirk- und Entscheidungsmodelle zu Beschreibungs- und Analysezwecken entwickelt. Die Entwicklung solcher Modelle orientiert sich dabei stark an den von Wiendahl definierten Anforderungen hinsichtlich der Modelleigenschaften (Allgemeingültigkeit, Quantifizierbarkeit, Zielorientierung, Prozess- und Ressourcensicht, Datenverfügbarkeit, Visualisierbarkeit und Möglichkeit der hierarchischen Verdichtung)

(Wiendahl, 1996). Als Beschreibungsmodell werden dabei solche Modelle verstanden, die, ohne eine Erklärung und Analyse der Wirkzusammenhänge zu liefern, eine empirische Erscheinung beschreiben. Aus Wirkmodellen oder auch Erklärungsmodellen lassen sich Wirkzusammenhänge für den betrachteten Prozess und zusätzlich Aussagen über die eventuell vorhandenen Gesetzmäßigkeiten ableiten. Ein Entscheidungsmodell hingegen unterstützt den Anwender bei der Ermittlung optimaler Handlungsmöglichkeiten (Wöhle & Döring, 2008).

3.2 Beschreibungs- und Wirkmodelle für das logistische Prozesselement Fertigung

Ausgehend von dem Durchlaufelement (vgl. Heinemeyer, 1974), welches die verschiedenen Zeitanteile eines Arbeitsvorganges definiert, wurde das Durchlaufdiagramm als Beschreibungsmodell für Fertigungsprozesse entwickelt. In einem Durchlaufdiagramm werden sowohl die Zu- als auch die Abgänge an einem Arbeitssystem jeweils kumulativ abgebildet. Da die Zu- und Abgänge in zwei unabhängig voneinander zu erstellenden Kurven abgebildet werden, lassen sich zu jedem Zeitpunkt quantitative Aussagen über den am Arbeitssystem befindlichen Bestand (vertikaler Abstand zwischen Zu- und Abgangskurve) und über die Reichweite (horizontaler Abstand zwischen Zu- und Abgangskurve) treffen.

Um eine Positionierung im Zielkonflikt der logistischen Zielgrößen Bestand, Durchlaufzeit, Leistung und Termintreue zu ermöglichen, wurden von Nyhuis die Produktionskennlinien entwickelt (Nyhuis, 1991; Nyhuis & Wiendahl, 2012). Die Produktionskennlinien weisen die Eigenschaften eines Wirkmodells auf und ermöglichen die analytische Beschreibung logistischer Wirkzusammenhänge. Mit Hilfe der Produktionskennlinien lassen sich deshalb Aussagen über das logistische Verhalten in Abhängigkeit einer Einflussgröße, hier der Bestand, treffen.

3.3 Beschreibungs- und Wirkmodelle für das logistische Prozesselement Lager

Analog zu dem Fertigungsprozess wird das Lagerdurchlaufdiagramm als Beschreibungsmodell eines Lagerprozesses verwendet. Im Lagerdurchlaufdiagramm wird der Lagerzu- und -abgang kumulativ mit Hilfe zweier unabhängiger Kurven, der Zu- und der Abgangskurve, über dem Untersuchungszeitraum abgebildet. Auf der Ordinate wird der Bestand im Lager angegeben. Dieser lässt sich grafisch durch die vertikalen Abstand zwischen der Zu- und der Abgangskurve bestimmen. Der horizontale Abstand zwischen den beiden Kurven gibt die mittlere Lagerverweilzeit an.

Ebenfalls anlog zum Fertigungsprozess und den dazugehörigen Produktionskennlinien wurden die Lagerkennlinien als ein Wirkmodell für Lagerprozesse entwickelt. Mit Hilfe der Lagerkennlinien wird der Zusammenhang zwischen den lagerlogistischen Zielgrößen Lagerbestand, Servicegrad und Lieferverzug dargestellt. Anhand von Lagerdurchlaufdiagrammen und Lagerkennlinien sind jegliche Lagerbereiche von Beschaffungs- über Halbfertigwarenläger innerhalb der Produktion bis hin zu Fertigwarenläger der Distribution beschreib- und analysierbar.

Für den Fall, dass innerhalb der Distribution keine Entkopplung zwischen Produktion und Kunden durch ein Fertigwarenlager vorhanden ist (Lagerfertiger), bildet das Terminabweichungshistogramm ein grundlegendes Beschreibungsmodell, die für den Kunden entscheidende Kennzahl der Termintreue modellhaft zu beschreiben (Auftragsfertiger). In einem Terminabweichungshistogramm werden unterschiedliche Klassen von Terminabweichungen grafisch dargestellt. Dafür wird die relative Häufigkeit für das Auftreten einer Klasse über der jeweiligen Klasse abgetragen. Ausgehend von dem Histogramm lässt sich die Termineinhaltungskennlinie als Wirkmodell ableiten. Sie bildet den Zusammenhang zwischen der Termineinhaltung (in der Einheit % auf der ersten Ordinate), dem mittleren Bestand an fertigen Aufträgen (in der Einheit € auf der zweiten Ordinate) sowie den Lieferzeitpuffer als die die Termineinhaltung und den Fertigwarenbestand beeinflussende Regelgröße

(in der Einheit Betriebskalendertage auf der Abzisse) ab. Die Termineinhaltungskennlinie ermöglicht eine logistische Positionierung in dem Spannungsfeld einer angestrebten hohen Termintreue auf der einen und kleiner Fertigwarenbestände auf der anderen Seite.

3.4 Beschreibungs- und Wirkmodelle für das logistische Prozesselement Montage

In Analogie zu dem bereits beschriebenen Durchlaufelement der Fertigung ist für Montagebereiche ein Montagedurchlaufelement (MDLE) ableitbar (Schmidt, 2011). Die innerhalb des MDLE zu berücksichtigenden Zeitanteile sind Liegen nach Abruf bzw. Liegen nach Bearbeitung, Transportieren, Liegen vor Montage, Rüsten und Montieren. Diese genannten Zeitanteile werden für die einzelnen Versorgungsaufträge aus Lager, Fertigung und direkter Bereitstellung innerhalb des MDLE übereinander angeordnet, um anschließend die Versorgungsaufträge in aufsteigender zeitlicher Reihenfolge unter Berücksichtigung ihres zeitlichen Zugangs in die Montage abzutragen. Neben den im Durchlaufdiagramm der Fertigung implementierten Zugangs- und Abgangskurven ist das Montagedurchlaufdiagramm um eine Komplettierungs- sowie eine Montagebeginnkurve zu erweitern. Durch die Komplettierungskurve wird der Zeitpunkt in Montagebereichen berücksichtigt, ab dem der letzte Versorgungsauftrag eines Montageauftrags das Montagesystem erreicht. Der eigentliche Montagebeginn wird auf der Montagebeginnkurve aufgetragen.

Aufbauend auf dem MDLE, dem Montagedurchlaufdiagramm sowie unter Einbeziehung von Terminabweichungsverteilungen der Versorgungsprozesse sind quantitative Aussagen über Komplettierungssituationen in Montagebereichen durch das Bereitstellungsdiagramm ableitbar (Beck, 2013). Anhand von Zugangs- und Komplettierungskurven werden in dem Bereitstellungsdiagramm die auf den Bedarfstermin normierten Bereitstellungszeitpunkte der Versorgungsprozesse abgebildet. Die Zugangskurve berücksichtigt dabei alle

Bereitstellungszeitpunkte der Teilkomponenten, die für die Montageaufträge des Untersuchungszeitraumes erforderlich sind. Demgegenüber bildet die Komplettierungskurve ausschließlich die Bereitstellungszeitpunkte der für die einzelnen Montageaufträge zuletzt bereitgestellten Komponenten ab. Hierdurch ist die Berechnung gestörter Bestände (nicht komplettierte Montagesets) innerhalb eines Montagebereiches realisierbar und Auswirkungen von Maßnahmen zur Verbesserung der Terminabweichungswerte der Versorgungsprozesse identifizier- und quantifizierbar.

Eine Übersicht über die vorgestellten Beschreibungs- und Wirkmodelle und deren Zuordnung zu den jeweiligen Prozesselementen stellt Abbildung 1 dar. Für eine übersichtliche Darstellung wurden den Halbfertigwarenlagern (HFL) in der Produktion und dem Fertigwarenlager (FWL) keine Lagermodelle zugewiesen. Die HFL können jedoch mit den bereits beschriebenen Lagerdurchlaufdiagrammen und Lagerkennlinien quantitativ beschrieben und analysiert werden. Neben dem Einsatz in der Montage ist die Anwendung des Bereitstellungsdiagramms auch in der Distribution möglich, um Komplettierungssituationen für einen Versandbereich zu beschreiben.

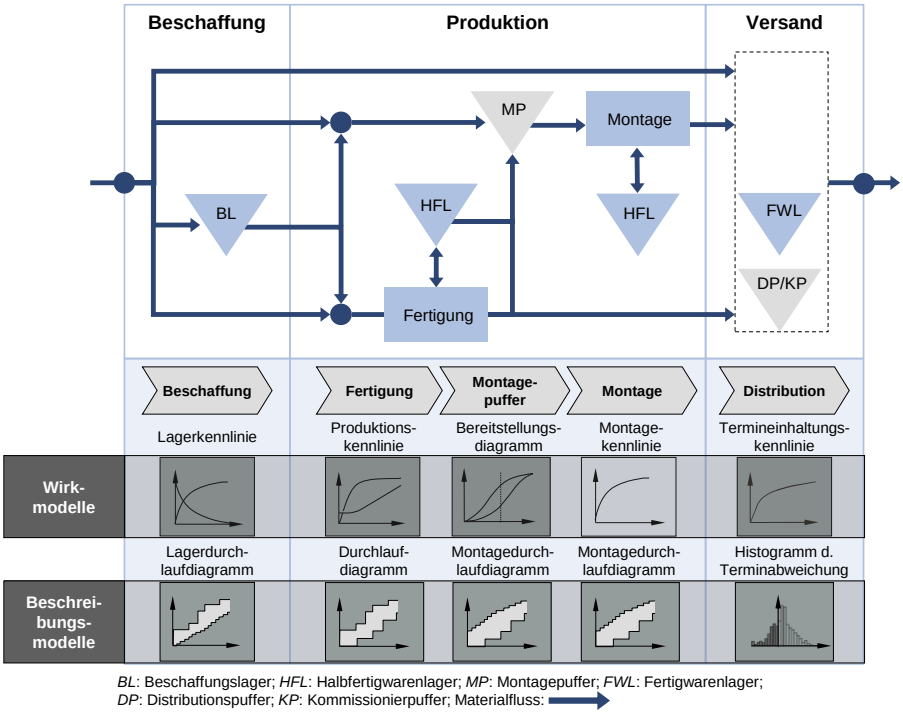


Abbildung 1: Übersicht produktionslogistischer Modelle innerhalb einer Lieferkette

3.5 Anwendungsorientierter Einsatz logistischer Modelle in der Praxis

Die beschriebenen logistischen Modelle werden am IFA unter der Prämisse der Entwicklung einer Theorie der Logistik kontinuierlich weiterentwickelt. Zudem konnten sie bereits bei vielfältigen Fragenstellungen aus der Industrie erfolgreich angewandt werden. Als anwendungsbezogene Werkzeuge liefern die Modelle die Grundlage für zahlreiche, die gesamte Lieferkette betreffende Analyse- und Optimierungsprojekte. Der erfolgreiche Einsatz in der Industrie liegt hauptsächlich in der Einfachheit und Praxistauglichkeit der Modelle begründet. Mit Hilfe der entsprechenden Datenbasis können die Modelle schnell und ohne großen Aufwand eingesetzt werden. Neben der Erfassung, Visualisierung und

Interpretation der aktuellen Situation lassen sich durch den Einsatz logistischer Modelle zusätzlich mögliche Handlungsalternativen bzw. Handlungsmaßnahmen ableiten und bewerten (Nyhuis & Wiendahl, 2012).

Sowohl die durch die Modelle beschriebenen produktionslogistischen Zusammenhänge als auch die Auswirkungen von Maßnahmen auf das logistische Systemverhalten werden den Anwendern durch den Modelleinsatz unmittelbar ersichtlich. Für die Anwendung sind keine umfassenden IT-Vorkenntnisse notwendig, sodass der erfolgreiche Einsatz der logistischen Modelle in der Praxis gewährleistet ist. Nichtsdestotrotz hängen der Erfolg des Modelleinsatzes und damit die Aussagekraft der Ergebnisse maßgeblich von der Qualität der Daten, die in ein entsprechendes Modell einfließen, ab.

4 Entwicklungspotenziale logistischer Modelle im Rahmen der Industrie 4.0

Bislang werden die vorgestellten logistischen Modelle hauptsächlich in der Gestaltung und Analyse von Produktionssystemen eingesetzt. Dies liegt darin begründet, dass in der Regel große Untersuchungszeiträume notwendig sind, um valide Aussagen auf Basis von Daten niedriger Auflösung treffen zu können. Weiterhin spiegeln die Modelle mittelwertbasierte Auswertungen dieser Zeiträume wider.

Nicht vorhandene bzw. fehlerhafte Produktionsdaten führen zu einer Verringerung der Abbildungsgüte der vorgestellten logistischen Modelle. Beispielsweise führen falsche Angaben bezüglich der Standardabweichung der Auftragszeiten bei gleichzeitigem korrektem Niveau des Mittelwertes der Auftragszeiten zu einer fehlerhaften Berechnung des idealen Mindestbestandes einer Produktionskennlinie (Nyhuis & Wiendahl, 2012). Eine Ursache für eine fehlerhafte Dimensionierung der Standardabweichung der Auftragszeiten liegt z.B. darin, dass die entsprechenden Werte abgeschätzt und nicht auf Basis von Vergangenheitsdaten ermittelt werden. Abschätzungen oder Annahmen im Rahmen der Anwendung der Produktionskennlinien sind bei einem solchen Datenfehler bei

Prozessbeurteilungen und der Gestaltung von Produktionsprozessen als kritisch anzusehen.

Die Generierung von durch Industrie 4.0 ermöglichten Rückmeldedaten in Echtzeit gewährleistet die Abbildung aktueller Betriebszustände von Produktionssystemen sowie die zeitnahe Identifikation strukturrelevanter Änderungen. Hochaufgelöste Rückmeldedaten befähigen logistische Modelle zu einer Einbindung in Aufgaben der Produktionsplanung, -steuerung und -controlling, wodurch modellbasierte Entscheidungsgrundlagen auf Steuerungsebene geschaffen werden.

Im Folgenden werden die durch Industrie 4.0 realisierbaren Möglichkeiten einer Verbesserung und Erweiterung der produktionsseitigen Datenbasis für Planungs-, Steuerungs- sowie Controllingaufgaben aufgeführt. Anschließend werden mögliche Entwicklungspotenziale für die Anwendung logistischer Modelle in Produktionssystemen der Industrie 4.0 aufgezeigt.

4.1 Auswirkungen von Industrie 4.0 auf die Planungsaufgaben

Die im Kapitel 3 vorgestellten Beschreibungs- und Wirkmodelle benötigen für die Durchführung von Planungsaufgaben eine Datenbasis in ausreichender Datenqualität. Wesentliche Entscheidungsgrundlage von Planungsaufgaben sind hierbei konsistente Stammdaten sowie aktuelle Bewegungsdaten. IT-seitige Unterstützungen in PPS-Systemen zur Pflege bzw. zur Bestimmung dieser Daten sind jedoch als nicht ausreichend anzusehen. Bestrebungen im Rahmen der Industrie 4.0 können dazu genutzt werden, diese Defizite zu verringern. Beispielsweise werden möglichst genaue Plan-Durchlaufzeiten für realistische Auftragsterminierungen benötigt. Hochaufgelöste Rückmeldedaten von Ist-Durchlaufzeiten, die kontinuierlich erfasst und ausgewertet werden, können zukünftig dazu genutzt werden, die Güte der Plan-Durchlaufzeiten signifikant zu erhöhen. So können z.B. die Werte der Ist-Durchführungszeiten kontinuierlich zurückgemeldet und erfasst werden, um anschließend diese Werte zur Verbesserung der Stammdaten zu nutzen und gemeinsam mit Angaben über die aktuelle Bestandssituation in die

Dimensionierung der Plan-Durchlaufzeiten einfließen zu lassen. Unter Verwendung der Flussgradorientierten Terminierung auf Grundlage der Produktionskennlinie sind darüber hinaus mittlere Übergangszeiten als zweite Komponente von Plan-Durchlaufzeiten detailliert ermittelbar.

Auf Basis einer echtzeitfähigen Rückmeldung über begonnene oder abgeschlossene Arbeitsvorgänge in der Fertigung sind Aussagen über Auftragsfortschritte und aktuelle Arbeitssystembelastungen ableitbar. Weiterhin ist durch die Bereitstellung verbesserter Datengrundlagen die Identifikation struktureller Veränderungen innerhalb der Produktion realisierbar. Unter Verwendung statistischer Methoden ist beispielsweise die Ermittlung von Veränderungen hinsichtlich der Auftragszeitverteilungen durchführbar (Kennemann et al., 2010). Diese strukturellen Veränderungen lassen sich direkt in logistischen Modellen abbilden und können somit zeitnah in Planungsentscheidungen berücksichtigt werden. Eine Verbesserung der Datengrundlage dient folgerichtig einer Verbesserung der Planungsgenauigkeit im Rahmen der Produktionsplanung.

4.2 Auswirkungen von Industrie 4.0 auf die Steuerungsaufgaben

Bislang basieren die vorgestellten logistischen Modelle hauptsächlich auf einer mittelwertbasierten Aggregation langer Untersuchungszeiträume, um valide Aussagen über das logistische Verhalten von Arbeitssystemen, Montagesystemen oder Läger treffen zu können. Dies liegt in einer unzureichenden Rückmeldequalität (Aktualität, Korrektheit) und einer oftmals niedrigen Auflösung (tagesgenaue Terminangaben und ereignisdiskrete Meldungen an sich kontinuierlicher Prozesse) begründet. In der Folge werden längere Untersuchungszeiträume mit einer hinreichenden Anzahl von Ereignissen (z.B. > 50 rückgemeldete Aufträge zur Erstellung von Produktionskennlinien) benötigt, um Datenfehler und stochastische Einflüsse weitgehend kompensieren zu können. Kurzfristige Steuerungsentscheidungen sind damit auf der Grundlage der vorgestellten Modelle aktuell nicht ableitbar.

Echtzeitnahe, hochauflösende Rückmeldedaten führen zu kürzeren Untersuchungszeiträumen, was sich direkt in einer höheren Reaktionsfähigkeit auf Störungen in der Produktion widerspiegelt. Durch CPPS generierte Rückmeldedaten sind direkt in logistischen Modellen implementierbar. So ist es beispielsweise denkbar, Produktionskennlinien in Abhängigkeit der Auftragsstruktur für kurze Untersuchungszeiträume zu erstellen. Strukturelle Veränderungen in den Arbeitsinhalten und im Kapazitätsangebot lassen sich zeitnah ermitteln und in den Kennlinien berücksichtigen. Auf Basis der Produktionskennlinie sind anschließend echtzeitnahe Entscheidungen zum Beispiel bezüglich der Freigabe von Aufträgen an einem Arbeitssystem ableitbar, wobei Wirkzusammenhänge zwischen der Leistung, der aktuellen Bestandssituation, der Durchlaufzeit und der Termintreue ganzheitlich betrachtet werden können. Als Grundlage dieser Entscheidungen dienen Steuerungsparameter, die anhand der generierten Produktionskennlinien ermittelt werden. Zu betonen ist dabei, dass mit Hilfe der Modelle keine einzelauftragsbezogenen Entscheidungen (hierzu sind eher Simulationsmodelle geeignet), sondern strukturelle Entscheidungen hinsichtlich der Aufgaben der Fertigungssteuerung (z.B. Veränderung des Freigabehorizontes bei der Auftragsfreigabe oder kapazitive Anpassungsmaßnahmen) getroffen werden können.

Eine wesentliche Entscheidungsunterstützung wird durch logistische Modelle im Sinne der Visualisierung aktueller Systemzustände und vergangenheitsbasierter Entwicklungen bereitgestellt. Durch die Generierung einer anforderungsgerechten Visualisierung werden Mitarbeiter optimal in ihrem Tätigkeitsfeld unterstützt. Logistische Modelle bieten dabei Möglichkeiten, Rückmeldedaten aggregiert darzustellen, Zusammenhänge zwischen verschiedenen Zielgrößen quantitativ aufzuzeigen und eine transparente Darstellung der Sachverhalte innerhalb der Produktion zu generieren. Vor dem Hintergrund der beschriebenen Visualisierungen sind Handlungsentscheidungen durch Mitarbeiter ableitbar. Weiterhin sind die Auswirkungen von Gestaltungsmaßnahmen

und Entscheidungen innerhalb der Produktionsplanung und -steuerung anhand logistischer Modelle abbildbar und quantitativ beschreibbar.

Als Resultat dieser Entwicklung lässt sich eine realitätsnahe Abbildung von Produktionssystemen anhand von logistischen Modellen realisieren, wodurch Steuerungsentscheidungen unter Berücksichtigung des aktuellen Zustands des zu steuernden Arbeitssystems bestmöglich getroffen werden können.

4.3 Auswirkungen von Industrie 4.0 auf die Controllingaufgaben

Das Produktionscontrolling umfasst neben der Messung der logistischen Zielerreichung auch den Abgleich von Ist- mit Plan-Daten, die Identifizierung möglicher Ursachen bei auftretenden Abweichungen sowie die Identifizierung von Maßnahmen, um den Abweichungen entgegen zu wirken. Unter den Ist-Daten sind dabei diejenigen Datensätze zu verstehen, die als Rückmeldedaten aus der Produktion zur Verfügung gestellt werden. Plan-Daten werden durch das PPS-System generiert (Lödding, 2008).

Die Auswirkungen im Zuge der Entwicklung von Industrie 4.0 auf die Plan-Daten-Situation wurden bereits in Kapitel 4.1 vorgestellt. Die folgenden Ausführungen beziehen sich deshalb auf die Ist-Daten-Situation.

Da die allgemeine Datenqualität sich im Zuge der Realisierung cyber-physischer Produktionssysteme erhöht, werden auch die Ist-Daten, als Rückmeldedaten aus der Produktion, in ihrer Qualität steigen. Offensichtlich ist, dass sich das Datenvolumen mit zunehmender Vernetzung einzelner Systeme und der steigenden Verwendung von Sensoren vergrößert. Kürzere Untersuchungszeiträume mit aussagekräftigen Daten und Rückmeldungen, die in Echtzeit den Auswerte- und Analysestellen zur Verfügung gestellt werden, lassen sich realisieren.

Durch die fortlaufende Aufnahme der Ist-Daten und der damit einhergehenden kontinuierlichen Beschreibung der Ist-Situation der Produktion werden Änderungen im Produktionsprozess sofort ersichtlich. Die rückgemeldeten Ist-Daten spiegeln zu jedem Zeitpunkt die aktuelle

Situation in der Produktion wider und können sofort mit den Plan-Daten verglichen werden. Sowohl Abweichungen von den Plan-Daten als auch positive und negative Entwicklungstendenzen im Produktionsprozess können unmittelbar identifiziert werden.

Auf Grund der hohen Aussagekraft logistischer Modelle lassen sich diese auch für eine Bewertung möglicher Maßnahmenumsetzungen einsetzen. Muss im Falle einer Abweichung von Plan- zu Ist-Daten eine Steuerungsentscheidung getroffen werden, so sind die Modelle für die Analyse der Entwicklung des logistischen Systemverhaltens einsetzbar. Die Entscheidungsunterstützung durch den Einsatz logistischer Modelle kann vor dem Hintergrund der heutigen Datensituation somit wesentlich detaillierter und präziser erfolgen.

Die Visualisierung des aktuellen Produktionszustandes ist mit dem Einsatz logistischer Modelle ebenso möglich wie die Identifikation von möglichen strukturellen Veränderungen (z.B. der Auftragszeitstruktur oder der Kapazitätsstruktur). Zudem können mit Hilfe der Modelle die Auswirkungen der Veränderungen auf produktionsrelevante Zielgrößen echtzeitnah analysiert werden. Die genannten Einsatzszenarien logistischer Modelle im Rahmen der Industrie 4.0 sind in Abbildung 2 dargestellt.

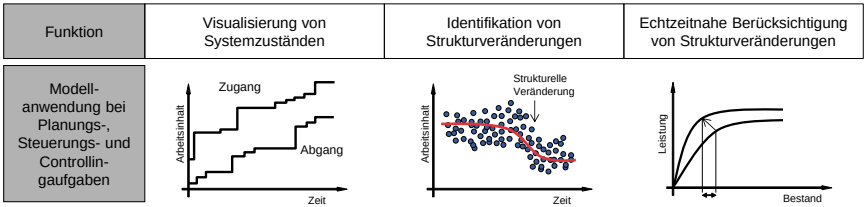


Abbildung 2: Einsatzszenarien logistischer Modelle in cyber-physischen Produktionssystemen

Da logistische Modelle sowohl für Planungs-, Steuerungs- und Controllingaufgaben Anwendung finden, bilden sie auch im Rahmen von Industrie 4.0 und der damit einhergehenden Datenqualitätssteigerung unverzichtbare Werkzeuge für Analysezwecke sowie für Planungs- und

Steuerungsentscheidungen von Produktionsprozessen. Die zu erwartende Entwicklung bzgl. der Datenqualität steigert die Aussagekraft logistischer Modelle und wirkt sich positiv auf den Einsatz in Planungs- und Steuerungsprozessen aus.

4.4 Entwicklungstendenzen logistischer Modelle

Die Einsatzmöglichkeiten logistischer Modelle im Zuge der verbesserten Datensituation durch Industrie 4.0 wurden im vorherigen Abschnitt auf die Planungs-, Steuerungs- und Controllingaufgaben eines Unternehmens bezogen. In Bezug auf den Einsatz logistischer Modelle in produzierenden Unternehmen resultieren aus der Generierung echtzeitnaher und hochauflösender Rückmeldedaten weitere Entwicklungstendenzen, deren Auftreten in der zunehmenden Datenqualität und -quantität begründet liegt.

Die echtzeitnahe Erfassung und Verarbeitung von produktionsseitigen Rückmeldedaten sowie eine Verbesserung der Stammdatenqualität ermöglichen den Einsatz existierender logistischer Modelle in neuen Anwendungsgebieten. Die steigende Quantität und Qualität von Daten in Kombination mit der echtzeitnahen Erfassung führen zu einer echtzeitnahen Beschreibung der aktuellen Produktionssituation. Die Aufbereitung und Visualisierung der Daten durch den Einsatz logistischer Modelle unterstützen deshalb die Umsetzung eines echtzeitnahen und auf logistische Modelle basierenden Controllingansatzes.

Auf Grund umfangreicherer Datenerhebungen ist zudem von der Entwicklung neuer Modelle auszugehen. Diese beinhalten zusätzliche, in den jetzigen logistischen Modellen nicht berücksichtigte Planungsparameter. Um einen bisher vernachlässigten Kostenaspekt im Planungs- und Steuerungsprozess zu berücksichtigen, können beispielsweise Energiekosten Einzug in logistische Modelle erhalten. Der Berücksichtigung stetig steigender Energiekosten und der Anforderung an Unternehmen nachhaltig zu produzieren wird hierdurch Rechnung getragen.

Durch die mit der Entwicklung von Industrie 4.0 einhergehende Vernetzung von CPS innerhalb eines CPPS stehen logistische Modelle zukünftig neben arbeitssystemspezifischen Analysen auch zur Beschreibung und Quantifizierung arbeitssystemübergreifender Wirkbeziehungen zur Verfügung. Die Vernetzung verschiedener CPPS macht die Optimierung unternehmensübergreifender Lieferketten realisierbar. Der echtzeitnahe Transfer und Austausch von Daten zwischen Arbeitssystemen, Zulieferern oder weiterverarbeitenden Abnehmern liefert die für Planungs- und Steuerungszwecke notwendigen Inputgrößen und ermöglicht eine flexibel reagierende Produktion.

Als unterstützendes Element innerhalb von produktionsseitigen IT-Systemen (z.B. ERP-Systeme) ist der Einsatz logistischer Modelle im Rahmen von Industrie 4.0 denkbar. Eine echtzeitnahe Zustandsbeschreibung des Produktionsprozesses liefert die Grundlage für eine stetig angepasste und optimierte Auslegung von Planungs- und Steuerungsparametern. In diesem Zusammenhang ist z.B. eine dynamische Dimensionierung der Sicherheitsbestände in Lagerbereichen oder auch die auf die aktuelle Produktionssituation angepasste Bereitstellung bzw. Zurücknahme von KANBAN-Karten vorstellbar.

Abbildung 3 stellt die im Kapitel 4 aufgezeigten Entwicklungstendenzen logistischer Modelle dar. Ausgehend von der bereits vorhandenen Möglichkeit, einzelne Prozesselemente mittels logistischer Modelle zu analysieren wird im Zuge von Industrie 4.0 der Einsatz der Modelle für vernetzte Produktionssysteme (CPPS) ermöglicht. Hierbei können logistische Modelle die Basis für Planungs-, Steuerungs- und Controllingaufgaben von CPS und CPPS bilden. Die Ableitung der Entwicklungstendenzen liegt hauptsächlich in der Veränderung der Datenqualität und Datenquantität im Zuge der Entwicklung von Industrie 4.0 begründet.

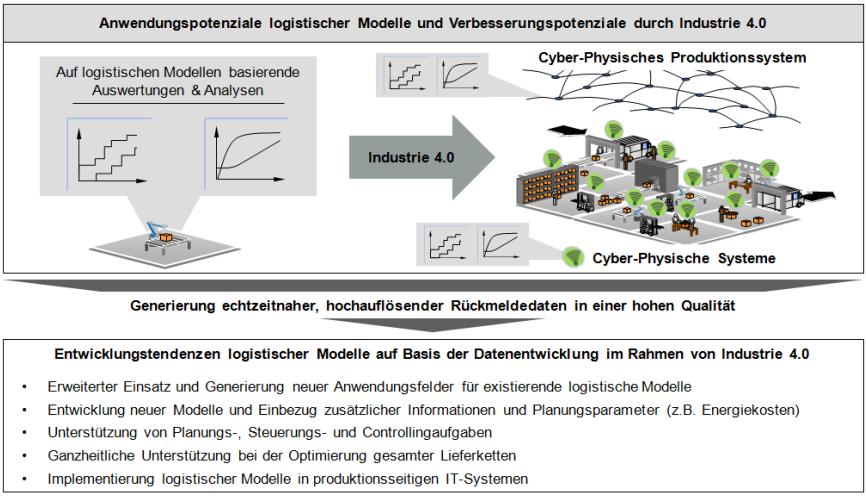


Abbildung 3: Anwendungspotenziale und Entwicklungstendenzen logistischer Modelle im Rahmen von Industrie 4.0

5 Fazit

Die Vorteile logistischer Modelle für die Analyse und Optimierung der Prozesselemente einer Lieferkette haben in der Vergangenheit für einen stetigen Einsatz der Modelle in der Praxis gesorgt. Ein grundlegendes Kriterium für die Aussagekraft der Modelle liegt nach wie vor in der Qualität der Eingangsdaten. Im Rahmen der Weiterentwicklung von Industrie 4.0 werden in Zukunft Lieferketten Daten echtzeitnah mit sehr hohen Auflösungen generieren und weiterverarbeiten. Neben den Einsatz von logistischen Modellen zur Analyse und Beurteilung von Gestaltungsmaßnahmen sorgt die noch nie dagewesene Datenqualität auch für die Eignung der Modelle bei der Durchführung von Steuerungs- und Controllingaufgaben. Dabei kommt dem Menschen, als wichtigste Ressource im Unternehmen, weiterhin eine entscheidende Rolle zu. Modelle, aber auch Simulationen können die Fähigkeiten der Mitarbeiter nur unzureichend abbilden. Deswegen wird auch der Mensch im Rahmen von Industrie 4.0 weiterhin als Entscheidungsträger fungieren müssen. Die Basis für diese Entscheidungen liefern Modelle, die auf Grund eine hohen

Datenqualität eine sehr hohe Aussagekraft besitzen und bei Planungs-, Steuerungs- und Controllingaufgaben unterstützen.

Auch wenn eine hohe Datenqualität den Einsatz logistischer Modelle unterstützt, so ist dennoch zu hinterfragen, ob eine sekundengenaue Rückmeldung von Daten und damit ein enorm hohes Datenvolumen zwangsweise sinnvoll sind. Die Erstellung eines Durchlaufdiagrammes, bei dem beispielsweise Auftragszeiten im Stundenbereich liegen, erhält keine höhere Aussagekraft, wenn sekundengenau der Zustand des betroffenen Arbeitssystems abgebildet wird. Anforderungsgerechte Entwicklungen von CPPS sind aus diesem Grund zu unterstützen und zukünftige Entwicklungsschritte unter der Prämisse einer hohen Praxistauglichkeit zu verfolgen.

Literatur

acatech (Ed.) (2011). Cyber-Physical Systems: Driving force for innovation in mobility, health, energy and production (acatech POSITION PAPER), Heidelberg et al.: Springer Verlag.

Bechte, W. (1980). Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung. Düsseldorf: VDI-Verlag.

Beck, S. (2013). Modellgestütztes Logistikcontrolling konvergierender Materialflüsse. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH.

Geisberger, E. / Broy, M. (2012). agendaCPS: Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physica/Systems (acatech STUDIE), Heidelberg et al.: Springer Verlag.

Bauer, W. et al. (2014). Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland (Studie). Berlin/Stuttgart: BITKOM 2014.

Heinemeyer, W. (1974). Die Analyse der Fertigungsdurchlaufzeit im Industriebetrieb. Hannover: Offsetdruck Böttger.

Hering, N. / Meißner, J. / Reschke, J. (2013). ProSense – Untersuchung „Produktion am Standort Deutschland 2013“. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 108(12), 995-998.

Kennemann, M. et al. (2010). Dynamik in Produktionsprozessen: Identifikation logistikrelevanter struktureller Veränderungen. In: Industrie Management, 26(5), 19-22.

Lödding, H. (2008). Verfahren der Fertigungssteuerung (2. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

McAfee, A. / Brynjolfsson, E. (2012). Big Data: The Management Revolution. Harvard Business Review, Oktober 2012, 1-9.

Nyhuis, P. (1991). Durchlauforientierte Losgrößenbestimmung. Düsseldorf: VDI-Verlag.

Nyhuis, P. / Wiendahl, H.-P. (2012). Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen (3. Aufl.). Berlin: Springer Verlag.

Ostgathe, M. (2012). System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. München: Herbert Utz Verlag.

Reinhart, G. et al. (2013). Cyber-physische Produktionssysteme: Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerung durch die Vernetzung intelligenter Systeme in der Fabrik. In: wt Werkstattstechnik online, 103(2), 84-89.

Russwurm, S. (2013). Software: Die Zukunft der Industrie. In: Sendler, Ulrich (Ed.): Industrie 4.0 – Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM (pp. 21-36). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

Schmidt, M. (2011). Modellierung logistischer Prozesse der Montage. Garbsen: TEWISS.

Schuh, G. et al. (2011). High Resolution Production Management. In: Brecher, Christian et al. (Ed.): Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik (pp. 61-80). Aachen: Shaker Verlag.

Schuh, G. et al. (2013a). Improving data integrity in production control. In: Procedia CIRP, vol. 9, 44-48.

Schuh, G. et al. (2013b). Produktion am Standort Deutschland. Aachen.

Stachowiak, H. (1973). Allgemeine Modelltheorie. Wien, New York: Springer Verlag.

Wiendahl, H.-P. (1996). Modelle und Systeme des Produktionscontrollings. In Eversheim, Walter / Schuh, Günther (Ed.): Betriebshütte - Produktion und Management - Teil 2 (pp. 18-32). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

Wöhe, G. / Döhring, U. (2008). Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre (23. Aufl.). München: Vahlen.

Industrie 4.0: Auswirkungen auf das Supply Chain Risikomanagement

Wolfgang Kersten, Meike Schröder, Marius Indorf

1 Einleitung

Die fortschreitende Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnologie und deren Applikation in der Produktionsumgebung von Industrieunternehmen führen zu einem Paradigmenwechsel, der unter dem Begriff „Industrie 4.0“ zusammengefasst wird. Die Vision, die hinter der damit verbundenen Einführung neuer Technologien steht, ist eine bisher unerreichte Flexibilität der Produktion. Mit dieser gelingt es, stark individualisierte Produkte auf ökonomischem Wege, d. h. ohne Einbußen der Rentabilität eines Massenherstellers von Standardprodukten, zu erzeugen (Kagermann, 2014).

Die mit der Industrie 4.0 einhergehenden veränderten Rahmenbedingungen stellen auch die Supply Chain vor neue Herausforderungen. Hierbei ergeben sich zudem zahlreiche neuartige Risiken, die es zu beherrschen gilt. Ziel des vorliegenden Beitrags ist es daher, die Auswirkungen der Industrie 4.0 auf das Supply Chain Risikomanagement aufzuzeigen. Nach einer kurzen Erläuterung der Vision und der Merkmale der Industrie 4.0 und einer Einführung in das Supply Chain Management, werden zunächst die Auswirkungen der Industrie 4.0 auf die Supply Chain beschrieben. Die Neuartigkeit bestehender Strukturen und Prozesse wird ebenso analysiert, wie die zukünftigen Herausforderungen, die an das Supply Chain Management gestellt werden. Anschließend wird die Entwicklung der Industrie 4.0 vor dem Hintergrund des Supply Chain Risikomanagements diskutiert und die Auswirkungen auf den damit verbundenen Prozess aufgezeigt. Der Beitrag schließt mit möglichen Lösungsansätzen für die Praxis.

2 Begriffliche Abgrenzungen

Im folgenden Kapitel wird auf Vision und Begrifflichkeiten der Industrie 4.0 eingegangen sowie das Konzept des Supply Chain Managements näher beschrieben.

2.1 Industrie 4.0

Die Namensgebung Industrie 4.0 geht zurück auf eine Einreihung nach Schlick et al. (2012) in die bisherigen industriellen Revolutionen. Ausgelöst wurden diese durch (1.) von Wasser- bzw. Dampfkraft angetriebene mechanische Produktionsanlagen, (2.) arbeitsteilige Massenproduktion mithilfe von elektrischer Energie und (3.) Automatisierung der Produktion mittels Elektronik und Informationstechnologie. Die vierte industrielle Revolution, Industrie 4.0, beruht dabei auf sogenannten cyber-physischen Systemen (CPS) als Kerntechnologie.

Wesentliches Merkmal der Industrie 4.0 ist eine veränderte Art der Steuerung der Produktionsabläufe. Während heute die Produktionsaufträge überwiegend zentral gesteuert und verwaltet werden, wird es künftig möglich sein, dass sich der vom Endkunden ausgelöste Auftrag eigenständig durch eine dynamische Wertschöpfungskette dirigiert. Hierbei sichert sich der Produktionsauftrag die erforderlichen Materialen sowie Kapazitäten und steuert die Arbeitsstationen automatisch an. Nach jedem Schritt werden die korrekte Durchführung überprüft, mögliche Verspätungen erkannt und Gegenmaßnahmen beispielsweise in Form von zusätzlichen Kapazitäten organisiert. Nicht vermeidbare Verspätungen werden dann direkt an den jeweiligen Kunden gemeldet (Spath, 2013). Das bedeutet, dass die Entscheidungen über die Steuerung der Aufträge nicht mehr zentral getroffen werden. Stattdessen verdrängen autonome und sich selbstorganisierende Produktionseinheiten die klassischen passiven Produktionssysteme. Dabei werden Wertschöpfungsprozesse an den tatsächlichen Bedarfen mithilfe von Echtzeitinformationen ausgerichtet und optimiert. In der Produktion und auf übergeordneter Ebene entstehen

hierdurch Ad-hoc-Vernetzungen, die zu einer hochflexiblen Wertschöpfung führen (Kagermann, 2014).

Diese Elemente und Eigenschaften sind von der Plattform Industrie 4.0, einem Gemeinschaftsprojekt verschiedener Wirtschaftsverbände, in einer umfassenden und häufig in der Literatur herangezogenen Definition zusammengefasst worden: *"Der Begriff Industrie 4.0 steht für die vierte industrielle Revolution, einer neuen Stufe der Organisation und Steuerung der gesamten Wertschöpfungskette über den Lebenszyklus von Produkten. […] Durch die Verbindung von Menschen, Objekten und Systemen entstehen dynamische, echtzeitoptimierte und selbst organisierende, unternehmensübergreifende Wertschöpfungsnetzwerke, die sich nach unterschiedlichen Kriterien wie bspw. Kosten, Verfügbarkeit und Ressourcenverbrauch optimieren lassen"* (Plattform Industrie 4.0, 2013).

Als technische Voraussetzung für eine Industrie 4.0 stehen die bereits erwähnten vernetzten CPS im Fokus (Spath, 2013). CPS enthalten Sensoren zur Erfassung der Umwelt und Aktoren, um gezielt auf diese einzuwirken. Weiterhin sind CPS, wie bereits beschrieben, über digitale Netze miteinander verknüpft und können auf weltweit verfügbare Daten sowie Dienste zugreifen. Zur Kommunikation nach außen besitzen CPS außerdem multimodale Mensch-Maschine-Schnittstellen (Geisberger et al., 2012), sodass sie mit dem jeweiligen Bediener oder Kontrolleur in Interaktion treten können.

Insgesamt ist die Industrie 4.0 als eine Bündelung neuer Prinzipien zur Steuerung von Produktions-/Transportsystemen und unterschiedlicher Weiterentwicklungen aufseiten der Hardware, Software und Kommunikation zu verstehen. Diese Verknüpfung verschiedener Bereiche und Disziplinen ist sicherlich auch verantwortlich für die Tragweite der Industrie 4.0 und das so oft angeführte revolutionäre Ausmaß (siehe z. B. bei ten Hompel et al., 2014b; Feld et al., 2012). Im Zuge der Einführung einer Industrie 4.0 ergeben sich erhebliche Veränderungen für das einzelne Unternehmen. Die Anwendung der Technologien der Industrie 4.0 endet jedoch naturgemäß nicht an den Grenzen eines Unternehmens, sondern

erstreckt sich über die gesamte Supply Chain. Dies ist auch in der Grundidee beabsichtigt, da sich erst auf diese Weise das volle Potenzial ausschöpfen lässt.

2.2 Supply Chain Management

Das Konzept der Supply Chain wird sowohl in der Praxis als auch in der Theorie seit mehreren Jahren intensiv diskutiert. Dabei wird die Supply Chain im Deutschen auch als Liefer-, Logistik-, Versorgungs- oder Wertschöpfungskette bezeichnet (Erdmann, 2013; Vahrenkamp et al., 2012). Trotz umfassender Diskussionen existiert jedoch keine allgemeingültige Definition des Supply Chain-Begriffs, der eine Betrachtung aus verschiedenen Sichtweisen gleichermaßen in sich vereint. Über bestimmte Eigenschaften besteht allerdings zumeist Einigkeit: Zum einen umfasst eine Supply Chain eine Gruppe von rechtlich unabhängigen Unternehmen, zum anderen sind diese Unternehmen auf vor- und nachgelagerten Stufen durch Güter-, Informations- und Finanzflüsse miteinander verbunden (Mentzer et al., 2001).

Der vorliegende Beitrag orientiert sich an der Definition von Christopher, nach der die Supply Chain als „*the network of organizations that are involved, through upstream and downstream linkages, in the different processes and activities that produce value in the form of products and services in the hands of the ultimate consumer*" verstanden wird (Christopher, 2011, S. 13). Die Unternehmen, die sich mittelfristig zu einer Supply Chain zusammenschließen, versuchen, einen Nutzen für den Endkunden zu generieren. Gleichzeitig verfolgen sie dabei eine Win-Win-Situation, die durch die Vorteile gegenüber einem alleinigen Auftreten am Markt erzielt werden kann.

Im Hinblick auf die Anzahl und Art der Partner, die sich zu einer Supply Chain zusammenschließen, kann zwischen der direkten, erweiterten und ultimativen Supply Chain differenziert werden. Die direkte Supply Chain fokussiert das fokale Unternehmen sowie dessen direkte Zulieferer und direkten Kunden. Die erweiterte Supply Chain betrachtet ferner die

Lieferanten der direkten Zulieferer sowie die Kunden der direkten Kunden. Sämtliche Unternehmen und Partner auf den vor- und nachgelagerten Stufen umfasst die ultimative Supply Chain (Mentzer et al., 2001).

Um komparative Wettbewerbsvorteile gegenüber konkurrierenden Supply Chains zu generieren, bedarf es eines Supply Chain Managements (SCM) (Christopher, 2011). Auch hierzu besteht eine Vielfalt an Begriffsbestimmungen, die unter anderem aus den gegensätzlichen Perspektiven zur Abgrenzung der Logistik und der Supply Chain Managementkonzepte resultieren (Larson et al., 2007). Das Verständnis vom SCM in dem vorliegenden Beitrag entspricht der Begriffsbestimmung von Stock et al., die SCM als *„the integration of key business processes from end user through original suppliers that provides products, services and information that add value for customers and other stakeholders"* definieren (Stock et al., 2001, S. 54).

3 Die Auswirkungen der Industrie 4.0

Das folgende Kapitel beleuchtet zunächst die Auswirkungen einer Implementierung der Industrie 4.0 auf die Supply Chain. Im Anschluss erfolgt die Betrachtung, welchen Effekt die Neuerungen auf das Management der Supply Chain haben können.

3.1 Neue Strukturen und Prozesse in der Supply Chain

Die Einführung der Industrie 4.0 wird sich mittelfristig auf die gesamte Supply Chain auswirken (Bauer et al., 2014; Feld et al., 2012). Neben dem unterschiedlichen Aufbau befindet sich vor allem die Leistungserstellung im Wandel, da sich durch die Umsetzung der Industrie 4.0 mit ihren Konzepten und technischen Ansätzen Neuerungen bezüglich der eingesetzten Hardware, Software und Kommunikation ergeben. Dies wiederum hat Auswirkungen auf den Vorgang der Wertschöpfung in der Supply Chain. Im Folgenden wird zunächst das Augenmerk auf das einzelne Unternehmen und die hier zu erwartenden Veränderungen gerichtet. Anschließend erfolgt eine Ausweitung der Betrachtung auf die gesamte Supply Chain.

Im Hinblick auf die Einführung der mit Industrie 4.0 in Zusammenhang stehenden Konzepte und Ansätze sei an dieser Stelle auf Ulich (1997) verwiesen. Bei der Implementierung neuer und rechnergestützter Produktionssysteme im Unternehmen stellt dieser fest, dass die Einführung nur dann Erfolg verspricht, „*wenn sie in ein umfassendes Konzept integriert ist, das den Einsatz von Technik, die Gestaltung der Organisation und die Entwicklung der Mitarbeiterqualifikation gemeinsam zu optimieren versucht*“.

Basis für die Feststellung von Ulich ist das sogenannte MTO-Konzept als soziotechnischer Ansatz. Das Konzept sagt aus, dass Mensch, Technik und Organisation in einer gegenseitigen Abhängigkeit stehen und die Kausalität ihres optimalen Zusammenwirkens erfasst werden muss (Ulich, 1997; siehe hierzu auch Wildemann, 1989). Das bedeutet, dass die drei genannten Sub-Elemente keinesfalls isoliert innerhalb des Unternehmens zu betrachten sind, sondern speziell bei der Aufgabenbearbeitung in gegenseitiger Wirkbeziehung stehen. Als Konsequenz hieraus lässt sich ableiten, dass bei der Implementierung einer Industrie 4.0, die zunächst mit technischen Veränderungen in Zusammenhang gebracht wird, auch Mensch und Organisation Berücksichtigung finden müssen.

In der aktuellen Diskussion um die Industrie 4.0 wird die praktische Umsetzung mit einer Vielzahl an Schlüsseltechnologien bzw. Technologiefeldern assoziiert. In der Literatur finden sich hierzu unterschiedliche Aufzählungen und Beschreibungen dieser Begriffe (beispielsweise bei Kagermann, 2014; Blanchet et al., 2014; Bauer et al., 2014), welche nur zum Teil Überschneidungen aufweisen. Eine abschließende und vollumfängliche Abgrenzung der unter den Ansatz von einer Industrie 4.0 fallenden Technologien ist jedoch zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht möglich (Bauer et al., 2014). Aus diesem Grund sollen im Folgenden exemplarisch vermehrt genannte Schlüsseltechnologien und deren Auswirkungen auf die Supply Chain beschrieben werden.

Wie bereits in Kapitel 2.1 dargelegt, sind CPS wesentlich für die Industrie 4.0. Darüber hinaus fallen in diesem Zusammenhang aber auch

Begriffe wie Big Data, Cloud Computing, intelligente Produkte und Maschinen. Grundsätzlich tragen diese technischen Innovationen dazu bei, Menschen, Objekte und Systeme miteinander zu verbinden und schaffen so das selbstorganisierte, unternehmensübergreifende Wertschöpfungsnetzwerk (Plattform Industrie 4.0, 2013). Wie sich dieses Netzwerk im Einzelnen darstellt, ist stark von den beteiligten Unternehmen bzw. deren Branche abhängig (Bauer et al., 2014).

CPS als Basistechnologie verändern zwar die Aufgaben der Maschinen und Anlagen in der Produktion nicht grundlegend, allerdings nimmt ihre Steuerung eine entscheidende Entwicklung; von einem hierarchisch aufgebauten System hin zu einem dezentralen und teilautonomen Kollektiv. Des Weiteren stellt sich auch die Interaktion mit dem Mitarbeiter künftig anders dar. Hierzu werden neue Wege der Kommunikation in Form mobiler Endgeräte, wie beispielsweise Smartphones und Tablets, in die Produktion integriert. Über neuartige Applikationen steht den Mitarbeitern dann eine weit größere Menge an Informationen als bisher in Echtzeit zur Verfügung. Diese beachtliche Datenmenge, die zusätzlich durch intelligente Objekte, die praktische Allgegenwärtigkeit von Sensoren sowie andere Datenproduzenten weiter wächst, erfordert eine geeignete Infrastruktur zur Aggregation und Auswertung. Nur auf diese Weise ist das Unternehmen imstande, die produzierten Rohdaten zu einem Echtzeitbild der Produktion zusammenfügen und für Entscheidungen zu nutzen. Folglich stellt sich für Unternehmen die Frage, inwiefern sie bereits heute diese Infrastruktur und das entsprechende Know-how bereithalten und welche Entwicklungsschritte noch hierhingehend zu vollziehen sind.

Bei der Speicherung der Daten ist derzeit ein Trend zum Cloud Computing erkennbar (KPMG, 2014). Dies bedeutet, dass die Datenspeicherung nicht mehr auf lokalen Rechnern oder Servern erfolgt, sondern auf standortübergreifenden Plattformen. Diese können von den Unternehmen selbst aber auch von Dienstleistern betrieben werden. Auch Anwendungen erfordern künftig keine Installation auf lokalen Rechnern, sondern lassen sich direkt aus der Cloud auf dem Endgerät ausführen (Bauer et al., 2014).

Diese Möglichkeiten setzen aber ebenfalls eine Anpassung der konventionellen Infrastruktur sowie der organisatorischen Ausgestaltung voraus. Vorteilhaft hieran ist, dass insbesondere Unternehmen in stark von Lastschwankungen geprägten Branchen, verhältnismäßig günstig jederzeit Dienste aus der Cloud in Anspruch nehmen können; in Zeiten geringer Auftragslage jedoch keine kostenintensiven Ressourcen unterhalten müssen. Diese Flexibilitätssteigerung bedarf weiterhin einer Qualifizierung der Mitarbeiter und einer gezielten Ausrichtung der Organisation.

Durch den Einsatz der technischen Ansätze der Industrie 4.0 wird die Supply Chain flexibler und transparenter. Auch die Möglichkeiten für die Kunden (personalisierbare) Funktionalitäten zu nutzen, nehmen durch eine ökonomisch realisierbare, individualisierte Massenproduktion zu (Baum, 2013). Voraussetzung ist jedoch eine weit über das heutige Maß hinausgehende Ausweitung des Informationsaustauschs zwischen den Partnern des Wertschöpfungsnetzwerks. Neben der beschriebenen Datenerhebung, -speicherung und -verarbeitung ist außerdem die zuverlässige Datenübermittlung über entsprechende Netzwerke ein entscheidendes Erfolgskriterium. Dies wird anhand der Überlegung deutlich, dass eine gesteigerte Flexibilität nur gezielt eingesetzt werden kann, sofern die Anforderungen in Form von Nachfragedaten genau bekannt sind.

Die veränderte Datenmenge und -verfügbarkeit erfordern gleichzeitig eine neue Art des Umgangs mit diesen Informationen, um das Potenzial von Industrie 4.0 wirklich ausschöpfen zu können. Verfolgte ein Unternehmen bislang etwa eine eher restriktive Informationspolitik gegenüber seinen Lieferanten und Kunden, wird künftig mehr Bedarf zu einer Öffnung bestehen. Nur dann bringt die Industrie 4.0 eine weitreichende Integration der Supply Chain Partner auf der Informationsebene mit neuen Formen der Zusammenarbeit mit sich.

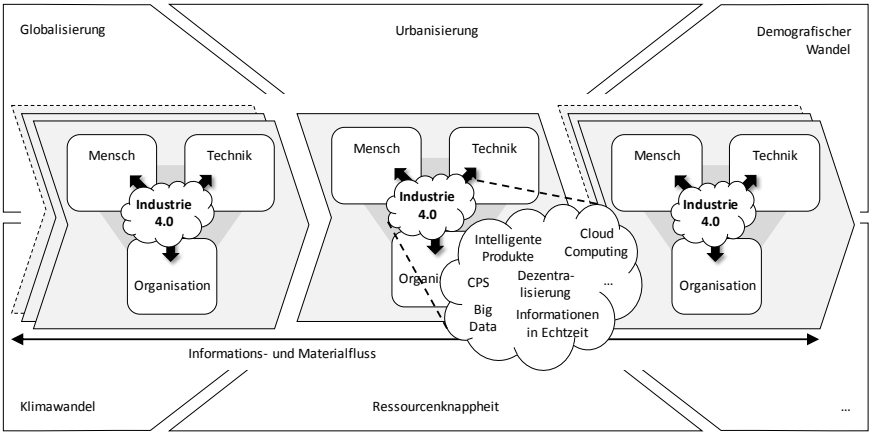


Abbildung 1: Der Einfluss der Industrie 4.0 auf die Supply Chain

Abbildung stellt die Integration der Industrie 4.0 in die Supply Chain zusammenfassend dar. Zum einen veranschaulicht diese die Supply Chain, welche unter Einfluss der verschiedenen Megatrends, wie z. B. Globalisierung, demographischer Wandel oder Ressourcenknappheit, den Informations- und Materialfluss zwischen den einzelnen Akteuren sicherstellen muss. Dem Informationsaustausch kommt hier eine besondere Rolle zu, da dieser durch die im Industrieumfeld neuartigen Technologien deutlich weitreichender sein wird als bisher. Zum anderen verdeutlicht sie, dass die in der Industrie 4.0 eingesetzten Schlüsseltechnologien, wie z. B. Cloud Computing und CPS, einen starken Einfluss auf die Strukturen und Prozesse innerhalb des einzelnen Unternehmens sowie auf die gesamte Supply Chain haben. Hervorzuheben sei hierbei auch ihre Wirkung auf die Bereiche Mensch, Technik und Organisation, die wiederum ihrerseits in Wechselwirkung stehen.

3.2 Neue Herausforderungen für das Supply Chain Management

Die Einführung der Industrie 4.0 stellt nicht nur die Supply Chain vor neue Herausforderungen, sondern auch ihr Management. Mit dem Paradigmenwechsel von einer zentral zu einer dezentral organisierten

Steuerung folgen demnach gleichzeitig Veränderungen für das SCM. Ausgelöst von einer Neuorganisation der Wertschöpfungsprozesse verschwinden mitunter etablierte Branchengrenzen. Als Resultat erwachsen neue, übergreifende Handlungsfelder und bisher unbekannte Kooperationen werden möglich bzw. erforderlich (ten Hompel et al., 2014a). Weitere Aspekte, in denen sich künftige Produktionsstrukturen von den klassischen unterscheiden, sind die Regelung der Verantwortlichkeiten und die rechtlichen Zuständigkeiten (Verein Deutscher Ingenieure, 2014). Dies ist eine Folge der fortschreitenden Integration der Supply Chain Partner und der entstehenden Handlungsfelder bzw. Kooperationen, für die es die Rahmenbedingungen festzulegen gilt.

Als Konsequenz der zunehmenden globalen Verteilung von Produktionsnetzen sind auch die Managementansätze hierfür als wichtige Steuerungselemente zweckgerichtet weiterzuentwickeln (ten Hompel et al., 2014). Die heute häufig noch auf einen Standort gerichtete Betrachtung ist nicht mehr ausreichend und sollte den gesamten Produktionsverbund in einem hohen Detailgrad berücksichtigen. Die zuvor voneinander unabhängigen Teilsysteme sind durch die Technologien der Industrie 4.0 vernetzt, synchronisiert und stehen miteinander in Interaktion. Entsprechend lassen sich Materialflüsse kurzfristig umlenken und flexibel auf eine veränderte Nachfrage oder sonstige Ereignisse reagieren. D. h., dass der Verbund sich managen lässt, wie es in der Vergangenheit nur standortintern denkbar war (Bauer et al., 2014). Die Entscheidungen über Materialflüsse werden dabei aus der Logistik-Cloud als virtuelle Zentrale beeinflusst. Für das SCM ergibt sich damit, dass eine Nutzung von Cloud-basierten Informationstechnologien fester Bestandteil der Arbeitsinhalte wird (ten Hompel et al., 2014a).

Weiterhin wirkt sich die mit der neuen Art der Steuerung einhergehende Trennung von dem normativen und dem operativen Bereich verändernd auf das SCM aus. Durch die an Produktionseinheiten verliehene Autonomie wird es auf operativer Ebene nur noch in sehr geringem Maße erforderlich sein, in den Materialfluss einzugreifen. Folglich trifft das SCM nur noch

übergeordnete Entscheidungen strategischer Art. Möglicherweise werden ferner erheblich weniger bzw. keine detaillierten Layouts oder Ähnliches auf der normativen Ebene hinterlegt, was einen Unterschied zum bisherigen Vorgehen darstellt (ten Hompel et al., 2014). Hieraus lässt sich schließen, dass das SCM als Unternehmensfunktion in der Industrie 4.0 auf operativer Ebene verstärkt kontrollierende Funktionen wahrnehmen und nur auf der normativen Ebene die Entscheidungen aktiv treffen wird.

Des Weiteren ergeben sich Änderungen für die Prognose der Zielerreichung der Systeme. Aufgrund der Selbstständigkeit der Produktionseinheiten wird in Zukunft nur mehr eine statistische Aussage über die Erreichung möglich sein, da eine zentrale Steuerung und damit eine Vorherbestimmung nicht mehr vorliegt (ten Hompel et al., 2014). Dies ist ebenfalls zu berücksichtigen, sollte aber keine erheblichen Auswirkungen auf das Managen der Supply Chain haben.

Änderungspotenzial ergibt sich hingegen bei der Bestandsverwaltung. Ausreichende Sicherheitsbestände sind aufgrund oft nur schwer vorherzusagender Auftragsschwankungen ein wichtiges Instrument, das jedoch einen erheblichen Kapitaleinsatz erfordert. Durch die Möglichkeiten einer Industrie 4.0 können künftig Bestandskosten um 30 bis 40 Prozent reduziert werden, da sich angesichts verlässlicher Echtzeitinformationen die Sicherheitsbestände entscheidend verkleinern lassen (Bauernhansl, 2014). Die Gefahren durch etwa den Bullwhip- oder Burbidge-Effekt, welche als Folge der Auftragsschwankungen auftreten, können somit abgeschwächt werden.

4 Supply Chain Risikomanagement im Kontext der vierten industriellen Revolution

Aus den mit der Industrie 4.0 einhergehenden veränderten Rahmenbedingungen ergeben sich auch neuartige Risiken, von denen im vorliegenden Beitrag zunächst jene in Verbindung mit der Supply Chain fokussiert werden. Im Anschluss wird analysiert, inwiefern sich der Supply

Chain Risikomanagementprozess in der Industrie 4.0 ändert. Abschließend werden erste Lösungsansätze für die Praxis aufgezeigt.

4.1 Kategorisierung aufkommender Risiken in der Supply Chain

Mit dem Zusammenschluss mehrerer Unternehmen zu einer Supply Chain steigt zum einen die Abhängigkeit der Partner untereinander und zum anderen erhöht sich die Anzahl potenzieller Supply Chain Risiken (Singer, 2012). Dabei fallen das Ausmaß und die Folgen je nach Ausgestaltung der vielfältigen Beziehungen unterschiedlich aus.

Zum professionellen Umgang mit möglichen Risiken und ihren negativen Auswirkungen ist ein Risikomanagement von hoher Bedeutung, um die Unternehmensziele realisieren zu können. Allgemein werden Risiken in der Entscheidungstheorie wahrgenommen als Streuung der Verteilung der möglichen Ereignisse, ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit sowie ihres jeweiligen subjektiven Wertes. Demnach kann ein Risiko sowohl eine positive als auch eine negative Abweichung vom Erwartungswert bedeuten. Da das Risiko ein Resultat der Unsicherheit zukünftiger Ereignisse, d. h. der Risiko- bzw. Unsicherheitsquellen, darstellt, wird diese Perspektive auch als ursachenbezogene Sichtweise bezeichnet (Gabler-Wirtschaftslexikon, 2004, S. 2562). Unsicherheit im weiteren Sinne umfasst sowohl Risiko als auch Ungewissheit bzw. Unsicherheit im engeren Sinne. Weiterhin kann zwischen „messbarer" und „nicht messbarer" Unsicherheit differenziert werden (Knight, 1921, S. 20). Im Gegensatz zur ursachenbezogenen legt die wirkungsbezogene Sichtweise den Schwerpunkt auf die Risikofolgen. Hier wird Risiko als „Möglichkeit der Zielverfehlung" interpretiert (Braun, 1984, S. 23). In der Betriebswirtschaftslehre wird damit ein potenzieller Schaden bzw. Verlust unterstellt, der zu einer negativen Zielabweichung im Unternehmen führen kann. Der vorliegende Beitrag definiert den Begriff Risiko als ein Produkt der Eintrittswahrscheinlichkeit eines negativen Ereignisses und der zu erwartenden Schadenshöhe (Holzbaur, 2001; Diederichs, 2004).

Risiken in der Supply Chain zu erkennen und abzuwenden, ist ein maßgeblicher Erfolgsfaktor für Unternehmen. Die durch eine Industrie 4.0 neu aufkommenden Risiken gilt es daher, in gleicher Weise vollständig zu identifizieren und ihnen mit entsprechenden Maßnahmen zu begegnen, um die Vision erfolgreich umsetzen zu können (Schmitt, 2014). Zur systematischen Erfassung und Betrachtung lassen sich Risiken in unterschiedliche Kategorien untergliedern. Eine Auflistung verschiedener Systematisierungen von Supply Chain Risiken findet sich beispielsweise bei Kersten et al. (2011). Für die vorliegende Betrachtung soll der Kategorisierung von Christopher et al. (2004) Folge geleistet werden. Diese wird häufig in der Literatur aufgrund ihrer spezifischen Ausrichtung auf Risiken in der Supply Chain herangezogen und ist gemeinhin akzeptiert. Die Kategorieneinteilung erfolgt hier nach den fünf möglichen Quellen der Risiken: Beschaffung, Prozess, Steuerung, Nachfrage und Umfeld (siehe weiterführend Christopher, 2011).

In der Literatur finden sich in Bezug auf Risiken in der Supply Chain durch die Industrie 4.0 keine umfassenden Aufstellungen oder Diskussionen. Lediglich einige Risiken im allgemeinen Kontext einer Industrie 4.0 und deren Implementierung werden aufgeführt. Daher wurden die genannten Risiken im Hinblick auf die fünf Kategorien nach Christopher et al. analysiert und weitestgehend eingeordnet. Darüber hinaus erfolgte einer Ergänzung zusätzlicher Risiken in diesen Kategorien, die aus Diskussionen mit Experten stammten (siehe Abbildung).

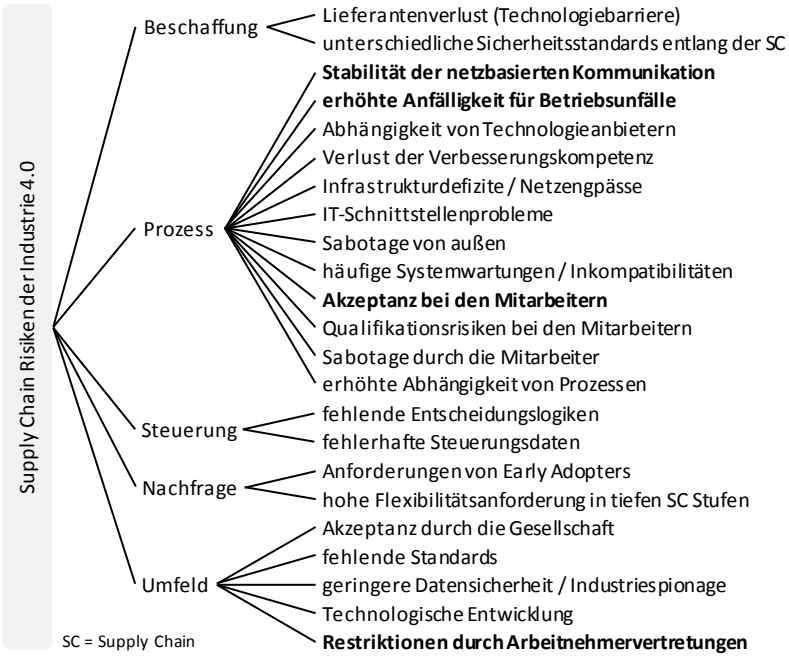


Abbildung 2: Supply Chain Risiken der Industrie 4.0

Die hier angeführte Aufzählung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und liefert lediglich vereinzelte praxisorientierte Ansätze. Im Folgenden werden die in der Abbildung 2 hervorgehobenen Risiken exemplarisch beschrieben.

Die *Stabilität der netzbasierten Kommunikation* stellt ein erhebliches Risiko für den Prozess dar. Durch die rapide ansteigende Menge an Daten und deren Notwendigkeit für die Entscheidungsprozesse, bildet die Breitbandkommunikation das Rückgrat der Industrie 4.0. Daher gilt es für eine zuverlässige Supply Chain, höchste Verfügbarkeiten der Anlagen zu erzielen und maximale Sicherheit der Netze gegenüber Angriffen zu erreichen (Bauer et al., 2014).

Weiterhin ist die Sicherheit der Belegschaft ein entscheidender Punkt, um eine funktionierende Supply Chain zu ermöglichen. Diese könnte jedoch beispielsweise durch die Entscheidungsautonomie der Transportsysteme und einer folglich *erhöhten Anfälligkeit für Betriebsunfälle* gefährdet sein (Liggesmeyer et al., 2014). Hieraus entsteht ein mögliches Prozessrisiko.

Des Weiteren dürfen auch in der Industrie 4.0 die Mitbestimmungsrechte der Belegschaft nicht ignoriert werden, da sie die Basis für die *Akzeptanz bei den Mitarbeitern* bilden (Bauer et al., 2014). Das Prozessrisiko, das hieraus erwächst, begründet sich in der zwingend erforderlichen Unterstützung der Mitarbeiter, bei dem Ziel eine effiziente und stabile Supply Chain zu gestalten. Analog ist es aber auch erforderlich, *Restriktionen durch die Arbeitnehmervertretungen* mithilfe eines frühzeitigen Dialogs vorzubeugen und somit das Umfeldrisiko zu reduzieren. Anlass für restriktive Maßnahmen könnten beispielsweise ein befürchteter Beschäftigungsabbau oder forcierte Arbeitszeitflexibilisierungen sein (Kurz, 2013).

Aus Platzgründen können die weiteren Risiken an dieser Stelle nicht im Detail behandelt werden. Generell aber gilt, dass die Frage nach Risiken in der Supply Chain unternehmensspezifisch beantwortet werden sollte, da diese je nach Ausgestaltung der Supply Chain, der Branche sowie situativen Aspekten verschieden sein können. Zusätzlich ist eine zeitliche Komponente der Risiken zu beachten. Je nach Umsetzungsgrad können die Risiken in der Supply Chain unterschiedliche Eintrittswahrscheinlichkeiten und -höhen aufweisen. Beispielsweise ist zu erwarten, dass die Qualifikationsrisiken insbesondere in den Anfängen der Industrie 4.0 verstärkt eintreten und deren Folgen weitreichender sein können als zu einem späteren Zeitpunkt. Gleiches gilt für das Risiko fehlender Standards, für das sich mit der Zeit allgemein akzeptierte Lösungen manifestieren werden.

4.2 Auswirkungen auf den Supply Chain Risikomanagementprozess

Um einen systematischen Umgang mit ermittelten Risiken in der Supply Chain sicherzustellen, sollte ein Supply Chain Risikomanagementprozess etabliert werden. Dieser Kreislauf setzt sich, wie Abbildung 3 verdeutlicht,

aus den vier Phasen Risikoidentifikation, -bewertung, -steuerung sowie Risikokontrolle zusammen (Kersten et al., 2011).

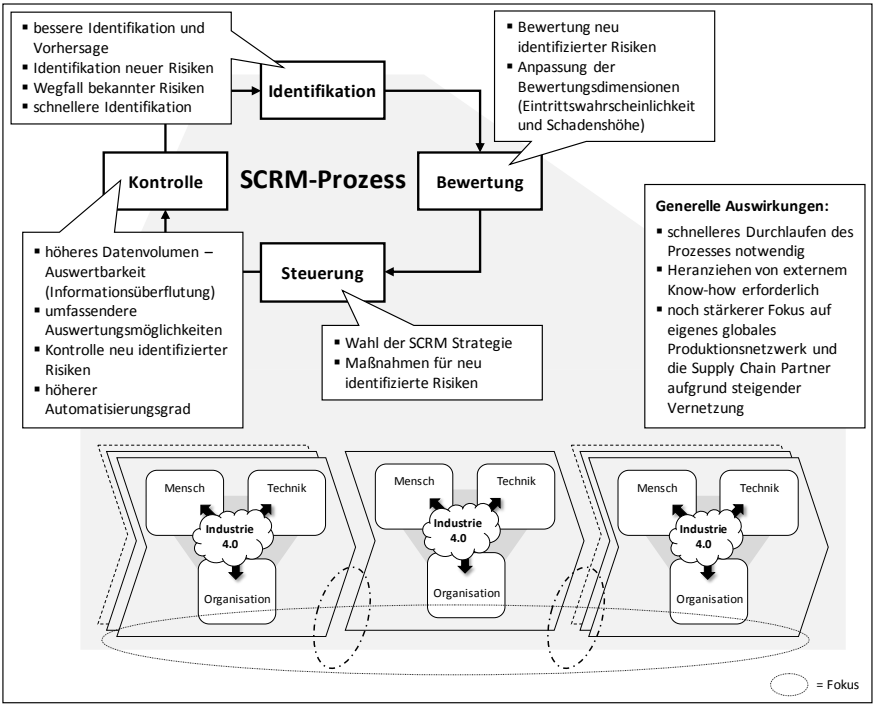


Abbildung 3: Risikomanagement entlang der Supply Chain in der Industrie 4.0

Im Rahmen der *Risikoidentifikation* erfolgt zunächst die Ermittlung der Supply Chain Risiken. Hier können verschiedene Risikokategorien bei der Ermittlung bzw. der Strukturierung von Risiken unterstützen (Eberle, 2008). Unter den veränderten Rahmenbedingungen in der Industrie 4.0 kommt es dabei im Vergleich zur Supply Chain im klassischen Sinne zu zahlreichen Veränderungen: Durch die neuen Schlüsseltechnologien steht eine wesentlich größere Menge an Informationen als bisher in Echtzeit zur Verfügung, die es auszuwerten gilt. Hierdurch ist mithilfe der vorliegenden umfassenden Datenbasis zum einen eine einfachere und schnellere Identifikation möglich, zum anderen können Risiken und ihre Auswertungen

auch genauer vorhergesagt werden. Durch die neue Infrastruktur entstehen Risiken an den multimodalen Mensch-Maschine-Schnittstellen, die es so bislang im klassischen Ablauf nicht gab. Die selbststeuernden logistischen Prozesse können z. B. zu einer erhöhten Anfälligkeit für Betriebsunfälle führen. Anderseits können altbekannte Risiken, wie z. B. die Verzögerung im Produktionsablauf durch eine detaillierte Prognosemöglichkeit reduziert werden.

In einem zweiten Prozessschritt, der *Risikobewertung*, werden die zuvor identifizierten Supply Chain Risiken beurteilt und bewertet, indem jeweils die Eintrittswahrscheinlichkeit und der potenzielle Schaden bestimmt werden. Neben den klassischen Supply Chain Risiken müssen die in der Industrie 4.0 entstehenden neuen Risiken zusätzlich bewertet werden. Aufgrund der Vielzahl an vorliegenden Daten, die sich über die gesamte Supply Chain erstrecken, können einerseits die Eintrittswahrscheinlichkeiten sowie der potenzielle Schaden genauer prognostiziert werden. Andererseits sind ggf. neue Bewertungsverfahren zu entwickeln, um die Komplexität der möglichen Szenarien zu handhaben. Auch eine Anpassung der Bewertungsdimensionen (Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadenshöhe) ist vorstellbar.

Der dritte Prozessschritt, die *Risikosteuerung*, beinhaltet die Festlegung von Supply Chain Strategien und Maßnahmen zum Umgang mit den zuvor identifizierten Supply Chain Risiken (Kersten et al., 2011). Zwar ist auch in der Industrie 4.0 weiterhin zwischen der Vermeidung oder Verminderung des Risikos (ursachenbezogen) bzw. zwischen der Risikobegrenzung, -teilung oder dem -selbsttragen (wirkungsbezogen) zu differenzieren (Pfohl, 2008), allerdings müssen die in diesem Zusammenhang zu treffenden Maßnahmen an die neuen Rahmenbedingungen angepasst werden. Eine detaillierte Erläuterung hierzu folgt in Kapitel 4.3.

In einem vierten Prozessschritt, der *Risikokontrolle*, erfolgt abschließend eine Überprüfung der getroffenen Maßnahmen hinsichtlich ihrer Effektivität und ihrer Effizienz. Durch die neuen Schlüsseltechnologien liegt ein höheres Datenvolumen vor, welches für die Auswertung herangezogen werden

kann. Zwar ermöglicht dies einerseits umfassendere Auswertungsmöglichkeiten, andererseits kann es durch die Vielzahl der Daten, die nicht alle von Relevanz sind, zu einer sogenannten „Informationsüberflutung“ kommen, welche die Komplexität des Kontrollprozesses erhöht. Hingegen ist die regelmäßige Übermittlung der relevanten Daten mit einem höheren Automatisierungsgrad verbunden, welcher den Austausch zwischen den einzelnen Akteuren erleichtert.

Allgemein sollte der SCRM-Prozess iterativ durchlaufen werden, da sich stets Veränderungen in der Risikolandschaft ergeben können (Eberle, 2008). Durch die mit der Industrie 4.0 verbundenen neuen Rahmenbedingungen wird ein schnelleres Durchlaufen des Prozesses erforderlich sein, da relevante Daten innerhalb kürzester Zeit ausgetauscht und Veränderungen schon weit im Voraus prognostiziert werden können.

Zudem wird in einzelnen Prozessschritten des SCRM das Heranziehen von externen Know-how-Trägern notwendig sein, da die neu einzusetzenden Instrumente und Techniken hohe fachliche Anforderungen an die Mitarbeiter stellen, die es innerhalb kürzester Zeit umzusetzen gilt.

Das SCRM wird zudem in der Industrie 4.0 eine umfassende Ausweitung sämtlicher Prozessschritte auf die gesamte Supply Chain erfahren, da die globale Vernetzung zwischen den Supply Chain Partnern weiter steigen wird.

4.3 Lösungsansätze für die betriebliche Praxis

Aufgrund der verschiedenartigen neuen Risiken, die mit der Industrie 4.0 die Supply Chain beeinflussen können, ist eine Überarbeitung der bislang getroffenen klassischen Maßnahmen bzw. eine Ergänzung um weitere erforderlich. Tabelle 1 fasst exemplarisch einige Maßnahmen zusammen, die in Bezug auf die in Kapitel 4.1 identifizierten und klassifizierten Risiken getroffen werden können.

Tabelle 1: Maßnahmen zum Management von Supply Chain Risiken in der Industrie 4.0

Beschaffung	
Lieferantenverlust (Technologiebarriere)	• Frühzeitige Informationsverbreitung an Lieferanten über geplante technologische und strukturelle Änderungen • Einfordern von Nachweisen über Implementierung
Unterschiedliche Sicherheitsstandards entlang der Supply Chain	• Etablieren einheitlicher Standards in Zusammenarbeit mit den Hauptakteuren / Branchenverbänden der Supply Chain
Verlust von Verhandlungsmacht gegenüber Zulieferern	• Berücksichtigung technologischer Anforderungen bei der Supply Chain Gestaltung • Vertragliche Regelungen
Prozess	
Stabilität der netzbasierten Kommunikation	• Regelmäßige Überprüfung der Kommunikations-netze (Belastbarkeitstest, Anfälligkeiten, etc.) • Redundante Ausführung
Erhöhte Anfälligkeit für Betriebsunfälle	• Regelmäßige Mitarbeiterschulungen zur Arbeits- und Betriebssicherheit • Etablieren von Sicherheitsstandards in die Unternehmenskultur
Abhängigkeit von Technologieanbietern	• Einstellen bzw. Schulung eigener Mitarbeiter mit entsprechenden Fachkenntnissen
Verlust der Verbesse-rungskompetenzen	• Regelmäßige Mitarbeiterschulungen zur Methodenkompetenz
Infrastrukturdefizite / Netzengpässe	• Erarbeitung von Alternativlösungen • Zukunftssichere Dimensionierung der Infrastruktur
IT-Schnittstellenprobl.	• Etablieren von Standards
Sabotage von außen	• Erhöhung und regelmäßige Überprüfung der technischen Standards
Häufige Systemwartungen / Inkompatibilitäten	• Regelmäßige Systemwartung und Erarbeitung von Alternativlösungen • Konzepte zur störungsarmen Wartung entwickeln

Akzeptanz bei den Mitarbeitern	• Motivationssteigerung durch gezielte Anreizsetzung, z. B. Aufstiegschancen durch Weiterbildung • Einbindung der Mitarbeiter in die Ausgestaltung
Qualifikationsrisiken bei den Mitarbeitern	• Rechtzeitige und regelmäßige Weiterbildung der Mitarbeiter
Sabotage durch die Mitarbeiter	• Anreizgestaltung, Mitarbeitermotivation • Kontrollmechanismen, um Missbrauch vorzubeugen
Erhöhte Abhängigkeit von Prozessen	• Entkoppelung von Prozessen und Aufbau von Puffern
Steuerung	
Fehlende Entscheidungslogiken	• Themenspezifische Managementschulungen (z. B. zum Risiko- und Komplexitätsmanagement, IT) • Vollständige Erprobung in Pilotanwendungen
Fehlerhafte Steuerungsdaten	• Entwicklung geeigneter Prüfalgorithmen • Vorsehen von Notfallstrategien
Erhöhte Komplexität	• Modularisierung der zu steuernden Prozesse
Nachfrage	
Anforderungen von Early Adopters	• Frühzeitiges Einbinden der Early Adopters in den Veränderungsprozess • Regelmäßiger Erfahrungsaustausch
Hohe Flexibilitäts-anforderungen in tiefen Supply Chain Stufen	• Frühzeitige Ermittlung der Flexibilitätsbedarfe • Strenge Verfolgung der Marktentwicklung und Kommunikation an Lieferanten und Kunden
Umfeld	
Akzeptanz durch die Gesellschaft	• Kommunikation der mit Industrie 4.0 verbundenen Vorteile auf Veranstaltungen • Interessenvertretungen die Aufgabe für den Dialog mit Stakeholdern übertragen
Fehlende Standards	• Erarbeitung einheitlicher Standards innerhalb der Branche durch Arbeitskreise • Thematisierung in den Branchenverbänden
Geringe Datensicherheit / Industriespionage	• Erhöhung der Sicherheitseinstellungen (Virenprogramme, Passwörter, etc.) • Konsultation externer Dienstleister • Nur notwendige Daten austauschen
Technologische Entwicklung	• Eingehen von Technologie-Partnerschaften • Diversifikation bei technologischen Systemen

Restriktionen durch Arbeitnehmer-vertretungen	• Einbeziehen der Interessengruppen in Veränderungsprozess

Die in Tabelle 1 gelisteten Aspekte zeigen, dass mit der Umstellung auf die Industrie 4.0 umfassende Maßnahmen im technischen Bereich erforderlich sind, um neben einer sicheren Kommunikation auch die Korrektheit, Vollständigkeit und rechtzeitige Verfügbarkeit der Daten zu gewährleisten.

Neue methodische und technologische Ansätze sind nötig, mit deren Hilfe Informations- und Kommunikationstechniksysteme prüfbar, kontrollierbar und die damit verbundenen Risiken erfassbar sowie quantifizierbar werden. Die Entwicklung neuer Sicherheitstechnologien, die einerseits den Anforderungen vernetzter und eingebetteter Systeme gerecht werden und andererseits robuster und resistenter gegen Internet-basierte Angriffe sind, erscheinen unabdingbar (Fallenbeck et al., 2014).

Bei der Wahl der Maßnahmen sowie bei der Entwicklung neuer Ansätze sollte jedoch sichergestellt sein, dass das in Kapitel 3.1 beschriebene MTO-Konzept hinreichend Berücksichtigung findet. Neben den technischen und organisatorischen Aspekten sollte vor allem der Mitarbeiter in die Umstellung auf die Industrie 4.0 eingebunden werden, um einen langfristigen Erfolg sicherzustellen.

Darüber hinaus sei darauf hingewiesen, dass bei der Wahl der Maßnahmen der Stand des Implementierungsprozesses zu berücksichtigen ist. Die Risiken, die in der Einführungsphase auftreten können, unterscheiden sich deutlich von denen eines stabilen Betriebes.

5 Fazit

Ziel des vorliegenden Beitrags war es, die Auswirkungen der Industrie 4.0 auf das Supply Chain Risikomanagement zu analysieren und erste Lösungsansätze für die Praxis aufzuzeigen.

Die Einführung in das Thema Industrie 4.0 hat gezeigt, wie durch die Verbindung von Menschen, Objekten und Systemen dynamische, echtzeitoptimierte und selbst organisierende, unternehmensübergreifende Wertschöpfungsnetzwerke entstehen, welche Auswirkungen auf die gesamte Supply Chain haben. Durch den Einsatz von Schlüsseltechnologien bzw. neuen Technologiefeldern, wie z. B. cyber-physische Systeme oder Cloud Computing wird die Supply Chain transparenter und flexibler. Gleichzeitig erfordert die damit verbundene Verfügbarkeit und Menge der Daten in Echtzeit neue Infrastrukturen sowie einen angepassten Umgang mit den Informationen. Das Supply Chain Management wird vor neue Herausforderungen gestellt, da es neben dem Entstehen neuer Handlungsfelder und der Selbstständigkeit der Produktionseinheiten unter anderem zu einer Verlagerung der Entscheidungskompetenzen kommt. Wichtige Steuerungselemente sind zweckgerichtet weiterzuentwickeln, bei dem der hohe Detailgrad ausreichend Berücksichtigung findet.

Die Betrachtung des Themenfeldes Supply Chain Risikomanagement vor dem Kontext der Industrie 4.0 hat ergeben, dass mit den neuen Rahmenbedingungen eine Vielzahl neuartiger Risiken verbunden ist. Diese Risiken wurden anhand der von Christopher et al. (2004) entwickelten Kategorien erfasst und anschließend analysiert. Neben verschiedenen Beschaffungs-, Nachfrage-, Steuerungs- und Umfeldrisiken wurde deutlich, dass in der Industrie 4.0 insbesondere Prozessrisiken vermehrt auftreten. Auch die Inhalte und der Ablauf des Supply Chain Risikomanagement-prozesses werden sich in der Industrie 4.0 verändern, was nicht zuletzt auf die Verfügbarkeit an Echtzeitdaten zurückzuführen ist. Neben einem schnelleren Durchlaufen der einzelnen Prozessschritte ist zudem eine Anpassung bestehender Instrumente und Maßnahmen erforderlich. Zuletzt wurden im Rahmen des vorliegenden Beitrags erste Lösungsvorschläge für die zuvor identifizierten Supply Chain Risiken erarbeitet, die es in Zukunft noch weiter auszubauen gilt. Es kann jedoch zusammenfassend festgehalten werden, dass bei der Wahl der Maßnahmen die technische Komponente eine wichtige Rolle spielt. Jedoch sollte vor allem der eigene Mitarbeiter

rechtzeitig in die Ausgestaltung der Prozesse einbezogen werden, um die Akzeptanz und den langfristigen Unternehmenserfolg zu gewährleisten.

Literatur

Bauer, W. / Schlund, S / Marrenbach, D. (2014). Industrie 4.0: Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland. Studie. Hg. v. Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM) und Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO). Abgerufen am 11.05.2014, unter http://www.bitkom.org/files/documents/Studie_Industrie_4.0.pdf.

Bauernhansl, T. (2014). Einführung von Industrie 4.0 in Produktionssysteme: Komplexität bewirtschaften. In: mav maschinen anlagen verfahren (4), S. 64.

Baum, G. (2013). Innovationen als Basis der nächsten Industrierevolution. In: Sendler, U. (Hg.): Industrie 4.0: Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM (S. 37-53). Berlin, Heidelberg: Springer.

Blanchet, M. et al. (2014). Industry 4.0: The new industrial revolution - How Europe will succeed. Hg. v. Roland Berger Strategy Consultants GmbH. München. Abgerufen am 11.05.2014, unter http://www.rolandberger.com/media/pdf/Roland_Berger_TAB_Industry_4_0_2014 0403.pdf.

Braun, H. (1984). Risikomanagement: Eine spezifische Controllingaufgabe. Darmstadt: Toeche-Mittler.

Bullinger, H.-J. / ten Hompel, M. (2007). Internet der Dinge. Berlin, Heidelberg: Springer.

Christopher, M. (2011). Logistics & Supply Chain Management. Harlow: Financial Times Prentice Hall.

Christopher, M. / Peck, H. (2004). Building the Resilient Supply Chain. In: The International Journal of Logistics Management, 15 (2), S. 1-13.

Diederichs, M. (2004). Risikomanagement und Risikocontrolling: Risikocontrolling - ein integrierter Bestandteil einer modernen Risikomanagement-Konzeption. München: Vahlen.

Eberle, A. O. (2008). Risikomanagement in der Beschaffungslogistik: Gestaltungsempfehlungen für ein System. Bamberg: Difo-Druck.

Erdmann, M.-K. (2013). Supply Chain Performance Measurement: Operative und strategische Management- und Controllingansätze. Lohmar, Köln: Josef Eul.

Fallenbeck, N. / Eckert, C. (2014). IT-Sicherheit und Cloud Computing. In: ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T. (Hg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung – Technologien – Migration (S. 397-431). Wiesbaden: Springer.

Feld, T. / Hoffmann, M. / Schmidt, R. (2012). Industrie 4.0: Vom intelligenten Produkt zur intelligenten Produktion. In: Information Management & Consulting (3), S. 38-42.

Gabler-Wirtschaftslexikon (2004). Betriebswirtschaft, Volkswirtschaft, Recht, Steuern. Wiesbaden: Gabler.

Geisberger, E. / Broy, M. (2012). agendaCPS: Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems. Berlin, Heidelberg: Springer.

Holzbaur, U. (2001). Management. Ludwigshafen (Rhein): Kiehl.

Kagermann, H. (2014). Cybersicherheit und Industrie 4.0. Potsdamer Konferenz für Nationale Cybersicherheit. Hasso-Plattner-Institut. Potsdam. Abgerufen am 30.05.2014, unter http://www.tele-task.de/archive/video/flash/23855/.

KPMG (2014). Cloud-Monitor 2014: Cloud-Computing in Deutschland – Status quo und Perspektiven. Studie. KPMG AG in Zusammenarbeit mit dem Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM). Abgerufen am 30.04.2014, unter http://www.bitkom.org/files/documents/ Cloud_Monitor_2014_KPMG_Bitkom_Research.pdf.

Kersten, W. et al. (2011). A supply chain risk management process. In: International Journal of Logistics Systems and Management 8 (2), S. 152-166.

Knight, F. H. (1921). Risk, uncertainty and profit. Boston, New York: Houghton Mifflin.

Kurz, C. (2013). Bessere Arbeit in der Industrie 4.0?!: Risiken, Chancen & Gestaltungsbedarf. IG Metall Forum am 01.10.2013. Erlangen. Abgerufen am 13.05.2014, unter http://netkey40.igmetall.de/homepages/erlangen/hochgeladene dateien/2013/IGM%20Forum/industrie%2040/IG_Metall_Forum_Kurz.pdf.

Larson, P. D. / Poist, R. F. / Halldórsson, Á. (2007). Perspectives on Logistics vs. SCM: a Survey of SCM Professionals. In: Journal of Business Logistics 28 (1), S. 1-24.

Liggesmeyer, P. / Trapp, M. (2014). Safety: Herausforderungen und Lösungsansätze. In: ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T. (Hg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung – Technologien –Migration (S. 433-450). Wiesbaden: Springer.

Mentzer, J. T. et al. (2001). Defining Supply Chain Management. In: Journal of Business Logistics 22 (2), S. 1-25.

Pfohl, H.-C. (2008). Sicherheit und Risikomanagement in der Supply Chain: Gestaltungsansätze und praktische Umsetzung. Hamburg: DVV Media Group.

Plattform Industrie 4.0 (2013). Was Industrie 4.0 (für uns) ist. Abgerufen am 11.05.2014, unter http://www.plattform-i40.de/blog/was-industrie-40-f%C3%BCr-uns-ist.

Schlick, J. / Stephan, P. / Zühlke, D. (2012). Produktion 2020: Auf den Weg zur 4. industriellen Revolution. In: Information Management & Consulting 27 (3), S. 26-34.

Schmitt, R. (2014). Kollaborative CPPS: Ausbruch aus der Produktivitätsfalle. Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium. Abgerufen am 30.05.2014, unter http://www.awk-aachen.de/__C1257B97002C1799.nsf/html/de_e24b4064a36f32bcc1257c7300436f3e.html.

Singer, C. (2012). Flexibilitätsmanagement zur Bewältigung von Unsicherheit in der Supply Chain. Lohmar: Josef Eul.

Spath, D. (2013). Produktionsarbeit der Zukunft: Industrie 4.0. Studie. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation. Stuttgart: Fraunhofer.

Stock, J. R. / Lambert, D. M. (2001). Strategic logistics management. Boston: McGraw-Hill/Irwin.

ten Hompel, M. / Henke, M. (2014). Logistik 4.0. In: ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T. (Hg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung – Technologien – Migration (S. 615-624). Wiesbaden: Springer.

ten Hompel, M. / Kirsch, C. / Kirks, T. (2014a). Zukunftspfade der Logistik: Technologien, Prozesse und Visionen zur vierten industriellen Revolution. In: Schuh,

G.; Stich, V. (Hg.): Enterprise-Integration: Auf dem Weg zum kollaborativen Unternehmen (S. 203-213). Berlin, Heidelberg: Springer.

ten Hompel, M. / Vogel-Heuser, B. / Bauernhansl, T. (2014b). Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung – Technologien –Migration. Wiesbaden: Springer.

Ulich, E. (1997). Mensch-Technik-Organisation: ein europäisches Produktionskonzept. In: Strohm, O.; Ulich, E. (Hg.): Unternehmen arbeitspsychologisch bewerten: Ein Mehr-Ebenen-Ansatz unter besonderer Berücksichtigung von Mensch, Technik und Organisation (S. 5-17). Zürich: vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich.

Vahrenkamp, R. / Kotzab, H. / Siepermann, C. (2012). Logistik: Management und Strategien. München: Oldenbourg.

Verein Deutscher Ingenieure (2014). Industrie 4.0: Wertschöpfungsketten. Statusreport. Abgerufen am 11.05.2014, unter http://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/gma_dateien/VDI_Industrie_4.0_Wertschoepfungsketten_2014.pdf.

Wildemann, H. (1989). Personalaspekte bei der Einführung neuer Technologien in Produktion und Logistik. In: Bühner, R. (Hg.): Personalentwicklung für neue Technologien in Produktion und Büro: Personalleiterhandbuch (S. A2 1-100). St. Gallen: gfmt.

Der Mensch und Industrie 4.0

Industrie 4.0 – Die Rolle des Menschen in der vierten industriellen Revolution

Uwe Dombrowski, Christoph Riechel, Maren Evers

Chancen zur Bewältigung des Fachkräftemangels in KMU durch die Urbane Produktion von morgen

Dominik T. Matt, Erwin Rauch

Integration von Lösungskompetenz operativer Mitarbeiter des Shop-Floors in die Produktionsplanung und -steuerung

Lukas Lingitz, Philipp Hold, Robert Glawar, Wilfried Sihn

Umgang mit Paradoxien von Industrie 4.0 – Die Bedeutung reflexiven Arbeitshandelns

Uta Wilkens, Thomas Süße, Bernd-Friedrich Voigt

Humanzentrierte Entscheidungsunterstützung in intelligent vernetzten Produktionssystemen

Egon Müller, Ralph Riedel

Erweiterung einer kognitiven Architektur zur Unterstützung der Mensch-Roboter-Kooperation in der Montage

Christopher M. Schlick, Marco Faber, Sinem Kuz, Jennifer Bützler

Industrie 4.0 – Die Rolle des Menschen in der vierten industriellen Revolution

Uwe Dombrowski, Christoph Riechel, Maren Evers

1 Die Rolle des Menschen in der industriellen Entwicklung

Der Industriestandort Deutschland zählt zu den wettbewerbsfähigsten Standorten weltweit. Die Gründe hierfür liegen in der Fähigkeit komplexe industrielle Abläufe weltweit zu planen, umzusetzen und zu betreiben. Unterstützt wird diese Fähigkeit durch die kontinuierliche und erfolgreiche Weiterentwicklung der Informations- und Kommunikationstechnologie. (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013, S. 17) Die Ursprünge der bisherigen Erfolgsgeschichte des Standortes Deutschland liegen in der Industrialisierung und den damit einhergehenden industriellen Revolutionen. In der Literatur werden unterschiedliche Verständnisse für industrielle Revolutionen geschaffen. Zum einen können industrielle Revolutionen eine auf wenige Jahrzehnte begrenzte Periode von beschleunigtem Wirtschaftswachstum sein. Zum anderen werden technische Innovationen und der Durchbruch des Fabriksystems als industrielle Revolutionen definiert und bilden die Grundlage für die folgenden Ausführungen. (Hahn, 2011, S. 51) Die technischen Innovationen haben Auswirkungen auf alle Ebenen und Funktionsbereiche eines Arbeitssystems. (Wiendahl, Reichardt, & Nyhuis, 2009, S. 8) Neben den technischen und organisatorischen Auswirkungen wird auch der Mensch im Arbeitssystem beeinflusst. Als Reaktion auf diese Veränderungen wurden seit der Entstehung des Forschungsfeldes Arbeitswissenschaft eine Vielzahl von Modellen, Methoden und Werkzeugen entwickelt, um den technologischen Veränderungen zu begegnen. (Schlick, Bruder, & Luczak, 2010) Es stellt sich im Rahmen der 4. Industriellen Revolution die Frage, welche Veränderungen des Arbeitssystems entstehen und, wie sich diese auf die Arbeitsperson auswirken. Um dies zu prüfen, werden mit einem Blick in die Vergangenheit zunächst wesentliche Trends und Veränderungen

der vergangenen Revolutionen identifiziert. Der Blick in die Vergangenheit endet mit einem Ausblick auf die Rolle des Menschen im Arbeitssystem 4.0 und verdeutlicht, welche Chancen sowie Risiken damit verbunden sind.

Beginnend mit der *1. Industriellen Revolution* wurde das Zeitalter der Industrialisierung eingeleitet. Durch Mechanisierung, die Nutzung der Wärmekraft und die Optimierung des Wirkungsgrads der Dampfmaschine durch James Watt im Jahr 1769 begann die Planung und Umsetzung von Fabriken unabhängig von Naturenergieformen. (Ziegler, 2005), (Dombrowski, Schmidtchen, & Hoesslin, 2012), (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013, S. 17)

Die *2. Industrielle Revolution* zu Beginn des 20. Jahrhunderts zeichnet sich durch die Inbetriebnahme der ersten Fließbänder aus. Den Grundstein zu dieser Entwicklung legte Thomas Alva Edison mit der Entwicklung des Dynamos als Stromgenerator. Diese Elektrifizierung ermöglichte erstmals die flexible Verortung von Anlagen in der Fabrik. (Ziegler, 2005), (Dombrowski, Schmidtchen, & Hoesslin, 2012), (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013, S. 17)

Die *3. Industrielle Revolution* basiert auf der Weiterentwicklung der Elektronik und Informationstechnologie sowie dessen stetiger Leistungssteigerung. Basierend auf dieser Technologie wurde es erstmals möglich, komplexe Automatisierungslösungen und die weltweite Vernetzung von Kooperations- in Produktionsnetzwerken zu koordinieren. (Ziegler, 2005), (Dombrowski, Schmidtchen, & Hoesslin, 2012), (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013, S. 17)

Neben den allgemeinen industriellen Revolutionen kann eine weitere Zeitlinie der Revolutionen in der Automobilindustrie differenziert werden.

Als *1. Industrielle Revolution in der Automobilindustrie* gilt die Einführung der Fließfertigung sowie des Taylorismus. Durch Standardisierung, Anordnung der Arbeiter und Werkzeuge in der Verbaureihenfolge sowie die Einführung von Transport- und Montagebändern gelang Ford die

Großserienproduktion bei deutlicher Zeit- und Kostenersparnis. (Womack, Jones, & Roos, 1991, S. 30ff)

Die Entwicklung des Toyota Produktionssystems (TPS) wird als die *2. Revolution in der Automobilindustrie* bezeichnet. Mittels der Einführung des TPS gelang es, trotz standardisierter Prozesse eine hohe Variantenvielfalt und geringe Bestände zu erzielen. (Womack, Jones, & Roos, 1991, S. 83) Das TPS war Vorbild für die Lean Production. Als Weiterentwicklung der Lean Production gelten in Deutschland Ganzheitliche Produktionssysteme (GPS). (Ohno, 1988), (VDI 2870-1, 2012, S. 2) GPS haben ihren Ursprung in den 1990er Jahren und enthalten neben Methoden, die direkt den Ideen der Lean Production entstammen, auch Elemente, die dem Taylorismus oder Konzepten innovativer Arbeitsformen zuzuordnen sind (VDI 2870-1, 2012, S. 2). Ein Ganzheitliches Produktionssystem stellt in diesem Zusammenhang ein Regelwerk zur umfassenden und durchgängigen Gestaltung der Produktion dar. (VDI 2870-1, 2012, S. 5)

Als mögliche *3. Revolution in der Automobilindustrie* werden unterschiedliche Themen diskutiert. Zum einen wird die Digitale Fabrik als eine mögliche 3. Revolution vorgestellt. (Haller & Schiller, 2002) Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Regelwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen. (Bracht, Geckler, & Wenzel, 2011, S. 9ff), (Dombrowski, Tiedemann, & Bothe, 2001, S. 97) Zum anderen bezeichnet Hüttenrauch et. al. den Umgang mit einer hohen Variantenvielfalt über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg als dritte automobile Revolution. (Hüttenrauch & Baum, 2008, S. 19)

Den GPS steht der technologiegetriebene Ansatz des Computer Integrated Manufacturing (CIM) gegenüber. Dieser Ansatz entspringt aus der dritten industriellen Revolution und entstand aus der Idee, Softwarelösungen in der Produktion in Netzwerken zu bündeln. Es wurde das Ziel verfolgt, einen durchgängigen Informationsfluss in der Produktion sicherzustellen. Die praktische Umsetzung dieser Idee war in der Praxis mit umfangreichen Problemen behaftet. Dies begründet sich insbesondere durch das Bestreben vieler Ingenieure eine menschenleere Fabrik zu schaffen. Die Umsetzung

einer vollautomatisierten Fertigung und die damit einhergehende Komplexität wurden unterschätzt. (Bracht, Geckler, & Wenzel, 2011, S. 7), (Cyranek, 1993, S. 2)

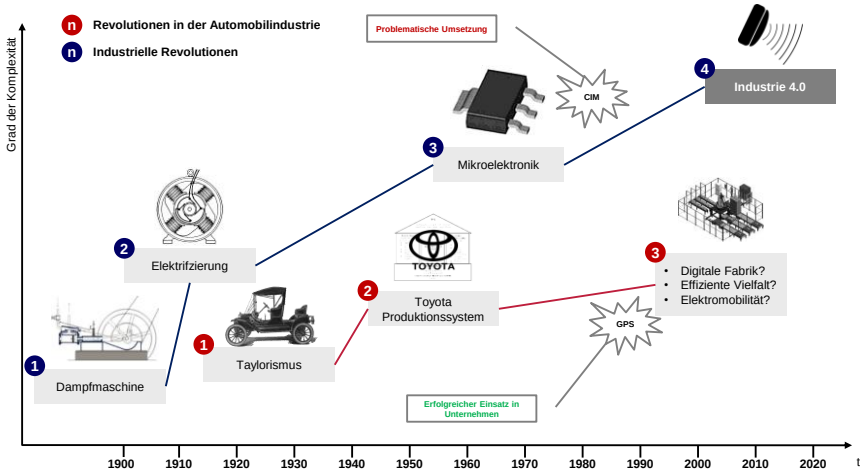


Abbildung 1: Die industriellen Revolutionen (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013), (Womack, Jones, & Roos, 1991), (VDI 2870-1, 2012), (Ziegler, 2005), (Dombrowski & Wagner, 2014a)

Mit Blick auf die vergangenen industriellen Revolutionen und Revolutionen in der Automobilindustrie lässt sich resümieren, dass alle Revolutionen eine fundamentale Veränderung in den Dimensionen Technik, Organisation und Mensch in der Produktion ausgelöst haben. Diesen Veränderungen wurde durch eine Vielzahl von wissenschaftlichen Ansätzen begegnet. Zweifelsohne lässt sich festhalten, dass die erfolgreichen Ansätze, wie beispielsweise GPS, gemein haben, dass sie den Menschen als Problemlöser und Innovator in den Mittelpunkt der Betrachtung stellen. Hierbei steht die Fähigkeit des Menschen, komplexe Zusammenhänge zu durchdringen und innovative Lösungen zu erarbeiten, im Vordergrund. (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013, S. 61) Diese Erfahrungen müssen im Hinblick auf die Umsetzung der 4. Industriellen Revolution Berücksichtigung finden. Der Arbeitswissenschaft, deren Kerngebiet die Analyse und Gestaltung der

technischen, organisatorischen und sozialen Bedingungen von Arbeitsprozessen ist, kommt im Rahmen der 4. Industriellen Revolution eine umfassende Bedeutung zu. (Dombrowski & Wagner, 2014, S. 354) Es stellt sich jedoch die Frage, welche Veränderungen sich für Arbeitssystem und Arbeitsperson im Rahmen der Industrie 4.0 ergeben. Um diese Frage zu beantworten, ist es notwendig, die Veränderungen des Arbeitssystems durch die Umsetzung von Industrie 4.0 zu identifizieren.

2 Herausforderungen der 4. Industriellen Revolution

Um die Veränderungen des Arbeitssystems durch die Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0 zu identifizieren, ist es notwendig, die Herausforderungen und Anforderungen, welche sich aus der Einführung ergeben, zu verdeutlichen. Der Ursprung der ersten prognostizierten industriellen Revolution findet sich in dem durch die Bundesregierung initiierten Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Dieses soll im Rahmen der Hightech-Strategie 2020 die Informatisierung klassischer Industriezweige wie der Produktion beschleunigen und weiterentwickeln. Als primäre Zielsetzung beinhaltet das Projekt die Realisierung einer intelligenten und selbstorganisierenden Fabrik, welche mit dem Begriff Smart Factory beschrieben wird. (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013, S. 81) Innerhalb dieser intelligenten Fabrik soll die zukünftige industrielle Produktion vor allem durch eine hohe Flexibilität und Wandlungsfähigkeit, den effizienten Einsatz von Ressourcen, ergonomisch optimierte Arbeitsbedingungen sowie die Integration von Kunden und Geschäftspartnern in die Wertschöpfungsprozesse gekennzeichnet werden. Die wesentliche Basistechnologie für derartige Entwicklungen stellt eine umfassende Implementierung sogenannter Cyberphysischer Systeme (CPS) dar. (Geisberger & Broy, 2012, S. 128)

Diese stellen eine Verbindung von virtuellen und physischen Produktionselementen dar, um intelligente und selbstkonfigurierende Fertigungsanlagen sowie die zugehörigen Planungs- und Steuerungssysteme zu entwickeln (Bauer, 2013, S. 29-31). Im Mittelpunkt dieses Ansatzes der

Smart Factory steht der Mensch, welcher als sogenannter Augmented Operator die Produktion überwachen soll. Innerhalb des Fertigungsnetzwerks aus virtuellen und physischen Produktionsressourcen soll der Mensch eine wichtige Rolle als Erfahrungsträger und Entscheider bei allen relevanten Abläufen haben. (Hessmann, 2013, S. 14-19). Das Fertigungsnetzwerk ist absolut transparent und in der Lage auf Abweichungen flexibel zu reagieren. Doch müssen aus heutiger Sicht neue Anforderungen, wie zum Beispiel die Qualifizierung der Mitarbeiter, erfüllt werden, um dieses Konzept tatsächlich großflächig realisieren zu können. (Bauer, 2013, S. 29-31) Der Zusammenhang zwischen Industrie 4.0, Smart Factory sowie Cyberphysischen Systemen wird in Abbildung 2 verdeutlicht. (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013, S. 23)

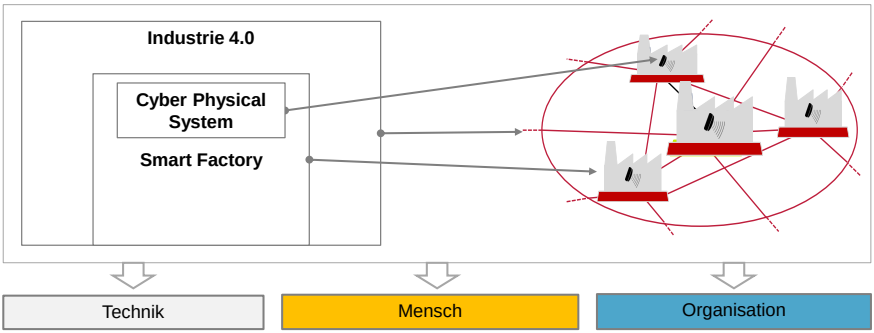


Abbildung 2: Die Smart Factory in der vierten industriellen Revolution Veränderungen für das Arbeitssystem in der Smart Factory (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013, S. 23), (Bauer, 2013, S. 29-31)

Die in der Vision einer Industrie 4.0 beschriebenen selbstorganisierenden, intelligenten Produktionssysteme in der Smart Factory werden auf dem Weg ihrer Realisation tiefgreifende Veränderungen mit sich bringen. Ein derartiger, durch Technik ausgelöster Wandel vollzieht sich dabei jedoch nicht als genau festzulegender Einschnitt oder Bruch, aus dem in kürzester Zeit eine neue Phase der Stabilität resultiert. Ebenso wenig werden die bestehenden Technologien durch einen radikalen Austausch ersetzt oder es ergibt sich ein kompletter Zusammenbruch der vorhandenen Strukturen.

Entsprechend der bisher zu beobachtenden, soziotechnischen Veränderungen werden sich schrittweise Transformationen vollziehen bis die Industrie 4.0 vollständig Einzug im gesamten Unternehmen gefunden hat. (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013, S. 6)

Technische Veränderungen

Die technischen Elemente des Arbeitssystems einer Fabrik werden durch den Einsatz und die Implementierung Cyberphysischer Systeme einem starken Wandel unterworfen und in ihrer Funktionalität den neuen Rahmenbedingungen angepasst. Eine wichtige Veränderung stellt dabei die zukünftig unabdingbare Interoperabilität auf allen Ebenen von CPS dar, welche notwendig ist, um Applikationen miteinander zu vernetzen. Ein weiterer Aspekt, der vor allem Neuerungen für computerbasierte Prozesse mit sich bringen wird, ist die Portierbarkeit von Anwendungen über alle Ebenen eines CPS hinweg. Diese wird den Zugriff auf Anwendungen aus der Cloud bis hin zum Endgerät ermöglichen. (Geisberger & Broy, 2012, S. 54) Eine zusätzliche, tiefgreifende Veränderung ergibt sich durch die Virtualität der Cyberphysischen Systeme. Durch diese werden die Funktionen der Systeme zu großen Teilen unabhängig von physischen Materialien, geografisch festgelegten Orten oder spezifischen Maschinen. (Geisberger & Broy, 2012, S. 145) Die zukünftigen Produktionssysteme auf Basis der CPS-Technologie werden somit zu kooperierenden und global vernetzten Systemen, welche in räumlich sowie sozial zum Teil stark verteilten Kontexten handeln und dabei permanent in der Lage sind zu kommunizieren. Diese Charakterisierung hebt die schwerwiegendste Veränderung deutlich hervor, welche sich durch die Dezentralität der Systeme ergibt. (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013, S. 96) Ein Konzept, diesen vielseitigen Veränderungsprozess zu unterstützen, stellt das sogenannte Cloud Computing dar. Um die Verschmelzung der physischen und digitalen Welt in der Produktion zu realisieren, müssen die daraus resultierenden enormen Datenmengen effizienter als heute gehandhabt werden. Aus diesem Grund wird das Cloud Computing als eine der wesentlichen Voraussetzungen zur Bewältigung des bevorstehenden

Wandels der industriellen Produktion betrachtet. (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013, S. 17), (Geisberger & Broy, 2012, S. 221)

Organisatorische Veränderungen

Die im vorstehenden Abschnitt angesprochenen neuen Technologien stellen den Ausgangspunkt für einen weiteren Bereich der Veränderung im Arbeitssystem der Fabrik dar. Begründet wird dieser durch eine umfassend zu realisierende Einbindung der neuen Fertigungstechniken in die bestehenden Organisationsformen und Strukturen. Daraus ergeben sich umfangreiche Restrukturierungsmaßnahmen, welche nicht nur Funktionen der Fertigung, des Vertriebs oder der Forschung und Entwicklung betreffen, sondern vor allem die aufbau- und ablauforganisatorischen Maßnahmen der Fabrikorganisation in den Fokus rücken. (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013, S. 23) Durch die im Konzept der Industrie 4.0 angestrebte Stufe der Prozessautomatisierung mit einer hochflexiblen Vernetzung der digitalen Datenwelt mit physischen Fertigungsprozessen ergeben sich grundlegend veränderte Formen der Prozesssteuerung und Organisation von Fabrikabläufen (Spath, Ganscher, Gerlach, Hämmerle, Krause, & Schlund, 2013, S. 80). So wird die starre Zuordnung von Fertigungsanlagen zu Produkten aufgelöst und durch flexible und konfigurierbare Produktionsanlagen ersetzt. Die zukünftig entstehenden Fabriken werden folglich nicht mehr für spezifische Produkttypen ausgelegt, sondern Fertigungssysteme einsetzen, die in sehr kurzer Zeit auf die Produktion beliebiger Produkte umgestellt werden können. (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013, S. 19), (Spath, Ganscher, Gerlach, Hämmerle, Krause, & Schlund, 2013, S. 41)

Menschorientierte Veränderungen

Der technologische und organisatorische Wandel hat zur Folge, dass sich auch der Mensch als Teil des Arbeitssystems zukünftig in einer veränderten Position wiederfinden wird. Bereits heute steht fest, dass die industrielle Produktionsarbeit in einer vollkommen vernetzten und digital erfassten Smart Factory in vielerlei Hinsicht anders sein wird. Es werden sich neue

Berufe herausbilden und vor allem das Verständnis von Informationstechnologien wird sich ändern (Spath, Ganscher, Gerlach, Hämmerle, Krause, & Schlund, 2013, S. 126). Die Grundlage dieser Veränderungen stellt die durch CPS ermöglichte, ortsunabhängige Verfügbarkeit von Anwendungen und Diensten dar. Eine Interaktion mit diesen Diensten oder technischen Objekten ist nicht mehr auf ein bestimmtes Gerät festgelegt. Dadurch wird eine Wahrnehmung geprägt, die über einzelne Schnittstellen hinaus geht und einen allgegenwärtigen Charakter der Systeme hervorhebt. So können Beschäftigte mit einer Vielzahl von Geräten, welche in die Umgebung integriert sind, auf das System zugreifen und den Eindruck gewinnen, mit einem einzigen umfassenden cyberphysischen Netzwerk zu interagieren. Dieser Eindruck wird durch eine permanente Versorgung mit Informationen weiter verstärkt und führt schließlich dazu, dass die Grenzen zwischen Mensch und Technik nicht mehr eindeutig zu bestimmen sind. Die zukünftige Produktionsarbeit wird demzufolge durch eine beliebige Nutzung weltweit verteilter Daten und Dienste auf Basis der globalen Cyberphysischen Systeme gekennzeichnet sein. (Geisberger & Broy, 2012, S. 133)

Aufgrund dieser neuen technologischen Möglichkeiten stellt sich die Frage, in wie weit eine mögliche Automatisierung in Zukunft auch genutzt und umgesetzt werden wird und welche Rolle der Mensch dabei spielt. Schlund et al. haben sich mit dieser Fragestellung auseinandergesetzt und drei mögliche Szenarien zukünftiger Produktionsarbeit erarbeitet. (Schlund & Gerlach, 2013, S. 22-26) Mit zunehmendem Automatisierungsgrad wird zunächst das sogenannte Werkzeug-Szenario formuliert. In diesem wirkt der Einsatz Cyberphysischer Systeme als eine Art Werkzeug und unterstützt die weiterhin dominante Position der Facharbeiter. Dabei ist denkbar, dass sich das Tätigkeitsprofil dieser Beschäftigten hin zu informatorischen und organisatorischen Inhalten verschiebt und simple physische Aufgaben automatisiert erledigt werden. Eine zweite denkbare Ausgestaltungsform der Arbeit wird durch das Hybrid-Szenario beschrieben. Dabei findet eine Kooperation zwischen den vernetzten Technologien und den Beschäftigten

statt, um Kontroll- und Steuerungsaufgaben interaktiv zu lösen. Das benötigte Qualifikationsniveau der einzelnen Mitarbeiter kann entsprechend der gewählten Art der Arbeitsteilung stark variieren (Schlund & Gerlach, 2013, S. 22-26). Schließlich wird mit dem „Automatisierungsszenario“ das Zukunftsbild mit dem höchsten Grad an automatisierter Produktionsarbeit skizziert. Charakteristisches Merkmal ist hierbei eine alleinige Steuerungsfunktion durch die CPS. Die Mehrheit der Beschäftigten ist in diesem Szenario nur noch für ausführende Tätigkeiten zuständig. Allerdings sind auch wenige, hochqualifizierte Spezialisten erforderlich, die für die Installation und Wartung der cyberphysisch gesteuerten Produktion verantwortlich sind. (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013, S. 24), (Dombrowski & Wagner, 2014, S. 351-354), (Spath, Ganscher, Gerlach, Hämmerle, Krause, & Schlund, 2013, S. 100)

Aus heutiger Sicht sprechen einige Gründe dafür, dass sich zukünftig eine Form des „Werkzeugszenarios“ durchsetzen wird. Zu diesen Gründen zählt die weiterhin unverzichtbare Rolle des Menschen in einer intelligenten Fabrikumgebung (Schlund & Gerlach, 2013, S. 22-26). Auch wenn menschliche Arbeitskräfte in Zukunft weniger relevant für eine physische Ausführung der Arbeitsaufgaben sein werden, ist ihre Funktion als intelligenter Entscheider in ungeplanten und nicht vorhersagbaren Situationen weiterhin von großer Bedeutung. Darüber hinaus kann der Mensch als eine Art Problemlöser eingesetzt werden und somit ein System intelligenter, technischer Objekte als elementaren Baustein vervollständigen. (Schlund & Gerlach, 2013, S. 22-26)

Als Konsequenz aus dieser großen Bedeutung menschlicher Arbeitskraft wurden einige Konzepte erarbeitet, welche die besonderen Eigenschaften der Mitarbeiter berücksichtigen und in den Mittelpunkt der Gestaltung zukünftiger Produktionssysteme stellen. Einer dieser Ansätze trägt den Titel der Socio-Cyber-Physical Systems (SCPS) und befasst sich mit dem kontextabhängigen Verhalten der Beschäftigten. Im Fokus stehen dabei Verhaltenseinflüsse, die sowohl aus dem individuellen als auch dem organisationalen oder kontextbasierten Hintergrund eines Beteiligten

resultieren können. SCPS berücksichtigen diese Aspekte menschlichen Verhaltens und ermöglichen so eine erhöhte Effizienz der globalen Produktionsnetzwerke. (Morosini Frazon, Hartmann, Makuschewitz, & Scholz-Reiter, 2013, S. 49-54)

Ein weiterer Ansatz, der die Bedeutung menschlicher Faktoren unterstreicht, sind die sogenannten Cyber-Physical-Social Systems (CPSS). Zentrales Merkmal dieser humanzentrierten Erweiterung von CPS ist die Rolle der menschlichen Beteiligten als ein Element des Systems. Dabei beinhalten CPSS nicht nur eine Vernetzung des digitalen und physischen Raums, sondern integrieren auch menschliches Wissen, kognitive Fähigkeiten und die entsprechenden soziokulturellen Verflechtungen. Auf diese Weise findet eine Verschmelzung digitaler, physischer und mentaler Elemente statt, die Cyber-Physical-Social-Systems dazu befähigen, Arbeitsaufgaben parallel auszuführen, sich selbst zu synchronisieren und zusätzlich physische, informationstechnische, soziale und kognitive Domänen zu beeinflussen. (Morosini Frazon, Hartmann, Makuschewitz, & Scholz-Reiter, 2013, S. 49-54)

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Produktionsarbeit der Zukunft andere Formen der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine mit sich bringen wird. Durch den Einsatz neuer Informationstechnologien und der Implementierung vernetzter Cyberphysischer Systeme kann die Komplexität der Fertigungsdaten auf die wesentlichen und entscheidenden Informationen für die menschlichen Beschäftigten reduziert werden. Im Idealfall werden die Menschen in ihren Aufgaben unterstützt und die Automatisierung gestaltet die Produktion im Miteinander von Mensch und Maschine effizienter. Sicher ist jedoch heute schon, dass der Weg in Richtung einer vollkommenen, sozialen und technologischen Vernetzung bereits eingeschlagen und auch nicht mehr rückgängig zu machen ist (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013, S. 6), (Morosini Frazon, Hartmann, Makuschewitz, & Scholz-Reiter, 2013, S. 49-54). Einen Überblick über die wichtigsten Veränderungen menschlicher Produktionsarbeit im

Arbeitssystem durch die Umsetzung von Industrie 4.0 ist in Abbildung 3 dargestellt.

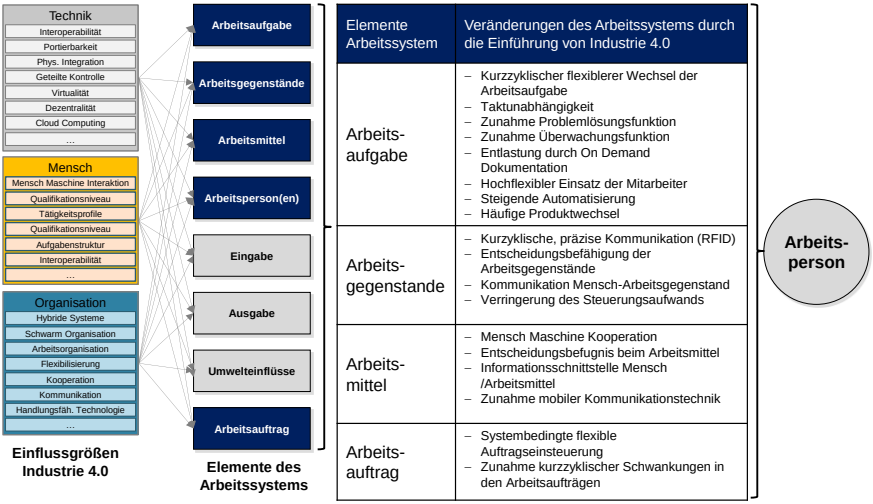


Abbildung 3: Veränderungen des Arbeitssystems durch Industrie 4.0 (Morosini Frazon, Hartmann, Makuschewitz, & Scholz-Reiter, 2013, S. 49-54), (Schlick, Bruder, & Luczak, 2010, S. 36), (Spath, Ganscher, Gerlach, Hämmerle, Krause, & Schlund, 2013, S. 50-129)

Die vorgestellten Einflussgrößen der Industrie 4.0 in den Dimensionen Technik, Mensch und Organisation beeinflussen in direkter Art und Weise das Arbeitssystem. In der Literatur sind verschiedene Definitionen für ein Arbeitssystem vertreten. (DIN EN ISO 6385:2004-05, 2004, S. 4), (Schlick, Bruder, & Luczak, 2010, S. 36), (REFA, 1993, S. 24) Das Arbeitssystem nach Schlick et. al. umfasst alle, für die weiteren Untersuchungen notwendigen, Elemente und gliedert diese auf den für die Untersuchung notwendigen Detaillierungsgrad auf. Das Arbeitssystem umfasst nach Schlick die Elemente Arbeitsperson, Arbeitsauftrag, Arbeitsaufgabe, Eingabe, Ausgabe, Arbeitsmittel, Arbeitsobjekte sowie Umwelteinflüsse. Durch dieses Ordnungsschema besteht zum einen die Möglichkeit Arbeitsplätze systematisch zu beschreiben. Zum anderen können auf Basis dieser Untergliederung des Arbeitssystems die Einflussgrößen der Industrie 4.0

weiter differenziert werden. (Schlick, Bruder, & Luczak, 2010, S. 36) Von besonderer Bedeutung sind in diesem Zusammenhang die Elemente Arbeitsaufgabe, Arbeitsmittel, Arbeitsgegenstand sowie Arbeitsauftrag, da diese Elemente einen direkten Einfluss auf die Arbeitsperson darstellen. In dieser Form besteht die Möglichkeit, die Einflussgrößen und Veränderungen strukturiert aufzuarbeiten und Anforderungen an die Rolle des Menschen in der 4. Industriellen Revolution abzuleiten.

3 Anforderungen an den Menschen in der 4. Industriellen Revolution

Nachdem die prognostizierten Veränderungen des Arbeitssystems durch Industrie 4.0 analysiert worden sind (siehe Abbildung 3), stellt sich nun die Frage, wie sich diese Veränderungen auf die Arbeitsperson auswirken. Die in Abbildung 3 ermittelten Tendenzen lassen die These zu, dass im Arbeitssystem 4.0 vor allem die psychischen Beanspruchungen der Mitarbeiter steigen und ein höheres Maß an beruflicher Handlungskompetenz vonnöten sein wird. Um diese These zu untermauern, werden zwei Konzepte angewendet. Zum einen kommt das Belastungs- und Beanspruchungskonzept zum Einsatz. Die ermittelten Veränderungen des Arbeitssystems können unterschiedlichen Beanspruchungsarten zugeordnet werden. Dadurch ist eine Aussage über sich zukünftig durch Industrie 4.0 ändernde Beanspruchungsarten möglich.

Zum anderen wird das Feld der Kompetenzen betrachtet. Wie bereits dargestellt, ändert sich für die Beschäftigten die Art der Arbeit. Es werden neue Anforderungen an die Qualifikation der Mitarbeiter gestellt. Um die Mitarbeiter entsprechend weiterbilden zu können, ist es entscheidend zu wissen, welche Art der Kompetenz benötigt wird. (Dombrowski & Wagner, 2014, S. 352) Auf diese Weise kann einer übermäßigen Beanspruchung der Mitarbeiter entgegengewirkt werden.

Abbildung 4 stellt den Zusammenhang zwischen Belastung, Beanspruchung und individuellen Leistungsvoraussetzungen, wie Kompetenzen, exemplarisch dar. Die Beanspruchung der Mitarbeiter steht in Zusammenhang mit der vorhandenen beruflichen Kompetenz, die Teil der

individuellen Leistungsvoraussetzungen ist. Kapitel 3.1 geht daher auf die Beanspruchung der Mitarbeiter durch Industrie 4.0 ein, Kapitel 3.2 analysiert die gewandelten Anforderungen an die Mitarbeiterkompetenzen. In Kapitel 4 werden Chancen und Risiken für die Rolle des Menschen im Arbeitssystem 4.0 beschrieben und weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt.

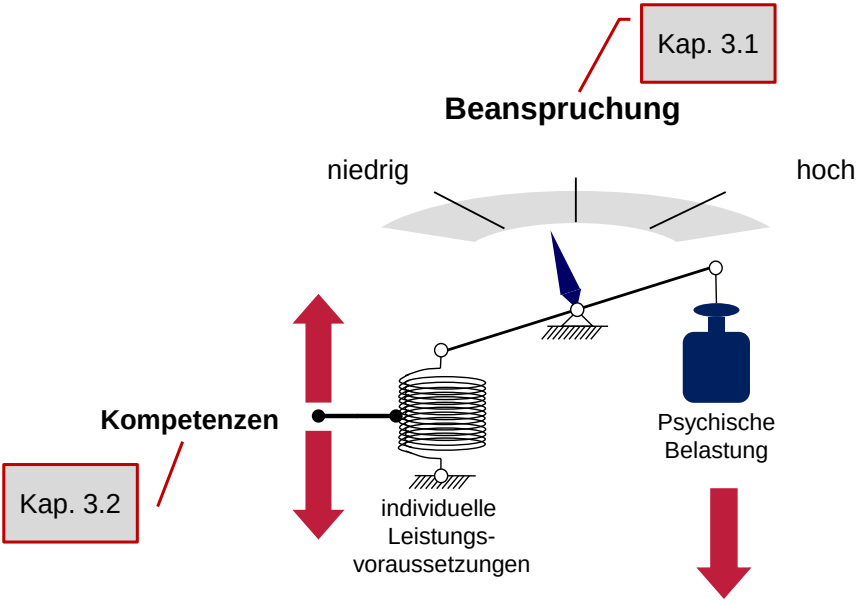


Abbildung 4: Beanspruchung der Arbeitsperson im Rahmen von Industrie 4.0 (Laurig, 1990, S. 37)

3.1 Beanspruchung der Mitarbeiter durch Industrie 4.0

Während des Arbeitsprozesses nehmen verschiedene Belastungen auf den Mitarbeiter Einfluss. Bei Belastungen handelt es sich um äußere Bedingungen und Anforderungen durch das Arbeitssystem, die auf den körperlichen und/oder geistigen Zustand der Arbeitsperson einwirken. (DIN EN ISO 6385:2004-05, 2004, S. 6) Die Beanspruchung bezieht sich auf die innere Reaktion des Arbeitenden auf die Belastung, die von den persönlichen Leistungsvoraussetzungen der Arbeitsperson abhängig ist (DIN

EN ISO 6385:2004-05, 2004, S. 5). Es gibt unterschiedliche Beanspruchungsarten: die rein physische Beanspruchung von z.B. Herz, Kreislauf, Muskeln, Bändern und Knochen. Weiterhin ist eine Beanspruchung von Sinnesorganen und Nerven möglich, falls Wahrnehmung, Reaktion oder Geschicklichkeit von den Beschäftigten gefordert werden. Bei der Abforderung von Sensibilität und Engagement kann es zu einer emotionalen Beanspruchung kommen. Werden Ratio und Kreativität verlangt, ist eine mentale Beanspruchung möglich. (Hardenacke, Peetz, & Wichardt, 1985, S. 72)

Abbildung 5 stellt die veränderte Beanspruchung der Arbeitsperson durch Industrie 4.0 exemplarisch dar. Die eckigen Klammern in der Abbildung ordnen die Veränderungen durch Industrie 4.0 der jeweiligen Komponente des Arbeitssystems zu. So gehört beispielsweise die Mensch-Maschine-Kooperation zu einer Veränderung der Arbeitsmittel im Arbeitssystem durch Industrie 4.0. Die Arbeitsaufgabe im Arbeitssystem wandelt sich etwa durch einen kurzzyklischen Wechsel der Tätigkeit oder die Taktunabhängigkeit. Da Beanspruchungen individuell stark variieren können, handelt es sich um allgemeine Tendenzen, die jedoch im Einzelfall anders ausfallen können.

Durch einen steigenden Grad an Automatisierung und der Kooperation zwischen Mensch und Maschine, ist zu erwarten, dass die körperliche Beanspruchung der Mitarbeiter zurückgeht. Die Veränderung der Arbeitsaufgabe durch Automatisierung und Veränderungen beim Arbeitsmittel, nämlich der Zunahme der Mensch-Maschine-Kooperation, führen somit zu einer Entlastung der Mitarbeiter. Jedoch kann es zu kurzzyklischen Wechseln der Arbeitstätigkeit sowie einer Produktion unabhängig vom Takt kommen, wodurch das Reaktionsvermögen und damit Sinne und Nerven stärker beansprucht werden. Eine steigende emotionale Beanspruchung ergibt sich aus der Zuteilung der Arbeit durch ein technisches System und nicht durch eine Führungskraft. Hier kann es zu Akzeptanzproblemen kommen. Auch der hochflexible Einsatz von Mitarbeitern kann zu einer steigenden emotionalen Beanspruchung führen, da sich die Mitarbeiter auf ständig wechselnde Arbeitsinhalte und

Arbeitsorte einstellen müssen, jedoch ein Bedürfnis nach Bindung, Orientierung und Kontrolle haben (Peters & Ghadiri, 2010, S. 72). Das emotionale System eines Menschen beeinflusst die menschliche Entscheidungsfindung. Das Entscheidungssystem ist wichtig, um strategisch zu denken und Konzepte entwickeln zu können, also Arbeit ausführen zu können (Elger, 2009, S. 148/151) Emotionen kommt somit im Arbeitssystem eine tragende Rolle zu. Weiterhin ändert sich der Arbeitsinhalt der Mitarbeiter. Es kommen problemlösende und überwachende Tätigkeiten hinzu, so dass ein höheres Maß an Kreativität nötig wird. Dies erhöht die mentale Beanspruchung. Der flexible Mitarbeitereinsatz, häufige Produktwechsel sowie eine flexible Auftragseinsteuerung verstärken ebenfalls die mentale Beanspruchung. Eine Entlastung der mentalen Beanspruchung kann durch den flächendeckenden Einsatz mobiler Kommunikationstechnik erreicht werden. Diese ermöglicht, die benötigen Informationen direkt und übersichtlich für den Mitarbeiter darzustellen.

Die steigende, psychische Beanspruchung wird somit vor allem durch Veränderungen der Arbeitsaufgabe durch Industrie 4.0, aber auch durch veränderte Arbeitsmittel und eine modifizierte Auftragseinsteuerung verursacht.

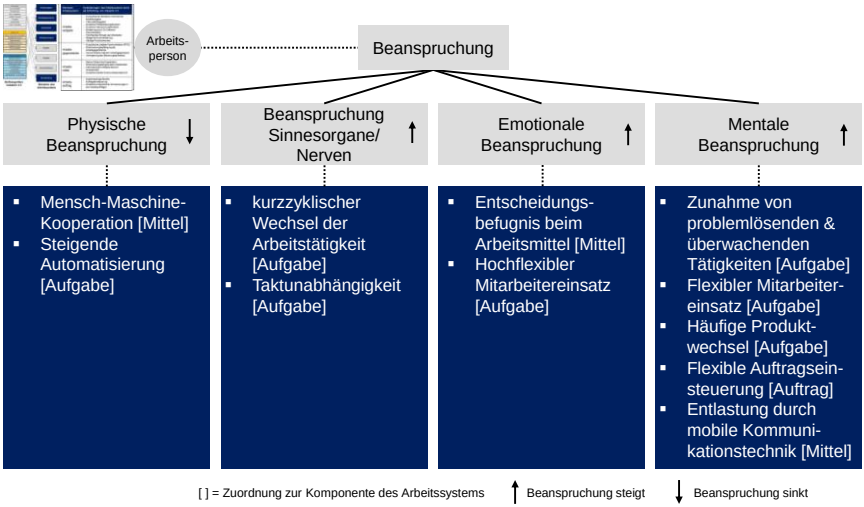


Abbildung 5: Veränderte Beanspruchung durch Industrie 4.0

3.2 Kompetenzanforderungen durch Industrie 4.0

Kompetenz stellt „die Fähigkeit zur erfolgreichen Bewältigung komplexer Anforderungen in spezifischen Situationen“ dar. Dies schließt sowohl die Anwendung von Wissen, kognitiven und praktischen Fähigkeiten sowie gleichwohl sozialer Verhaltenskomponenten, wie Haltungen, Gefühle oder Werte und Motivationen ein. (Gnahs, 2010, S. 21) Kompetenzen lassen sich in vier Arten unterteilen: Fachkompetenzen, Sozialkompetenzen, Methodenkompetenzen und Persönlichkeitskompetenzen (Gnahs, 2010, S. 26), (Raithel, Dollinger, & Hörmann, 2008, S. 40). Die Fachkompetenz bezeichnet die Fähigkeit zu Besitz, Gebrauch und Umsetzung von Fachwissen, um Aufgaben zu bewältigen, z.B. für die Gestaltung und Steuerung von Prozessen und Abläufen. Die Sozialkompetenz ist die Fähigkeit zu einem sozialverträglichen Handeln. Sie ist zum Beispiel für die Führung von und Interkation mit Mitarbeitern notwendig. Die Methodenkompetenz bezeichnet die Fähigkeit, allgemeine Verfahrensweisen zur Problemlösung zu gebrauchen. (Raithel, Dollinger, & Hörmann, 2008, S. 40) Die Persönlichkeitskompetenz ist die Fähigkeit zur

Selbsterkenntnis und zu eigenverantwortlichem Handeln (Ott, 1998, S. 25). Sie ist für die Entwicklung von Fach-, Methoden- und Sozialkompetenz verantwortlich (Raithel, Dollinger, & Hörmann, 2008, S. 40).

Um die Anforderungen an die Arbeitsperson in der Industrie 4.0 zu bestimmen, werden die wissenschaftlichen Prognosen zur Veränderung des Arbeitssystems den vier Arten der Kompetenz gegenübergestellt (siehe Abbildung 6). Durch die Zunahme der Problemlösungs- und Überwachungsaufgaben, die prognostizierten häufigen Produktwechsel sowie die flexible Auftragseinsteuerung kommen neue Arbeitsinhalte für die Beschäftigten hinzu. Die Anforderung an die Fachkompetenz steigt somit durch Veränderungen der Arbeitsaufgabe, aber auch der Auftragseinsteuerung. Die Sozialkompetenz wird durch die Kommunikation zwischen Mensch- und Arbeitsgegenstand sowie eine kurzzyklische, präzise Kommunikation in der Interaktion sowohl mit Mensch als mit auch CPS gefordert. Die Zunahme von Problemlösungs- und Überwachungsaufgaben stellt neue Herausforderungen an die Beschäftigten. Insbesondere Problemlösungstätigkeiten sind nicht standardisierbar, da Ursachen für Probleme in der Produktion vielfältig sein können. Wichtig ist es daher, dass die Beschäftigten über ein fundiertes Wissen zu Problemlösungsmethoden verfügen. Da die Persönlichkeitskompetenz einer Person für die Entwicklung der anderen Kompetenzarten essentiell ist, steigt auch diese Kompetenzart durch Industrie 4.0.

Die steigenden Anforderungen an Fach- und Methodenkompetenz gehen also auf Änderungen der Arbeitsaufgabe, aber auch der Auftragseinsteuerung zurück. Anforderungen an die Sozialkompetenz ergeben sich aus veränderten Arbeitsgegenständen. Dies begründet sich durch einen Paradigmenwechsel in der Mensch-Maschine-Interaktion, welche innovative Formen der Kollaboration nach sich zieht. (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013, S. 27)

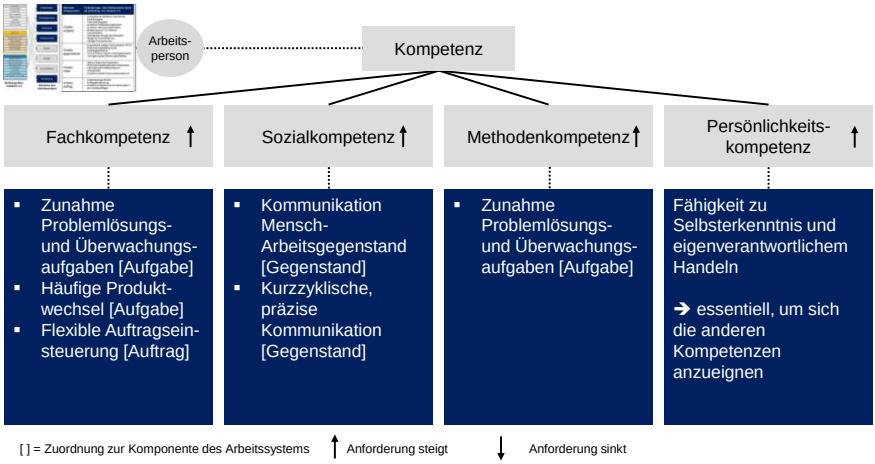


Abbildung 6: Veränderte Kompetenzanforderungen durch Industrie 4.0

4 Chancen und Risiken für die Rolle des Menschen im Arbeitssystem 4.0

Die Analyse der Beanspruchungsarten für die Arbeitsperson im Arbeitssystem Industrie 4.0 ergab eine tendenziell sinkende körperliche Beanspruchung, während die psychische Beanspruchung (Beanspruchung von Sinnen und Nerven sowie eine emotionale und mentale Beanspruchung) steigen wird. Dies könnte zu einem weiteren Anstieg der Arbeitsunfähigkeit aufgrund psychischer Erkrankungen führen. Die Anzahl von Arbeitsunfähigkeitstagen und Arbeitsunfähigkeitsfällen aufgrund psychischer Erkrankungen ist seit Jahren steigend (IGES Institut GmbH, 2014, S. 19). Auch fühlen sich über 50% der Arbeitnehmer in Deutschland durch psychische Probleme bei der Arbeit leistungsgemindert, was zu erheblichen Produktivitätsverlusten führt (Berger, Fürstenberg, & Brauck, 2011, S. 18). Vom Bundesverband der Unfallkassen genannte Maßnahmen, um psychischen Beanspruchungen bei der Arbeit entgegenzuwirken, sind in Teilen konträr zu den erwarteten Veränderungen durch Industrie 4.0. So dürfte es nach den derzeitigen Prognosen schwierig sein, Mitarbeitern genaue Informationen zum Arbeitsablauf und erwartbaren Veränderungen

zur Verfügung zu stellen, da sich das intelligente System in Echtzeit anpasst. Auch ein vorhersehbares und durschaubares Gestalten des Arbeitsablaufes während einer Schicht ist aus diesem Grund schwer möglich. Chancen zur Prävention psychischer Belastungen durch Industrie 4.0 ergeben sich beim Vermeiden von Zeitdruck und der Ermöglichung von Kurzpausen. (Bundesverband der Unfallkassen, 2005, S. 27) Diese Aspekte können direkt vom planenden System berücksichtigt werden. Ein Konzept für ein solches System ist in (Dombrowski, Wagner, & Riechel, 2013) beschrieben. Das Cyberphysische System analysiert den Arbeitsfortschritt an den einzelnen Arbeitsplätzen und verteilt Arbeitsinhalte interaktiv anhand dieses Arbeitsfortschritts auf die entsprechenden Mitarbeiter. Hierbei wird die individuelle Leistung der Mitarbeiter berücksichtigt. (Dombrowski, Wagner, & Riechel, 2013, S. 344) Um eine Über- oder Unterforderung der Mitarbeiter und damit eine Gesundheitsgefährdung durch das System zu vermeiden, muss jedoch die Frage der optimalen menschlichen Leistung beantwortet werden (Dombrowski & Evers, 2014). Es besteht somit erheblicher Forschungsbedarf zur Prävention (psychischer) Belastungen durch Industrie 4.0. Da es sich bei Industrie 4.0 um eine prognostizierte Revolution handelt, lässt sich durch eine frühzeitige Erforschung der Thematik ein positiver Einfluss auf die Gestaltung des Arbeitssystems nehmen.

Weiterhin ergab die Analyse steigende Anforderungen an die Kompetenz der Mitarbeiter. Auch diese lässt sich durch die Arbeitsgestaltung, z.B. in Teams, positiv beeinflussen. Laut Richter und Pohlandt ist es kompetenzförderlich, Aufgaben-, Arbeits- und Urlaubsverteilung durch alle Teammitglieder gemeinsam zu organisieren. Weiterhin sollten Aufgabenwechsel und die Rotation zwischen den Arbeitsplätzen von den Teams organisiert werden und vor- und nachgelagerte Tätigkeiten in den Arbeitsbereich der Teams integriert werden. (Richter & Pohlandt, 2011, S. 135) Diese Art der Arbeitsgestaltung überschneidet sich mit der erwarteten Ausgestaltung von Industrie 4.0. Je nach Auslegung des Systems in der Smart Factory ist eine Aufgabenverteilung mit und ohne Einbezug der

Mitarbeiter möglich. Auch die Kompetenzförderlichkeit des Arbeitssystems 4.0 sollte deshalb Gegenstand weiterer Forschung sein. Insgesamt lässt sich jedoch bilanzieren, dass das Arbeitssystem 4.0 erhebliches Potential für eine Humanisierung der Arbeit aufweist.

5 Zusammenfassung

Die in der Vision einer Industrie 4.0 beschriebenen, selbstorganisierenden, intelligenten Produktionssysteme in der Smart Factory werden auf dem Weg ihrer Realisation unumstritten tiefgreifende Veränderungen mit sich bringen. Es kommt zu Änderungen bei Arbeitsaufgabe, Arbeitsmitteln und –gegenständen sowie der Auftragseinsteuerung. Der Mensch nimmt eine entscheidende Rolle als Problemlöser, Entscheider und Innovator ein. Es ist zu erwarten, dass vor allem die psychische Beanspruchung der Arbeitsperson im Arbeitssystem 4.0 ansteigt und sie über ein höheres Maß an beruflicher Handlungskompetenz verfügen muss. Eine aufgabenadequate Weiterqualifizierung der Mitarbeiter sowie die Gestaltung eines kompetenzfördernden Arbeitssystems werden nötig. Die Prävention psychischer Erkrankungen muss im neuen Arbeitsumfeld wissenschaftlich untersucht werden, um die Chancen des intelligenten Arbeitssystems auch für die Mitarbeiter zu nutzen. Hier sind die Verankerung von Kurzpausen ins System sowie eine Arbeitsverteilung auf Basis der individuellen Leistungsvoraussetzungen denkbar. Abbildung 7 liefert eine Übersicht zu diesen Zusammenhängen.

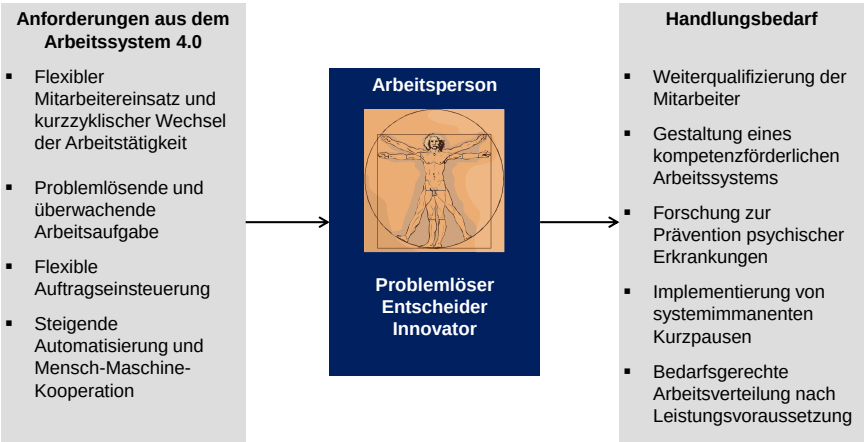


Abbildung 7: Zusammenfassung

Literatur

Bauer, K. (2013). Mit der Smart Factory auf dem Weg in die Produktion der Zukunft. MM-Maschinenmarkt, S. 29-31.

Berger, P. / Fürstenberg, W. / Brauck, M. (2011). Fürstenberg Performance Index 2011. Gesundheitsprobleme in Deutschland und ihr Einfluss auf die Leistung der Arbeitnehmer. Hamburg: Fürstenberg Institut.

Bracht, U. / Geckler, D. / Wenzel, S. (2011). Digitale Fabrik. Berlin: Springer.

Bundesverband der Unfallkassen. (2005). Psychische Belastungen am Arbeits- und Ausbildungsplatz - ein Handbuch. Phänomene, Ursachen, Prävention. GUV-I 8628. München: Bundesverband der Unfallkassen.

Cyranek, G. (1993). CIM - Herausforderung an Mensch, Technik, Organisation. Zürich: vdf Hochschulverlag AG.

DIN EN ISO 6385:2004-05. (2004). Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen. Berlin: Beuth Verlag.

Dombrowski, U. / Evers, M. (2014). Approach for determining the ideal workload of employees. 20th ICE Conference - IEEE TMC Europe Conference.

Dombrowski, U. / Wagner, T. (5 2014). Arbeitsbedingungen im Wandel der Industrie 4.0. Mitarbeiterpartizipation als Erfolgsfaktor zur Akzeptanzbildung und Kompetenzentwicklung. zwf Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, S. 351-354.

Dombrowski, U. / Wagner, T. (2014a). Mental strain as field of action in the 4th industrial revolution. The 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems (S. 772-777). Windsor, Canada: CIRP Proceedia.

Dombrowski, U. / Schmidtchen, K., / Hoesslin, I. v. (2012). Megatrends - Erfolgreiche Unternehmen denken heute schon an morgen. GPS Symposium. Braunschweig.

Dombrowski, U. / Tiedemann, H. / Bothe, T. (2001). Visionen für die Digitale Fabrik. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)(3), S. 96.

Dombrowski, U. / Wagner, T. / Riechel, C. (5 2013). Analyse eines Konzepts zur Montageplanung auf Basis cyber-physischer Systemmodule. zwf Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, S. 344-348.

Elger, C. E. (2009). Neuroleadership. Planegg/München: Rudolph Haufe Verlag & Co. KG.

Geisberger, E. / Broy, M. (März 2012). agendaCPS-Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems . München, Deustchland.

Gnahs, D. (2010). Kompetenzen - Erwerb, Erfassung, Instrumente. Bielefeld: W. Bertelsmann Verlag und Co. KG.

Hahn, H.-W. (2011). Die Industrielle Revolution in Deutschland. München: Oldenbourg Verlag.

Haller, E. / Schiller, E. (2002). Die Digitale Fabrik - die dritte Revolution in der Automobilindustrie? Ludwigsburg: Süddeutsche Verlag.

Hardenacke, H. / Peetz, W. / Wichardt, G. (1985). Arbeitswissenschaft. München: Carl Hanser Verlag.

Hessmann, T. (2013). The Dawn of the Smart Factory. IW-Industry Week(Heft 2), S. 14-19.

Hüttenrauch, M. / Baum, M. (2008). Effiziente Vielfalt - Die dritte Revolution in der Automobilindustrie. Berlin: Springer.

IGES Institut GmbH. (2014). Gesundheitsreport 2014. Die Rushhour des Lebens. Gesundheit im Spannungsfeld von Job, Karriere und Familie. DAK-Gesundheitsreport 2014. Hamburg: DAK Forschung.

Kagermann, H. / Wahlster, W., / Helbig, J. (April 2013). Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 - Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Frankfurt/Main, Deustchland.

Laurig, W. (1990). Grundzüge der Ergonomie: Erkenntnisse und Prinzipien. Berlin: Beuth Verlag .

Morosini Frazon, E. et al. (2013). Social-Cyber-Physical Systems in Production Networks. Procedia CIRP, S. 49-54.

Ohno, T. (1988). Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production. Productivity Press.

Ott, B. (1998). Ganzheitliche Berufsbildung als Leitziel beruflichen Fachdidaktik. In B. Bonz, & B. (. Ott, Fachdidaktik des beruflichen Lernens (S. 9-30). Stuttgart: Franz Steiner Verlag.

Peters, T. / Ghadiri, A. (2010). Neuroleadership - Grundlagen, Konzepte, Beispiele. Wiesbaden: Gabler Verlag.

Raithel, J. / Dollinger, B., / Hörmann, G. (2008). Einführung Pädagogik. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.

REFA, V. f. (1993). Methodenlehre der Betriebsorganisation- Lexikon der Betriebsorganisation. München: Carl Hanser Verlag.

Richter, F. / Pohlandt, A. (2011). Arbeitsintegrierte Ansätze der Personalentwicklung. In J. Ryschka, M. Solga, & A. Matteklott, Praxishandbuch Personalentwicklung: Instrumente, Konzepte, Beispiele (S. 131-165). Wiesbaden: Gabler.

Schlick, C. M. / Bruder, R., / Luczak, H. (2010). Arbeitswissenschaft. Berlin: Springer.

Schlund, S., / Gerlach, S. (2013). Der Mensch im industriellen Holozän. Economic Engineering, S. 22-26.

Spath, D. et al. (2013). Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0. (D. Spath, Hrsg.) Stuttgart, Deutschland: Frauenhofer Verlag.

VDI 2870-1, V. D. (2012). Ganzheitliche Produktionssysteme. Grundlagen Einführung und Bewertung. Berlin: Beuth Verlag.

Wiendahl, H.-P. / Reichardt, J., / Nyhuis, P. (2009). Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. München: Hanser Verlag GmbH & Co. KG .

Womack, J. / Jones, D., / Roos, D. (1991). Die zweite Revolution in der Autoindustrie, Konsequenzen aus der weltweiten Studie des Massachusetts Insitute of Technology. Frankfurt/ Main: Campus Verlag.

Ziegler, D. (2005). Die Industrielle Revolution. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.

Chancen zur Bewältigung des Fachkräftemangels in KMU durch die Urbane Produktion von morgen

Dominik T. Matt, Erwin Rauch

1 Einleitung

Der Einzug des Internets der Dinge und Dienste in die Fabrik läutet nach der Mechanisierung, Elektrifizierung und Informatisierung eine 4. Industrielle Revolution ein (acatech, 2013). Während der Einsatz von modernen Informationssystemen sowie Internettechnologien im Dienstleistungs- und Verwaltungsbereich bereits stattgefunden hat, gilt es in Zukunft diese Technologien auch in der modernen Fertigung zur Verfügung zu stellen. Durch die intelligente Vernetzung von Fertigungseinrichtungen, Lagersystemen und Produkten können künftig kaum erahnbare Qualitätssprünge in der Flexibilisierung sowie Planung und Steuerung von Produktionssystemen erreicht werden.

Das Konzept der Urbanen Produktion gilt dabei als komplementäres Element für die Umsetzung dieser vierten Industriellen Revolution. Die zukünftige Verstädterung führt zu einem Wachstum der urbanen Strukturen und gleichzeitig zu einer Konzentration von potenziellen Konsumenten von Gütern sowie von potenziellen Arbeitskräften der Fabriken von morgen. Dem Trend der Urbanisierung folgend sind daher auch die Fabriken einem Wandel unterworfen. Während viele Unternehmen in den letzten Jahrzehnten ihre Produktionswerke zwar in der Nähe von Verkehrsknotenpunkten, häufig jedoch aber in ländlichen Gegenden angesiedelt haben, zeichnet sich ein Trend zur Stadtfabrik von morgen ab. Ein Grund für diese Entwicklung ist unter anderem der enorme Fachkräftemangel, welcher das potenzielle Wachstum vieler Unternehmen bereits im Keim zu ersticken droht. Die aktuelle Situation zeigt, dass besonders wissensintensive Arbeitsstellen unbesetzt bleiben und Fachkräfte wie Ingenieure händeringend gesucht und teils bereits aus dem Ausland

rekrutiert werden (BMWi, 2014a). Besonders für klein- und mittelständische Unternehmen, welche an sich bereits mit größeren Unternehmen um ihre Fachkräfte buhlen, ist dieser Mangel besonders stark spürbar.

Der vorliegende Beitrag geht dabei auf die Vorteile und Chancen der Urbanen Produktion zur Bewältigung des aufgezeigten Fachkräftemangels ein. Im Rahmen des Beitrags wird einleitend die Bedeutung der Ressource Mensch im Rahmen dieser neuen und vierten Industriellen Revolution beschrieben. Anschließend wird auf die zunehmende Urbanisierung sowie das Konzept der Urbanen Produktion und verschiedene Ansätze und Lösungsmöglichkeiten zur Bewältigung des Fachkräftemangels von Unternehmen und im Speziellen für KMU eingegangen.

2 Die Ressource Mensch im Kontext von Industrie 4.0

Eine neue Ära wird durch Industrie 4.0 eingeleitet. „Cyber-physische-Systeme (CPS)“ verbinden künftig die reale physische Welt der Produktion mit der digitalen Cyberwelt. Dabei verschmelzen Produktionsanlagen, Lagersysteme und die Produkte selbst zu intelligenten Bestandteilen einer vernetzten und selbstoptimierenden Fabrik der Zukunft. Viele der derzeit stark diskutierten Ansätze von Industrie 4.0 sind technischer Natur und werden durch die Entwicklung neuer intelligenter Technologien sowie die Adaption und Übertragung bestehender Techniken dazu beitragen die Produktivität in den Unternehmen steigern zu können. Dabei wird der Mensch als Produktionsfaktor auch weiterhin eine zentrale Rolle in der Produktionsarbeit der Zukunft spielen und ist damit auch ein Schlüsselfaktor zur Umsetzung von Industrie 4.0.

2.1 Eine neue Ära der Produktionsarbeit mit Industrie 4.0

Die Produktionsarbeit wird sich durch den verstärkten Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnik und deren Vernetzung mit Produktionsanlagen sehr stark verändern. Unternehmen werden in der Lage sein, ihre Produktion sehr viel dezentraler zu steuern und dadurch auch sehr viel schneller auf Veränderungen der Umwelt reagieren zu können.

Dabei verändert sich auch das Aufgabenprofil der Mitarbeiter in der Produktionsarbeit der Zukunft. Der „einfache“ Mitarbeiter an der Anlage wird dabei nicht nur noch operative Produktionsaufgaben erfüllen, sondern zusätzlich komplexere Aufgaben übernehmen müssen. Bereits im Rahmen der Einführung Ganzheitlicher Produktionssysteme nach dem Toyota Prinzip hat sich das Aufgabenspektrum des Mitarbeiters in der Produktion sehr stark verändert. Auch in dieser Ära spielte der Mitarbeiter eine wichtige Rolle bei der Umsetzung dieser Produktionssysteme und wurde zunehmend in Entscheidungen mit involviert und mit dispositiven Aufgaben zur Materialsteuerung oder Qualitätssicherung beauftragt.

Das Mitarbeiterprofil der Zukunft wird über dies hinaus noch weitaus komplexer werden, da der Mitarbeiter zunehmend auch Wissensarbeit leisten muss und über mobile Endgeräte Programme an Maschinen ändert und mit Softwaresystemen die Anlagen in Echtzeit steuert. Während früher der Mitarbeiter die Maschine bedient hat (Maschinenbediener), wird in Zukunft die Maschine selbst – zumindest teilweise - kognitive Leistungsfähigkeiten erlangen können. Prof. Reinhart erklärt den Rollenwechsel des Menschen in der Produktion der Zukunft wie folgt (Spath, Ganschar, Gerlach, Hämmerle, Krause & Schlund, 2013): „In der Produktionsarbeit der Zukunft sind die Menschen stärker die Dirigenten und Koordinatoren der Fabrik. Die harte Muskelarbeit und auch einen Teil der Denkarbeit übernehmen die Maschinen“.

Auch trotz Zunahme von Automatisierungslösungen und selbststeuernden Fertigungssystemen wird der Mensch in der Produktion nicht ersetzt werden können. Durch immer kürzere Produktlebenszeiten wird es immer schwieriger Vollautomatisierung wirtschaftlich einsetzen zu können. Daher gilt es die bereits errungenen Fortschritte im Sinne der Flexibilität in der Produktion weiter auszubauen und gezielt intelligente Automatisierung in Kombination mit den assoziativen, sensorischen und motorischen Fähigkeiten des Menschen einzusetzen.

Wir sehen also, dass der Mensch auch in Zukunft ein wichtiger Faktor in der Produktion sein wird – allerdings mit einem veränderten Rollenverständnis.

2.2 Veränderung des Arbeitsmarktes in Folge der demografischen Entwicklung in Deutschland

Der demografische Wandel in Deutschland und Europa wird den Arbeitsmarkt und damit auch das Angebot an Arbeitskräften grundlegender und schneller verändern als vielfach angenommen. Zwar wird mit der Umsetzung der Ziele von Industrie 4.0 der Bedarf an direkten Mitarbeitern in den Unternehmen sinken (Prognos AG, 2012; Spath, Ganschar, Gerlach, Hämmerle, Krause & Schlund, 2013), aber dafür steigt die Nachfrage nach qualifizierten Arbeitskräften für indirekte Aufgaben in der Produktion.

Eine Studie der DIHK zeigt einige der zu erwartenden Folgen der demografischen Entwicklung auf. Im Baugewerbe rechnen ca. ein Drittel (63 Prozent) und in der Industrie über die Hälfte (58 Prozent) der Befragten mit einem bevorstehenden Fachkräftemangel. Darunter steht die bereits spürbare Alterung der Belegschaft, welche die Unternehmen vor neue Herausforderungen stellen wird. Künftig wird der Mangel an Fachkräften besonders durch Weiterbildungsmaßnahmen für geringer Qualifizierte sowie für ältere Mitarbeiter kompensiert werden müssen (DIHK, 2010a). Auch durch die Zuwanderung von jährlich 100.000 Fachkräften aus dem Ausland wird sich dieser Mangel an Fachkräften langfristig nicht kompensieren lassen und ab 2030 unweigerlich zu einem gesamtwirtschaftlichem Engpass führen (Weller, 2011; Helmrich, Zika, Kalinowski & Wolter, 2012).

Die Gegenüberstellung des gesamtwirtschaftlichen Arbeitskräfteangebots und -bedarfs macht deutlich, dass das Arbeitskräfteangebot, aufgrund der demografischen Entwicklung, zunehmend stärker als der Arbeitskräftebedarf zurückgehen wird (siehe Abbildung 1). Diese projizierte Modellrechnung des Bundesinstituts für Berufsbildung (BIBB) zeigt damit, dass es, angesichts der bereits aktuellen Schwierigkeiten in der Besetzung von Stellen für Fachkräfte, mittelfristig zu einem Kampf um Talente und langfristig zu einem generellen Engpass an Erwerbspersonen kommen wird. Insgesamt werden bis 2030 ca. 19 Mio. Erwerbspersonen demografiebedingt den Arbeitsmarkt verlassen, während im Gegenzug nur

etwa 15,5 Mio. diese Lücke auffüllen. Dadurch werden Angebot und Nachfrage im Jahr 2030 deckungsgleich, was keinen Idealzustand darstellt, da bereits heute in bestimmten Branchen und Berufsgruppen ein deutlicher Mangel an Fachkräften zu verspüren ist (Helmrich, Zika, Kalinowski & Wolter, 2012).

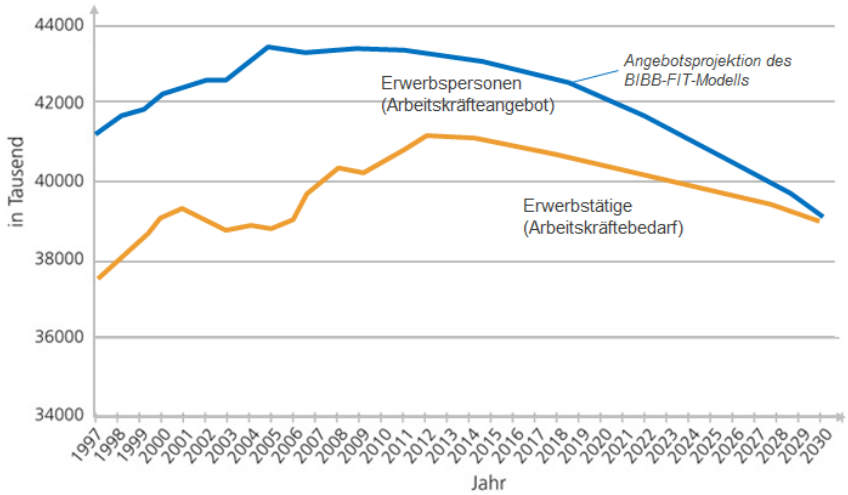


Abbildung 1: Arbeitsmarktentwicklung bis zum Jahr 2030 nach Arbeitskräftebedarf und projiziertem Arbeitskräfteangebot (Modellprojektion BIBB-FIT) (Fuchs, Söhnlein& Weber, 2011; Helmrich, Zika, Kalinowski & Wolter, 2012)

Die Tatsache, dass parallel zur demografischen Entwicklung ein Trend zu höheren Bildungsabschlüssen erkennbar ist, der sich vor allem im steigenden Anteil an akademischen Abschlüssen niederschlägt, entspannt dabei die Aussichten auf ein größeres Angebot hochqualifizierte Wissensarbeiter. Allerdings wird es rein quantitativ vor allem zu einem Mangel an qualifizierten Fachkräften der mittleren Qualifikationsebene kommen (Helmrich, Zika, Kalinowski & Wolter, 2012). Dadurch werden die Unternehmen in Zugzwang geraten auf die Entwicklungen der Demografie zu reagieren indem sie mittel- und langfristig interne Weiterbildungsangebote für ihre Mitarbeiter aufbauen und ihre Attraktivität als Arbeitgeber steigern.

2.3 Herausforderungen der Zukunft im Kampf um Fachkräfte

Durch die zunehmende Verschärfung des Fachkräftemangels aufgrund demografischer Verschiebungen stehen viele Unternehmen in Zukunft vor der Herausforderung ihren Bedarf an Fach- und Arbeitskräften abdecken zu können.

Laut einer Studie des DIHK zur Fachkräftesicherung (DIHK, 2010b) sieht über die Hälfte der befragten Führungskräfte eine künftige Entschärfung dieser Problematik durch interne Weiterbildung gegen den bevorstehenden Fachkräftemangel. Gleichzeitig gilt es zukünftig, die verfügbaren Potenziale in allen Bereichen des Arbeitsmarktes zu nutzen. Dies betrifft zum einen die Beschäftigung von Eltern und damit die Schaffung der Voraussetzungen für eine bessere Vereinbarkeit von Familie und Beruf. Ein weiteres Potenzial an Arbeitskräften liegt im Abbau von Beschäftigungshürden älterer Arbeitnehmer. Ein weiterer Ansatzpunkt der Studie befasst sich mit der gezielten Steuerung der Zuwanderung qualifizierter Arbeitskräfte aus dem Ausland in Anbetracht der Erfordernisse des Arbeitsmarktes. Auf politischer Linie wird zudem eine Reformierung des Bildungssystems gefordert, um den Anteil der höher Qualifizierten nicht nur auf Ebene der Akademiker, sondern auch der mittleren Qualifikationsebene in Form von Fachkräften zu steigern (DIHK, 2010b). Mit gezielterer Qualifizierung können die Unternehmen ihre Produktivität um bis zu 30 Prozent steigern. Maschinen übernehmen Standardtätigkeiten und die Mitarbeiter übernehmen komplexe Multitasking-Aufgaben (Schönauer, 2013).

Mit dem Ende des Zeitalters hoher Arbeitslosigkeit wird nicht nur die Nutzung und interne Qualifizierung des eigenen Arbeitskräftepotenzials immer wichtiger, sondern insbesondere auch der Kampf um neue Talente. Dabei spielt ein attraktives und werteorientiertes Arbeitgeberimage ebenso eine Rolle wie strategisches Personalmarketing, Schul- und Hochschulmarketing oder auch das gezielte Abwerben von Fachkräften beim Wettbewerber (McKinsey, 2011). Hierbei wird es in Zukunft besonders für KMU eine große Herausforderung, sich im Vergleich mit großen Konzernen im Kampf um qualifizierte Arbeitskräfte zu behaupten.

3 Fabriken im Wandel – Urbanisierung der Produktion

Genauso wie die Gesellschaft derzeit durch die demografische Entwicklung einem sozio-kulturellen Wandel unterworfen ist, muss sich auch die Produktion in Zukunft an diese Veränderungen anpassen. Einer der größten Veränderungen steht der Gesellschaft und damit auch der Industrie mit der zunehmenden Urbanisierung bevor. Mit der Renaissance der Städte als Mittelpunkt für Leben und Arbeit leben erstmals mehr Menschen in den Städten als auf dem Land (Zukunftsinstitut, 2013). Eine anstehende Urbanisierung der Produktion stellt die Industrie dabei nicht nur vor eine große Herausforderung, sondern bietet durch ihre Nähe zu Konsumenten und Arbeitskräften vielmehr auch Chancen für die Zukunft.

3.1 Verstädterung als Megatrend – Wachstum urbaner Strukturen

Um 1900 lebten etwa 165 Mio. Menschen (etwa 10 Prozent) in Städten. Dieser Grad an Urbanisierung hat seitdem rasant zugenommen. So wohnen seit dem Jahr 2007 bereits mehr als die Hälfte der weltweiten Bevölkerung in Städten und täglich ziehen weitere 200.000 vom Land in die Stadt. Laut Daten der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) werden bis zum Jahr 2050 über zwei Drittel der Weltbevölkerung (etwa 6,4 Mrd. Menschen) in Städten leben (siehe auch Abbildung 2). Dabei liegt der Verstädterungsgrad in Europa und Deutschland deutlich über dem weltweiten Schnitt (Niesing, 2012). In den Vereinigten Staaten von Amerika liegt der Urbanisierungsgrad bereits heute bei über 80 Prozent und wird bis 2050 auf 90 Prozent ansteigen. Europa und Deutschland werden etwa in 2050 den heutigen Urbanisierungsgrad der USA erreichen. China zeigt eine rasante Entwicklung der Verstädterung auf, nachdem die größten Megacities im Großraum China entstehen werden. Aufgrund der enormen Anzahl der chinesischen Bevölkerung, liegt der Urbanisierungsgrad auf dem gesamten Staatsgebiet bis 2050 unter jenem der USA, Europa und Deutschland (United Nations, 2011). Inzwischen gibt es weltweit etwa 30 Megacities mit mehr als 10 Mio. Einwohnern, während 1950 nur New York diese Bevölkerungszahl erreichte (Niesing, 2012).

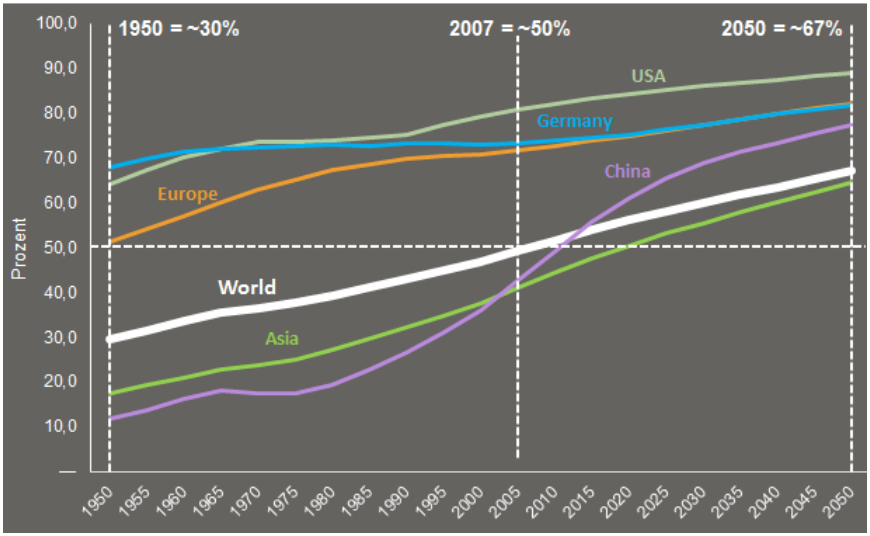


Abbildung 2: Entwicklung des Urbanisierungsgrads - Anteil der in Städten lebenden Bevölkerung im Vergleich zur Gesamtbevölkerung (United Nations, 2011)

Eine Ursache für die Verdichtung von urbanen Gebieten ist der Aufstieg der Wissensgesellschaft und von Wissensarbeit. Städte werden als kulturelle, ökonomische und kreative Zentren künftig immer interessanter für diese Art von Wissensarbeiter und erhalten eine völlig neue Bedeutung als Knotenpunkte des Wissens (Zukunftsinstitut, 2013). Zudem locken Städte immer mehr Menschen an, da im urbanen Umfeld meist gute Arbeit und gute Schulen und Hochschulen vorhanden sind. Städte bieten auch eine beträchtliche Auswahl an Geschäften aller Art, eine ausgezeichnete Gesundheitsversorgung sowie Krankenhäuser, als auch ein breites Kultur- und Freizeitangebot (Niesing, 2012).

Um den starken Zuwachs in den Städten meistern zu können und gleichzeitig den Bewohnern mehr Lebensqualität in Form von CO_2-neutralen, energieeffizienten, lebenswerten und „smarten“ Städten der Zukunft bieten zu können müssen bereits heute die notwendigen Voraussetzungen geschaffen werden.

3.2 Die Urbane Produktion als Reaktion auf den Wandel der Zeit

Die zunehmende Verstädterung führt auch zu einem Umdenken in den Wirtschaftskreisläufen und Unternehmen. In Zukunft stellen Städte mehr denn je interessante Märkte für produzierende Unternehmen dar. Somit werden sich nicht nur neue Produktsegmente bilden, sondern auch eine Reihe neuer Geschäftsmodelle entwickeln. Dabei wird künftig nicht mehr nur das Produkt selbst über Erfolg und Misserfolg auf dem Markt „Stadt“ entscheiden. Die Art und Weise wie Prozesse zur Ver- und Entsorgung organisiert und strukturiert werden treten dabei als Wettbewerbsfaktoren immer stärker in den Vordergrund (Matt, Spath, Braun, Schlund & Krause, 2013). Nach den Vorstellungen der Fraunhofer Gesellschaft soll die Stadt von morgen („Morgenstadt“) künftig dem Klimawandel angepasst sein, die Vision zur Verwirklichung einer „CO2-neutralen, energieeffizienten und klimaangepassten Stadt“ verfolgen und dafür das regionale Umfeld sowie unterschiedliche Stadt-Land-Beziehungen berücksichtigen. Die „Morgenstadt“ steht dabei vor zahlreichen Herausforderungen, um den Status einer nachhaltigen, lebenswerten und zukunftsfähigen Stadt zu erlangen (Fraunhofer, 2012).

Für die Verwirklichung der Morgenstadt wurden sieben Forschungsfelder definiert (Fraunhofer, 2012): Energie (1), Gebäude (2), Information und Kommunikation (3), Mobilität und Verkehr (4), Urbane Prozesse und Organisation (5), Sicherheit und Schutz (6) und schließlich Produktion und Logistik (7). Das Forschungsfeld „Produktion und Logistik“ sorgt in der Morgenstadt für reibungslose Prozessabläufe im Transport und Umschlag von Gütern, im Handel, in Dienstleistungen und in der Produktion, sowie der Bereitstellung von Nahrung für die Bewohner (Matt, Spath, Braun, Schlund & Krause, 2013).

Die zukünftige ökonomische, ökologische und soziale Entwicklung der Städte führt damit auch zu einer Neuausrichtung und Neugestaltung der Produktion in Form von städtischen Produktionsstandorten. In der Morgenstadt werden Produktionsstandorte im Sinne einer „Urbanen Produktion“ auf eine stadtfreundliche Art und Weise integriert werden. Die

Produktion kehrt dabei wieder in die Stadt zurück und muss hierfür die Produktionsstätten stadtfreundlich gestalten. Dabei werden in der stadtnahen Produktion energie- und ressourcenschonende Fertigungsprozesse und Produktionstechnologien eingesetzt, um Verschmutzung und Lärmemissionen für Anwohner möglichst gering zu halten. Die städtische Produktion wird dabei auf einer Symbiose zwischen Unternehmen und Stadtbevölkerung basieren.

Die Bewohner der Morgenstadt sollen in der Lage sein, ihren individuellen Lebensweg mit ihrer Arbeit zu vereinen, da sich die umweltfreundlichen Produktionsstandorte in unmittelbarer Nähe von Wohngebieten befinden und daher bequem zu Fuß oder mit dem Fahrrad erreichbar sind. Durch die dezentrale Verteilung der einzelnen Produktionsstandorte innerhalb der Stadt ist die Versorgung der Produktionsstandorte mit Rohstoffen und Energie über intelligente Logistik- und Energiekreisläufe sicherzustellen. Im Rahmen der Verwirklichung des Konzepts der Urbanen Produktion werden folgende **fünf Hypothesen zur nachhaltigen Gestaltung der stadtnahen Produktion** vorgestellt:

- **Integration von Markt und Kunden:** Die lokale Nähe zum Markt ermöglicht neue Formen der kundenintegrierten Produktentwicklung in städtischen Produktion. Für eine Vielzahl an Produkten können neue individuelle Lösungen durch die Nähe zu den potenziellen Kunden entwickelt werden. Durch wandlungsfähige Fabrikstrukturen und -prozesse kann auch mit kleinen Losgrößen auf den schwankenden Bedarf des Marktes reagiert werden.
- **24/7 Produktion neuer Ideen:** Die Urbane Produktion führt zu einer Bildung von zahlreichen dezentralen und in Netzwerken miteinander vernetzten „Micro Fabs“ (Labors mit Rapid Manufacturing Technologien), welche die Möglichkeit bieten einzelne Produkte in kürzester Zeit herzustellen. Durch diese neuen weiterentwickelten additiven Fertigungstechnologien können Produkte im 24/7 Prinzip gefertigt werden. Dies erfordert zudem

eine schnellere Übertragung von Produktentwicklungskonzepten in Produktionsparameter (Xtreme Process Engineering). Dabei wird der Kunde über offen zugängliche Produktentwicklungssysteme immer stärker in die Produktentstehung mit eingebunden (Demokratisierung der Produktentwicklung).

- **Flexible Arbeitszeiten - stabile Zukunft:** Die lokale Verfügbarkeit von qualifizierten Arbeitskräften ermöglicht eine sehr flexible Reaktion auf sich ständig verändernde Umweltbedingungen. Durch eine übergreifende Kapazitätsbereitstellung in mehreren dezentralen Produktionsstandorten kann Leerlaufzeit verringert und die Wertschöpfung erhöht werden. Dies erfordert von den Mitarbeitern allerdings einen hohen Grad an Flexibilität, welche sie dem Unternehmen entgegenbringen. Der flexible Arbeitseinsatz wird in diesem Kontext nicht mehr als negativer Punkt betrachtet, sondern als Chance für eine höhere Beschäftigungssicherheit gesehen.
- **Ich arbeite, wo ich wohne:** Die unmittelbare Nähe zum Lebensumfeld der Mitarbeiter macht Patchwork-Beziehungen möglich, die es erlauben, dass Mitarbeiter in mehreren Unternehmen gleichzeitig tätig sind. Daher werden künftig starre Arbeitszeiten und feste Arbeitsplätze immer häufiger durch flexible Modelle ersetzt. Neue Technologien und Methoden erlauben den Arbeitnehmern selber zu entscheiden, wann und wo sie in der urbanen Produktion arbeiten. Informationen werden dezentral und über mobile Endgeräte übermittelt, wodurch Zeit gewonnen werden kann, welche der Mitarbeiter für andere Interessen, wie ehrenamtliche Arbeit, Kinderbetreuung oder Freizeit verwenden kann. Durch die kooperative Vernetzung bei der Arbeitsplanung wird eine produktive und gleichzeitig erfüllende Kombination von Arbeit und Leben im städtischen Umfeld möglich.
- **Altersgerechte Arbeit in der Stadt von morgen:** Die Nähe zum Arbeitgeber sowie allen Einrichtungen des privaten Umfelds

ermöglicht ein altersgerechtes Arbeiten. Kürzere Wege zwischen Wohnung und Arbeitsstätten sowie ein gut funktionierendes öffentliches Verkehrsnetz gestatten Kurzarbeit, Teilzeitarbeit und gelegentliches Arbeiten. Ältere Mitarbeiter können ihre Arbeitszeit frei einteilen und decken bestimmte Stunden im Unternehmen ab, welche hingegen für junge Arbeitnehmer und Familien zur Vereinbarkeit von Beruf und Freizeit oder Beruf und Familie genutzt werden können. Diese Umstände erlauben älteren Arbeitnehmern, ihre Fähigkeiten und ihr Wissen auch im Alter in das Unternehmen einzubringen.

4 Die Urbane Produktion als Chance zur Bewältigung des Fachkräftemangels in KMU

Die Urbane Produktion ist eine Antwort auf die aktuelle demografische Entwicklung und den gleichzeitig steigenden Trend zur Urbanisierung. Wie die zuvor beschriebenen Hypothesen gezeigt haben, bietet das Konzept der Urbanen Produktion nicht nur Potenzial in Bezug auf die Nähe zu einem wachsenden Markt, sondern vielmehr auch ein enormes Potenzial zur Bewältigung des mittel- und langfristig bevorstehenden Fachkräftemangels.

4.1 Ausgangssituation: Fachkräftemangel in KMU-Betrieben

Besonders für KMU wird es immer schwieriger qualifizierte Mitarbeiter zu finden und an sich zu binden. Im Schnitt bleiben bei Kleinunternehmen (mit weniger als 50 Mitarbeitern) etwa 23 Prozent der ausgeschriebenen Stellen unbesetzt. Bei mittleren Unternehmen (50 bis 249 Mitarbeiter) liegt dieser Wert bei 11 Prozent, bei großen Unternehmen (250 Mitarbeiter und mehr) hingegen nur bei etwa 2 Prozent (Dietz, Kubis, Leber, Müller & Stegmaier, 2013).

KMU Unternehmen sind für Arbeitskräfte häufig ohnehin nicht die erste Wahl. Besonders Abgänger versuchen häufig ihren Lebenslauf durch eine Arbeitsstelle bei namhaften Konzernen aufzuwerten und ziehen diese den Klein- und Mittelständlern vor. Dazu kommt noch erschwerend dazu, dass

Großbetriebe durch professionelles Personalmarketing erhebliche Teile der künftig zur Verfügung stehenden Nachwuchskräfte aus den Schulen und Universitäten abziehen werden. Gleichzeitig verschärft sich der Wettbewerb unter den KMU um die verbleibenden Nachwuchskräfte auf dem Arbeitsmarkt (Schütt, 2011). Im Wettbewerb um qualifiziertes Personal sind KMU im Vergleich zu Großunternehmen benachteiligt: Sie haben meist weniger Ressourcen für eine strategische Personalpolitik und sind seltener überregional bekannt. Außerdem suchen sie bisher seltener Personal und verfügen damit über weniger Erfahrungen in erfolgreichen Strategien und Suchkanälen bei der Rekrutierung von Arbeitskräften (BMWi, 2014b).

Die klein- und mittelständische Fabrik der Zukunft wird mit anderen Unternehmen um Fachpersonal konkurrieren müssen und daher ein für den Mitarbeiter interessantes Arbeitsumfeld schaffen müssen. Dabei eröffnen sich besonders für KMU mit dem Konzept urbaner Produktionsstätten eine nicht unerhebliche Chance zur Schaffung anziehender Arbeitsplätze für qualifizierte Fachkräfte. Attraktive städtische Produktionsstandorte haben künftig die Nase vorn, wenn es um das Rennen der besten Köpfe geht. Die Stadt der Zukunft bietet mit ihren Netzwerken den kreativen Nährboden für Ideen, Innovationen und neue Geschäftsideen. Zentrale Wachstumsvoraussetzungen für die Industrie von morgen sind die Verfügbarkeit qualifizierter Arbeitskräfte, unternehmensnahe Dienstleistungen sowie die Nähe zu Forschungseinrichtungen: all dies finden Unternehmen und KMU in Städten (Stiftung neue Verantwortung, 2012).

Mit kurzen Wegen zum Arbeitsplatz öffnen sich für die KMU neue Wege in der Rekrutierung und Anwerbung von Fachkräften. Dabei zieht es nicht nur Jungingenieure zunehmend in urbane Strukturen, sondern auch das Angebot an hochqualifizierten Teilzeitkräften ist in Stadtnähe bedeutend größer. Zudem wird die Einbindung der noch arbeitsfähigen und durchaus arbeitswilligen älteren Bevölkerungsschicht durch die urbane Produktion erleichtert.

4.2 Arbeitgeberattraktivität für junge Talente durch eine stadtnahe und nachhaltige Produktion

In Anbetracht der Anziehungskraft von Städten für junge Talente mit einer Hochschulausbildung oder einer qualifizierten Fachausbildung ist besonders diese demografische Gruppe interessant für die Stadtfabrik der Zukunft. Viele klein- und mittelständische Betriebe, welche häufig im Umland angesiedelt sind, haben bisher teils große Schwierigkeiten zur Anwerbung von jungen Arbeitskräften, deren Lebensmittelpunkt in der Stadt liegt und welche keine großen Strecken bis zum Arbeitsplatz zurücklegen möchten. Hier bietet die urbane Produktion von morgen eine interessante Möglichkeit für KMU, indem die Produktionsstätte der Dichte an potenziellen Arbeitskräften in die Stadt folgt.

Was macht ein KMU allerdings attraktiv für junge qualifizierte Fachkräfte? Einige Ansatzpunkte hierfür werden im Beitrag beispielhaft behandelt (siehe Abbildung 3): Grundsätzlich zeigen sich besonders junge Menschen immer sensibler in Bezug auf das Verhalten und die verfolgte Strategie eines Unternehmens. Der nicht aufzuhaltende Klimawandel führt dazu, dass sich Mitarbeiter dann mit ihrem Unternehmen identifizieren können, wenn diese eine bestimmte soziale Verantwortung an den Tag legen und nachhaltig und schonend mit ihrer Umwelt und den verfügbaren Ressourcen umgehen. Daher gehört eine aktive Imagepflege zum Aushängeschild eines Unternehmens, indem bspw. das Ziel einer CO_2-neutralen und emissionslosen Fabrik nicht nur auf dem Papier besteht, sondern vor allem durch Taten und entsprechende Bestrebungen realisiert wird. Diese Art von sozialem und ökologischem Engagement gilt es nicht nur in der Umsetzung des eigenen Betriebs anzuwenden. Auch eine aktive Beteiligung von urbanen Produktionsunternehmen in der Stadtgestaltung führt zu einem positiven Image und damit gleichzeitig zu einer gesteigerten Attraktivität als Arbeitgeber. Eine Möglichkeit sozialen Engagements zeigt sich auch in der Förderung des Angebots zur Alltags- und Freizeitgestaltung junger Menschen, indem die Kooperation und Zusammenarbeit mit umliegenden Anbietern gefördert und kulturelle Angebote unterstützt

werden. Der Lebensraum Stadt erlebt aktuell eine Renaissance und gilt sowohl bei inländischen jungen Talenten, als auch bei qualifizierten Arbeitskräften aus dem Ausland als Anziehungspunkt. Daher arbeitet die urbane Fabrik von morgen auch aktiv mit den öffentlichen Körperschaften zusammen, um Anlaufstellen und Förderprogramme für qualifizierte Mitarbeiter aus dem Ausland oder internationale Lehr- und Studiengänge zu unterstützen. Die städtische Umgebung bietet jedoch nicht nur einen verbesserten Zugang zu Talenten aus dem Ausland. Durch gezieltes Generationenmanagement können Betriebe bereits frühzeitig auch die Nachkommen bestehender Arbeitnehmer für qualifizierte Berufe begeistern und fördern. Dies erfordert dabei nicht nur die Zusammenarbeit mit Hochschulen, sondern gleichzeitig den Ausbau von betriebsinternen Weiterbildungsangeboten.

Abbildung 3: Chancen zur Steigerung der Arbeitgeberattraktivität stadtnaher Fabriken für junge Talente

4.3 Bessere Vereinbarkeit von Familie und Beruf durch sichere und familienfreundliche „Stadtfabriken“

Nicht nur junge Talente stellen ein Potenzial zur Steigerung der Erwerbsquote dar. Fachkräfte lassen sich in attraktiven Standorten langfristig nieder und gründen eine Familie (Stiftung neue Verantwortung, 2012). Diese Tatsache gilt es für die Bindung qualifizierter Arbeitskräfte zu nutzen. In vielen Familien sind Vater und/oder Mutter bzw. alleinerziehende Elternteile höchst qualifizierte Fachkräfte, welche aus Gründen der Unvereinbarkeit von Familie und Beruf aus dem Berufsleben ausgeschieden sind. Hier gilt es sicherlich von Seiten der Politik geeignete familienfreundliche Arbeitsmodelle zu entwickeln. Allerdings bieten sich auch den Unternehmen selbst eine Reihe an Möglichkeiten zur Steigerung der Attraktivität von stadtnahen Fabriken für Familien (siehe Abbildung 4).

KMU sollten insbesondere daran arbeiten, eine familienfreundliche Unternehmenskultur aufzubauen, indem traditionelle und alte Denkmuster aufgebrochen werden und die Familie sowie Mütter als wichtige soziale Einheiten anerkannt und gefördert werden. Beispielweise zeigt sich dies durch eine durchgängige Chancengleichheit für Männer wie Frauen, indem Führungspositionen auch von Frauen oder berufstätigen Müttern bekleidet werden. Neben einer familienfreundlichen Unternehmenskultur spielen auch die Umgebung und der Standort selbst eine große Rolle. So wählen Familien ihren langfristigen Wohnort anhand der Kriterien Sicherheit und Wohlstand. Liegt die urbane Produktion somit in Städten mit einem bestimmten Wohlstand und einer niedrigen Kriminalitätsrate, so erhöht sich die Wahrscheinlichkeit für den Betrieb, potenzielle qualifizierte Fachkräfte über ansässige Familien zu gewinnen. Besonders profitieren dabei jene Unternehmen, welche sich bereits frühzeitig mit der frauengerechten Gestaltung von Arbeitsplätzen beschäftigen. Mit den Möglichkeiten der Automatisierung sowie der Ergonomiewissenschaften wird die körperliche Belastung am Arbeitsplatz reduziert und damit auch für Frauen ein angenehmes Arbeitsumfeld geschaffen. So kann der Arbeitsplatz in der Produktion durch den Einsatz von geeigneten Manipulatoren oder

Hebehilfen auch an die Bedürfnisse der Frau angepasst werden. Neben der physischen Gestaltung des Arbeitsplatzes spielt auch die organisatorische Gestaltung der Arbeitsmodelle eine wichtige Rolle. Nur wenn das Unternehmen auch familienfreundliche Arbeitszeitmodelle in Form von Teilzeit oder Homeoffice bzw. Telearbeit bieten kann, werden qualifizierte Mütter oder Väter auch in der Lage sein ihren Beruf mit der Familie zu vereinbaren. Moderne urbane Fabriken sollten stadtverträglich sein, in nächster Nähe zu Wohngebieten errichtet werden und über ausgezeichnete Anbindungen an öffentliche Verkehrsnetze verfügen. Ist dies nicht der Fall, so können Unternehmen die Mobilität der Familien und Berufstätigen über verschiedene Konzepte zusätzlich fördern. Ein wichtiger Aspekt in der Förderung der Vereinbarkeit von Familie und Beruf bildet schließlich auch die Betreuung der Kinder in Kinderhorten und Ganztagsschulen.

Abbildung 4: Chancen zur Steigerung der Attraktivität von Stadtfabriken für Familien durch Vereinbarkeit von Familie und Beruf

4.4 Age Management – Nutzung des Arbeitskräftepotenzials in einer alternden Gesellschaft

Neben der Anwerbung von jungen Talenten und berufstätigen Eltern bietet zukünftig vor allem die Gruppe der älteren Menschen ein hohes Potenzial für Unternehmen auf der Suche nach qualifizierten Fachkräften. Trotz fortgeschrittenen Alters verfügen ältere und arbeitswillige Bewerber über einen reichen Erfahrungsschatz sowie Fachwissen. Viele Unternehmen schrecken heute noch dafür zurück Mitarbeiter eines bestimmten Alters einzustellen, obwohl diese meist eine hohe Loyalität und Sorgfalt an den Tag legen. Mit den richtigen Maßnahmen des Altersmanagement (oder auch „Age Management“) können stadtnahe KMU dieses derzeit brachliegende Potenzial nutzen (siehe Abbildung 5).

Unternehmen sind dann für ältere Bewerber attraktiv, wenn ihre Personal- sowie Unternehmenskultur altersgerecht ist und auch die speziellen Bedürfnisse älterer Mitarbeiter berücksichtigt sowie Konfliktpotenzial zwischen Alt und Jung offen thematisiert und Lösungen hierfür gesucht werden. Im Rahmen des Age Management gilt es vor allem, neue Modelle für Altersteilzeit, Kurzarbeit oder auch flexibles und gelegentliches Arbeiten zu entwickeln. Dabei können qualifizierte ältere Arbeitnehmer nicht nur ihre Erfahrung in das Unternehmen einbringen, sondern auch als Tutoren oder Mentoren für jüngere Kollegen fungieren und damit junge Nachwuchskräfte fördern. Trotz aller Vitalität, welche ältere Arbeitnehmer zeigen, erschwert die altersbedingte körperliche Leistungsreduktion die Arbeit im Unternehmen. Daher gilt es zukünftig Arbeitsplätze möglichst ergonomisch und den Bedürfnissen einer alternden Gesellschaft anzupassen. Dies umfasst sowohl die Gestaltung von Büroarbeitsplätzen als auch die altersgerechte Beleuchtung oder die Reduktion von hoher körperlicher Anstrengung. Neben der Arbeitsplatzgestaltung spielt auch die Arbeitsgestaltung eine wesentliche Rolle, indem in altersheterogenen Teams gearbeitet wird und ältere Mitarbeiter durch regelmäßige Pausen und einem reduziertem Stresspensum nicht überbelastet werden. Durch flexible Arbeitsmodelle können ältere Arbeitnehmer zur Flexibilisierung der

Arbeitszeiten anderer Mitarbeiter beitragen. Ein Beispiel hierfür sind ältere Mitarbeiter, welche durch gelegentliche Mitarbeit vor allem berufstätige Familien dann ersetzen, wenn diese ihre Kinder von der Kinderkrippe oder Schule abholen müssen. Einen weiteren Aspekt bildet die Maßnahme des betrieblichen Gesundheitsmanagement und die Förderung von Gesundheitsprogrammen, welche die Leistungsfähigkeit älterer Arbeitnehmer unterstützen und positiv auf deren Wohlbefinden wirken. Zusätzlich gilt es Umschulungen sowie Weiterbildungsmaßnahmen für ältere Mitarbeiter anzubieten, damit diese in stressreduzierte Tätigkeiten umschulen können und sich gleichzeitig notwendige Kompetenzen aneignen können. Ein Beispiel hierfür ist die Förderung von Weiterbildungskursen zur Erweiterung der Kompetenzen am Computer oder an modernen Softwaresystemen.

Abbildung 5: Chancen zur Bewältigung des Fachkräftemangels in urbanen Fabriken durch Age Management (Matt & Weiss, 2012)

5 Zusammenfassung

Dieser Beitrag weist in seinen Ausführungen auf ein wichtiges Thema im Hinblick auf die Einführung von Industrie 4.0 hin – die Ressource Mensch. Trotz Automatisierung und Digitalisierung sowie Cyber-Physische Systeme bleibt der Mensch ein wichtiger Bestandteil in der künftigen Planung, Gestaltung und Umsetzung moderner Produktionssysteme und Fabrikbetriebe. Die demografische Entwicklung der kommenden Jahrzehnte hat gezeigt, dass spätestens 2050 der Bedarf an qualifizierten Arbeitskräften nicht mehr durch das vorhandene Potenzial an Erwerbstätigen abgedeckt werden kann. Dieser Fachkräftemangel ist bereits heute in vielen Branchen und Unternehmen spürbar. Besonders KMU Betriebe haben große Schwierigkeiten Mitarbeiter für ihre Produktionsbetriebe zu finden.

Dieser Beitrag zeigt mit dem Konzept der Urbanen Produktion einen Lösungsvorschlag zur Bewältigung des Fachkräftemangels in KMU auf. Es gilt, in Zukunft an der Gestaltung urbaner Produktionsstrukturen zu arbeiten, welche sich problemlos in das städtische Umfeld integrieren. Dies ist für Unternehmen aus verschiedenen Gründen nicht immer leicht: unzureichende und nicht passende Flächen, hohe Bodenpreise im Verhältnis zum Umland, Altlasten in den Böden und die fehlende Akzeptanz der Anwohner erschweren die stadtnahe Ansiedelung von Industriebetrieben (Stiftung neue Verantwortung, 2012). Trotz dieser Hindernisse bietet die stadtnahe Fabrik hinsichtlich der zunehmenden Urbanisierung bedeutende Vorteile. Einer dieser Vorteile ist die Bewältigung des Mangels an qualifizierten Arbeitskräften. Der Beitrag zeigt dabei Möglichkeiten und Maßnahmen für klein- und mittelständische Stadtfabriken auf, wie diese junge Talente aus der Stadt für sich gewinnen können, wie sie Familien und damit arbeitende Mütter und Väter an sich binden können und wie die steigende Anzahl älter werdender Arbeitnehmer durch gezieltes Age Management genutzt werden kann.

Literatur

acatech (2013). Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 - Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., April 2013, Frankfurt/Main: acatech.

BMWi (2014a). Studie - Fachkräfteengpässe in Unternehmen: In vielen Berufsgattungen bestehen seit Längerem Engpässe. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Januar 2014. Berlin: PRpetuum.

BMWi (2014b). Fachkräftesituation in KMU: Kleine und mittlere Unternehmen sind besonders betroffen. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi., Retrieved Juni 12, 2014, from http://www.kompetenzzentrum-fachkraeftesicherung.de/daten-und-fakten/fachkraeftesituation-im-mittelstand/fachkraeftesituation-in-kmu/.

Dietz, M. et al. (2013). Personalsuche in Deutschland: Kleine und mittlere Betriebe im Wettbewerb um Fachkräfte. In: Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung IAB (Ed.): IAB Kurzbericht -Aktuelle Analysen aus dem Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung. Regensburg: Vormals Manzsche Buchdruckerei und Verlag, S. 1-8.

DIHK - Deutsche Industrie- und Handelskammertag (2010a). Arbeitsmarkt und Demografie: Ergebnisse einer DIHK-Unternehmensumfrage zur Demografie und den Folgen für den Arbeitsmarkt. Dezember 2010. Berlin: DIHK.

DIHK - Deutsche Industrie- und Handelskammertag (2010b). Mitarbeiter dringend gesucht! Fachkräftesicherung – Herausforderung der Zukunft. August 2010. Berlin: DIHK.

Fraunhofer (2012). Die Stadt von Morgen – die Morgenstadt. Stuttgart: Fraunhofer-Gesellschaft.

Fuchs, J. / Söhnlein, D. / Weber, B. (2011). Projektion des Arbeitskräfteangebots bis 2050: Rückgang und Alterung sind nicht mehr aufzuhalten. IAB-Kurzbericht, 16/2011, Nürnberg.

Helmrich, R. et al. (2012). Engpässe auf dem Arbeitsmarkt: Geändertes Bildungs- und Erwerbsverhalten mildert Fachkräftemangel. In: BIBB Report 18/12, 1-14.

Matt D. T. / Weiss, A. (2012): Promotion of productivity and innovation by organizational changes considering an ageing workforce: an example of Workplace

Health Promotion in Italy. In: Müller, E. (Ed.): Demographischer Wandel – Herausforderungen für die Arbeits- und Betriebsorganisation der Zukunft. Berlin: Gito Verlag, 81-104.

Matt D. T. et al. (2013). Morgenstadt: Urban Production in the City of the Future. In: Zäh, M. F. (Ed.): Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability. Proceedings of 5th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2013), Munich, Germany, October 6th–9th, 2013. Cham: Springer, 13-16.

McKinsey (2011). Wettbewerbsfaktor Fachkräfte: Strategien für Deutschlands Unternehmen. Berlin: McKinsey.

Niesing, B. (2012). Die Zukunft der Stadt. In: Fraunhofer magazin „weiter.vorn" 4/12, 8-13.

Prognos AG (2012). Studie – Arbeitslandschaft 2035. Basel: Prognos Ag.

Schönauer, I. (2014). Smarte Fabrik braucht smarte Mitarbeiter. In: Industrie 4.0 – Die vierte Industrielle Revolution. Eine Publikation der Reflex Verlag GmbH am 12. März 2014 im Handelsblatt, S. 5.

Schütt, P. (2011). Fachkräftesicherung in kleinen und mittelständischen Unternehmen. Betriebliche Handlungsstrategien und Haltefaktoren. München: Institut für Sozialwissenschaftliche Forschung e.V.

Spath, D. et al. (2013). Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

Stiftung neue Verantwortung (2012). Future Urban Industries – Produktion, Industrie, Stadtzukunft, Wachstum. Wie können wir den Herausforderungen begegnen? Policy Brief 11/12. Berlin: Stiftung neue Verantwortung e. V.

Zukunftsinstitut (2013). Megatrend Dokumentation - Arbeiten mit Megatrends: Wie aus Zukunftswissen Handlungsoptionen entstehen. Frankfurt: Zukunftsinstitut GmbH.

United Nations (2011). Percentage of population residing in urban areas, 1950-2050. Department of Economic and Social Affairs. World Urbanization Prospects – the 2011 Revision. Retrieved Juni 06, 2014, from http://esa.un.org/unpd/wup/CD-ROM/Urban-Rural-Population.htm.

Integration von Lösungskompetenz operativer Mitarbeiter des Shop-Floors in die Produktionsplanung und -steuerung

Lukas Lingitz, Philipp Hold, Robert Glawar, Wilfried Sihn

1 Einleitung

Hohen Absatzschwankungen, steigende Variantenzahlen, häufigere Produktneuanläufe, die Reduktion des Produktlebenszyklus und die Notwendigkeit auf kurzfristig auftretende Störungen flexible zu reagieren prägen das Umfeld der industriellen Fertigung. (Schuh & Stich, 2012) Diesen Herausforderungen begegnete die Industrie mit einer Steigerung der Flexibilität ihrer Produktionssysteme. So wurden zum Beispiel flexible Arbeitszeitmodelle, rekonfigurierbare und flexibel einsetzbare Maschinen entwickelt und wandlungsfähige Fabrikstrukturen geschaffen. (Wiendahl, et al., 2007)

Die Produktionsplanung und -steuerung ist für den effizienten Betrieb dieser flexiblen und komplexen Produktionssysteme verantwortlich und sichert damit den Unternehmenserfolg nachhaltig. (Eversheim, 2002) Um Planer und Steuerer bei der Bewältigung Ihrer Aufgaben zu unterstützen wurden IT-Systeme wie z.B. ERP-Systeme, APS-Systeme oder MES-Systeme entwickelt. Diese verwenden oft komplexe mathematische Optimierungsmodelle und -verfahren sowie Heuristiken, um für gegebene Inputdaten optimale oder nahezu optimale Planungsergebnisse zu generieren.(Kletti, 2007) Im realen Einsatz zeigt sich jedoch, dass es zu Abweichungen zwischen den Produktionsplänen, die mit solchen Systemen gemacht werden und der realen Ausführung kommt. Dies liegt unter anderem daran, dass die Modelle das reale Produktionssystem nicht abbilden und somit nicht geeignet sind um längerfristige Vorhersagen zu treffen. (Schuh, et al. 2013b)

Ein weiterer Grund warum es zu Abweichungen kommt ist, dass die Planungsergebnisse für die operativen Mitarbeiter häufig nicht

nachvollziehbar sind. (Schönsleben, 2011 ; Schuh, Potente & Thomas, 2013c) Dies kann dazu führen, dass beispielsweise Reihenfolgen von einem Mitarbeiter verändert werden, um Rüstzeiten an seiner Maschine zu minimieren. Die logistischen Zusammenhänge und Auswirkungen auf anderen Arbeitsplätze und das Gesamtsystem können jedoch auf der operativen Ebene nicht vorhergesagt bzw. überblickt werden. (Wiendahl & Behringer, 2006, 19-32)

In diesem Beitrag soll ein Konzept zur Produktionsplanung und -steuerung vorgestellt werden, wodurch einerseits das reale Produktionssystem umfassender abgebildet wird und Möglichkeiten bietet, die operativen Mitarbeiter und deren Wissen in die Planung zu integrieren. Dies heißt konkret, dass operative Mitarbeiter wie auch Meister oder der Planer, die Möglichkeit bekommen sollen, in einem Planungssystem eigene Vorschläge – z.B. alternative Vorschläger für die Fertigungsreihenfolge in Folge einer im System nicht vorhandenen Restriktion – zu simulieren. Die Auswirkungen durch diese Veränderung soll mittels geeigneter Kennzahlen – für die jeweilige Ebene – visualisiert werden, um auf dieser Basis die Verbesserungsvorschläge zu verwerfen oder bis an die entscheidende Instanz weiterzugeben. Dort kann über die endgültige Umsetzung der Änderung und ob diese Änderung eventuell als neue Restriktion bei der Planung aufgenommen werden soll, entschieden werden.

Nachfolgend wird in Kapitel 2 der Stand der Technik in Bezug auf Planungssysteme und Planungsmodelle dargestellt. Kapitel 3 stellt das spezifische Konzept vor, mit dem der oben skizzierte Ansatz umgesetzt werden soll. In Kapitel 4 werden erste Resultate von Teilaspekten des Konzepts, die bereits pilothaft umgesetzt wurden, dargestellt.

2 State of the Art

2.1 Werkzeuge zur Unterstützung der Produktionsplanung und -steuerung

In der Industrie werden drei Arten von IT-Systemen zu Planung verwendet. Diese sind: Enterprise Ressource Planning Systeme, Advanced Planning and Scheduling-Systeme und MES-Systeme.

Die Funktionen der PPS sind als Funktionalitäten in Informations- und Anwendungssystemen umgesetzt, wie beispielsweise eines Enterprise Ressource Planning Systems (ERP), welches die Ressourcen eines Unternehmens prozessorientiert plant (Schuh & Stich, 2012. S. 195). Jedoch gelingt es ERP-Systemen nicht Kapazitäten und Durchführbarkeiten von Aufträgen ganzheitlich abzubilden. Bekannte Probleme in diesen Systemen sind Bullwhip-Effekte, geringe Datenqualität und die Fehlerfortpflanzung in großen Datenmengen (Berlak, 2009, S. 381). Diese Schwächen von ERP-Systemen haben zur Entwicklung von s.g. „Advanced Planning and Scheduling Systemen“ (APS) geführt. Es sei auch angemerkt, dass je nach Hersteller bereits Funktionalitäten von APS-Systemen in ERP-Systemen implementiert sein können.

„Advanced Planning & Scheduling“ Systeme sind modular strukturierte Softwaresysteme zur integrierten Planung und Steuerung unternehmensübergreifender Geschäftsprozesse über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg. APS-Systeme verwenden hierzu exakte mathematische Optimierungsverfahren und Heuristiken zur restriktions- und engpassorientierten Planung. APS-Systeme bieten zudem die Möglichkeit, eine kontinuierliche Aktualisierung des realisierten Plans vorzunehmen. (Thome, 2007, S. 7 f.)

Das Bindeglied zwischen Planung und operativer Fertigung und Produktion stellt das so genannte „**Manufacturing Execution-System“ (MES)** dar. Nach der VDI-Richtlinie 5600 unterstützt ein MES zeitnah die produktionsrelevanten Geschäftsprozesse eines Unternehmens. (VDI 5600, 2007, S.4 ff.)

2.2 Aufgaben der PPS

Mit dem Fokus auf die Beherrschung der Komplexität von flexiblen Produktionssystemen und der Einbindung von Wissen operativer Mitarbeiter in den Planungs- und Steuerungsprozess, soll an dieser Stelle auf die Aufgabe der Reihenfolgeplanung eingegangen werden.

Ein bedeutsamer Teil der PPS stellt die Reihenfolgeplanung dar, welche die Grundlade für die Veranlassung der Produktionsprozesse bildet (Günther & Tempelmeier, 2012, S.223) und deren Ziel es ist, die Zielgrößen der Produktionslogistik, Durchlaufzeit, Termineinhaltung, Bestand, Leistung und Kosten (Nyhuis & Wiendahl, 2012, S. 9) zu optimieren. Dabei kommen unterschiedliche Prioritätsregeln zur Anwendung, mittels denen die Warteschlange an vorhandenen Aufträgen sequenziert wird. Übliche Regeln sind beispielsweise FIFO bei welcher nach dem „First In First Out Prinzip“ sequenziert wird, KOZ bzw. LOZ bei welchen die kürzeste bzw. längste Operationszeit ausschlaggebend für die Sequenzierung ist sowie die so genannte Schlupfzeitregel, bei welcher der Arbeitsgang mit der geringsten verbleibenden Zeit bis zum Fertigstellungstermin des Auftrags priorisiert wird (Schuh & Stich, 2012, S.53). Zu dem gibt es unterschiedliche optimierende Verfahren, welche mittels intelligenter Algorithmen eine zielgrößenoptimierende Reihenfolgeplanung ermöglichen. Mittels solcher Verfahren können beispielsweise Rüstzeiten und Bestände im Produktionsablauf reduziert (Stadtler, 2011, S.242), Durchlaufzeiten minimiert (Schenk, 2014, S.403) als auch Liefertreue und Auslastung der Produktion erhöht (Lödding, 2008, 443 f.) werden. Aufgrund der unterschiedlichen Zielsetzungen der Prioritätsregeln und Optimierungsverfahren kommen für jeden individuellen Anwendungsfall unterschiedliche Kombinationen der einzelnen Methoden zum Tragen (Schönsleben, 2011, S.686 f.). Reihenfolgeregeln wie FIFO, KOZ, LOZ und die Schlupfzeitregel betrachten nur die Auslastung der Maschine bzw. versuchen Sie Aufträge durch entsprechende Reihung termingerecht fertigzustellen. Ob genügend Transportkapazitäten für die Aufträge zur Verfügung stehen, um diese zeitgerecht von einer Anlage zur nächsten zu

bringen, wird hierbei nicht betrachtet. In Zhang et al. (Q. Zhang, H. Manier, M.-A. Manier, 2012) wird ein mathematisches Optimierungsmodell zur Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von internen Transporten beschrieben. Dabei wird davon ausgegangen, dass jeder Transport von jeder Transportressource erledigt werden kann. Zumeist werden, vor allem in größeren Produktionsstätten, die logistischen Aufgaben nach Bereichen oder Tätigkeitsart unterschiedlichen Logistikgruppen zugeteilt. Dies ist im genannten Modell nicht vorgesehen. Rossi (2014) zeigt ebenfalls ein Modell zur Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von internen Transporten. Hier werden jedoch nur Transportzeiten zwischen den Stationen – nicht jedoch Transportkapazitäten – berücksichtigt.

Um Transportkapazitäten in der Planung berücksichtigen zu können, ist es notwendig, die logistischen Aufwände quantifizieren zu können. Eine methodische Vorgehensweise zu Analyse, quantitativen Bewertung und zur Planung logistischer Prozesse und Kapazitäten stellt MTM-Logistik dar.

2.3 Quantifizierung von logistischen Prozessen

MTM - Methods- Time Measurement:

MTM (Methods-Time Measurement, Methodenzeitmessung) erklärt, dass die bei der Durchführung einer bestimmten Arbeit beanspruchte Zeit von der gewählten Methode dieser Arbeit abhängt. Das Ergebnis einer MTM-Analyse sind in Grundbewegungen gegliederte Bewegungsabläufe. Jeder Grundbewegung sind Normzeitwerte (Verteil- und Erholungszeiten sind darin nicht enthalten) zugeordnet, die einem einheitlichen, international gültigen Leistungsstandard unterliegen und in ihrer Höhe durch die erfassten Einflussfaktoren vorbestimmt sind. MTM ist ein modernes Instrument zur Beschreibung, Analyse, Planung und Gestaltung von Arbeitssystemen mittels standardisierter Prozessbausteine. Ein Prozessbaustein ist ein Ablaufabschnitt mit definiertem Arbeitsinhalt (branchenneutral) und klarem Verwendungszweck, für den ein Zeitstandard gilt. Die Verwendung von MTM stellt eine valide Basis für die Bewertung der Produktivität dar - unter Berücksichtigung der medialen zu der

menschlichen Leistung - und unterstützt die Identifizierung von Mängeln in der Organisation. MTM zielt im Sinne des Lean Management auf die Identifikation, Bewertung, Verringerung und Beseitigung von Verschwendung ab (Kuhlang, Edtmayr & Sihn, 2011; Kuhlang, 2010, Bokranz & Landau, 2006, Maynard, Stegemerten & Schwab, 1948).

MTM in der Logistik:

MTM bietet speziell für Logistiktätigen einen „Katalog von Bausteinen“ an, mit dessen Einsatz sich die Möglichkeit ergibt, unternehmensindividuelle Arbeitsweisen im Bereich der Logistik zu analysieren und zu bewerten. Auf dieser - branchenweit gültigen - Grundlage kann eine einheitliche Kalkulation verschiedenster logistischer Tätigkeiten ermöglicht und sichergestellt werden. Neue Prozesse können ebenso wie bestehende Prozesse hinsichtlich der Ermittlung des Zeit- und Personalbedarfs kalkuliert werden. Durch Überprüfung des Zeitbedarfs bei Verwendung verschiedener Technologien und Arbeitsweisen können ferner Verbesserungspotenziale identifiziert werden (Kuhlang & Matyas, 2005).

Jeder Zeitbaustein repräsentiert einen exakt definierten Arbeitsinhalt und wird durch einen einzigen Zeitwert genau spezifiziert. Durch „Zusammensetzen“ der Bausteine erfolgt die Beschreibung von konkreten Arbeitsaufgaben bzw. Prozessfunktionen und automatisch die Berechnung ihrer Zeit. Bei MTM-Logistik stehen Zeitbausteine für Transporttätigkeiten, maschinelles und manuelles Handhaben, Be- und Entladen, Verpacken sowie für administrative Tätigkeiten zur Verfügung (Kuhlang & Matyas, 2005). Anhand der Prozessbausteine können die Aufwände für die Logistik abhängig vom Produktionsplan für einzelne Perioden bestimmt werden.

2.4 Produktionsplanung und Steuerung innerhalb der CPPS

Cyber Physikalische Systeme (CPS), engl. Cyber-Physical-Systems, sind beschrieben als umfassende **eingebettete Systeme**, die mittels **Sensoren** physikalische Daten erfassen und mittels **Aktoren** auf physikalische Vorgänge einwirken. Sie sind mittels digitaler Netze untereinander verbunden und können weltweit verfügbare Daten und Dienste nutzen.

Ferner verfügen sie über **multimodale Mensch-Maschine- Schnittstellen** (Plattform Industrie 4.0, 2014a). **Cyber-Physikalische Produktionssysteme (CPPS)**, engl. Cyber-Physical-Production-Systems, stellen die Anwendung von Cyber-Physical Systems in der produzierenden Industrie dar und agieren damit als Befähiger zur durchgängigen Betrachtung von Produkt, Produktionsmittel und Produktionssystem unter Berücksichtigung sich ändernder und geänderter Prozesse (Plattform Industrie 4.0, 2014b).

Ein Cyber-Physikalisches System verfügt über Sensoren, Aktoren eine Benutzerschnittstelle und Funktionen, welche die Aufgaben der Datenaufnahme, -verarbeitung und -ausgabe erfüllen. Dabei sind die Sensoren und Aktuatoren smarte in das CPS eingebundene Systeme. CPS verfügen über hochwertige Funktionen beispielsweise zur Signalverarbeitung oder zur Regelung, sowie über IP-fähige Kommunikationsschnittstellen. CPS sind in zwei Richtungen vernetzt – in einer horizontalen Richtung und in einer vertikalen Richtung. Während ein CPS in horizontaler Richtung auf gleicher Ebene, beispielsweise mit einem nachgelagerten Fertigungsschritt oder zwischen zwei Organisationseinheiten kommuniziert, erfolgt die Kommunikation eines CPS in vertikaler Richtung mit über- oder untergeordneten Systemen. Diese Kommunikationsrichtungen spiegeln den zentralen Gedanken der verteilten Intelligenz sowie der Dezentralität wieder. Durch dezentrale Entscheidungen sinkt die Komplexität eines Gesamtsystems und Entscheidungen können in Arbeitsabläufen selbstständig getroffen werden. Technische Kriterien von CPS sind beispielsweise Anforderungen hinsichtlich der Echtzeitfähigkeit, die je nach Anwendungsfall variieren kann. Generell sind dabei vor allem technische und wirtschaftliche Kriterien abzuwiegen (IPA, 2014).

Schuh et al. (2013b) stellen einen konzeptionellen Entwurf für ein Cyber-Physikalisches System zur Produktionsplanung und -steuerung dar.

Das Beurteilungssystem zu einer Entscheidungsfindung wird hier durch eine Simulationsplattform unterstützt. Das implementierte Modell ist mit Rückmeldedaten der Produktion parametriert. Nach jedem Simulationslauf,

wird das Ergebnis mit direkten Rückkopplungsdaten aus der Produktion verglichen, um die Qualität des Simulationsmodells zu bestimmen und im Bedarfsfall die Simulationsparameter nachzubessern (inneren Regelkreis in Abbildung 1). Der äußere Regelkreis berücksichtigt die ständige Optimierung des Produktionssystems. Als selbstlernendes System bildet das Simulationsmodell die Realität besser ab, je mehr Simulationsläufe durchlaufen werden und je öfter die Parameter angepasst werden.

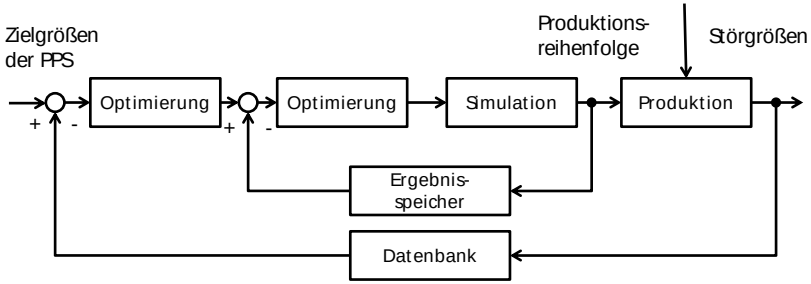


Abbildung 1: Architektur eines Cyber-Physikalischen Produktionskontrollsystems (Schuh et al., 2013b)

Im Modell werden der operative Mitarbeiter und der Meister nicht in den Regelkreis einbezogen, wodurch das Wissen dieser Gruppe nicht in die Modelle einfließt. Das Potential zur Nutzung der kollektiven Intelligenz wird somit nicht voll ausgeschöpft.

2.5 Data Mining in der Produktionsplanung und Steuerung

Obwohl Data Mining Methoden in unterschiedlichen Bereichen wie Marketing, Finanzplanung oder Analyse biologischer Strukturen erfolgreich eingesetzt werden, finden sich im Produktionsumfeld verhältnismäßig wenige Anwendungen (Choudhary, 2009, S.514), was einerseits auf die Echtzeitanforderung und andererseits auf die starken Unterschiede in der Struktur der produktionsspezifischen Daten zurückzuführen ist (Kuntze et al. 2008; S.609 f.). Vor allem im Bereich der Produktionsplanung und Steuerung und im Speziellen in der Integration von Data Mining in ERP Systemen finden sich wenige Anwendungsfälle und Forschungslücken können

aufgezeigt werden (Gröger et al., 2012, S.4). Dabei wird neben der Herausforderung schwer prognostizierbarer Nachfrage, die mangelnde Vertrautheit der Forscher im Bereich der Produktionslogistik mit den Methoden und Algorithmen von Data Mining, als Ursache für diese Forschungslücken gesehen (Ismail et al., 2009, S.157). Bisher wurden in diesem Zusammenhang die Potentiale, welche sich durch Data Mining in Hinblick auf eine Erhöhung der Datenzuverlässigkeit ergeben, nicht berücksichtigt (Schuh et al. 2013a, S.45). Vor dem Hintergrund der stetigen Zunahme von Produktionskomplexität können Data Mining Methoden jedoch einen wertvollen Beitrag zur Beherrschung dieser Komplexität leisten und vor allem in folgenden Bereichen unterstützend eingesetzt werden (Bernard, 2012; Westkamp et al., 2014):

- Stammdaten und Variantenmanagement
- Versuchsplanung und Produktgestaltung
- Prozess-, Qualitäts- und Zustandsüberwachung
- Prozessoptimierung
- Analyse von Kennzahlen
- Produktionsplanung und Steuerung

Im Bereich der Produktionsplanung und Steuerung können mittels Data Mining aus einer Vielzahl vorhandener Produktionsdaten Informationen zeitkritisch als Grundlage für Entscheidungsunterstützungssysteme zur Verfügung gestellt werden (Tanuska et al., 2012). Vor allem effiziente Algorithmen für die Reihenfolgeplanung (Wang et al., 2014) bzw. Planungsregeln für die Produktionssteuerung (Rainer 2013) können mittels Data Mining erzielt werden.

3 Konzept

In Abbildung 2 wird ein Konzept dargestellt, das zum Ziel hat, die Akzeptanz von Produktionsplänen – die durch den Einsatz IKT-gestützter

Planungssysteme erzeugt wurden – einerseits über alle Ebenen – operative Mitarbeiter, Meister und Planer – hinweg zu steigern.

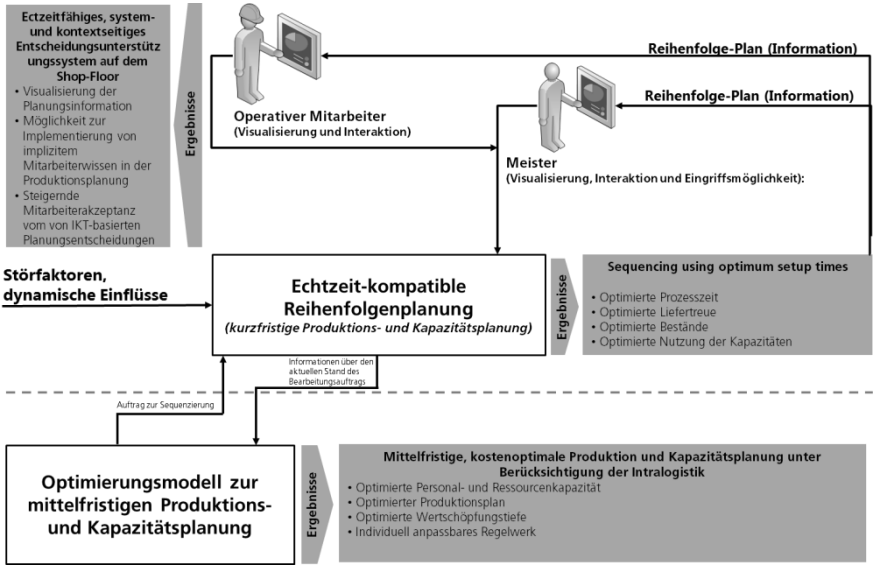


Abbildung 2: Schematische Darstellung zu Integration von Lösungskompetenzen operativer Mitarbeiter des Shop-Floors in der Produktionsplanung und -steuerung

Das Konzept besteht aus zwei grundlegenden Elementen: Zum einen der Einsatz realistischerer Modelle und zum anderen die Integration von Mitarbeitern in die Produktionssteuerung.

Das erste Element des Konzepts wird durch die Integration der intralogistischen Aspekte in die mittelfristige Produktions- und Kapazitätsplanung als auch durch die Integration in die Reihenfolgeplanung realisiert. (siehe 3.1)

Da davon auszugehen ist, dass auch bei der Anwendung von verbesserten Modellen nicht alle Restriktionen und Abhängigkeiten berücksichtigt werden können und durch den Einsatz komplexer Modelle die Transparenz in der Planung sinkt, sollen die operativen Mitarbeiter und Meister stärker in die Planung einbezogen werden. Dies wird durch den oberen Teil der

Grafik verdeutlicht. Dabei wird durch den Einsatz moderner IKT-Lösungen eine Schnittstelle realisiert, die den Mitarbeitern die Möglichkeit bietet, Planungsergebnisse in einer Simulationsumgebung zu verändern.

Nach einem erneuten Optimierungslauf kann die, unter Berücksichtigung dieser (geänderten) Restriktionen, generierte Lösung mit der ursprünglichen Lösung verglichen werden. Eine übergelagerte Entscheidungsinstanz kann die neuen Restriktionen dauerhaft übernehmen und bei der weiteren Planung berücksichtigen.

3.1 Vorgehensweise zur Implementierung logistischer Prozesse und Kapazitäten in die Produktionsplanung und -steuerung

Zur Implementierung logistischer Prozesse und Kapazitäten ist zunächst eine Prozessanalyse und -bewertung intralogistischer Abläufe z.B. Transport, Handhabung, Informationsverarbeitung etc. von Nöten. Die daraus identifizierten Prozessbausteine müssen unterschiedlichen Aufwandstreibern zugeordnet werden. Diese können sein

- Auftragsbezogene Aufwände: z.B. Informationsverarbeitung
- Transportbezogene Aufwände: z.B. Handhabungsaufwände
- Wegstreckenabhängige Transportzeiten
- Schichtbezogene Aufwände: Wartung der Transportmittel, Schichtbesprechung/-übergaben
- Organisationale Aufwände: Gruppenbesprechungen, KVPs, Verteilzeiten

Durch Einteilung der Prozessbausteine in die entsprechenden Kategorien kann in weiter Folge der Gesamtaufwand abhängig vom Produktionsprogramm determiniert werden.

Die benötigten Stammdaten für die Implementierung sind damit die Wegstrecken zw. Quellen und Senken, die Zeitbausteine und Transportmengeneinheit je Produkt. Aus dem ERP-System lassen sich z.B. Quelle und Senke-Beziehungen aus Arbeitsplänen ableiten, müssen jedoch

um Zwischenlagerstufen ergänzt werden, sofern diese vorhanden sind. Die Wegstrecken, die für die Bestimmung der Transportzeiten notwendig sind, können aus dem Layout der Fabrik entnommen werden. Somit ergibt sich ein sehr hoher Aufwand zur Datenerhebung und -pflege, der durch eine Integration der Fabrikplanungssoftware mit dem operativen Produktionsplanungssystem handhabbar gemacht werden kann.

Im Weiteren ist ein Optimierungsmodell für die mittelfristige Produktions- und Kapazitätsplanung sowie ein Modell zur kurzfristigen Terminplanung zu erstellen und entsprechende Algorithmen zu entwickeln. Das entwickelte Modell ist schließlich in eine Software zu überführen. (siehe 3.3.)

3.2 Vorgehensweise zur Einbeziehung der Mitarbeiter durch Implementierung von Data Mining Agenten in einem Produktionssteuerungssystem

Durch die fortschreitende Ausweitung der Vernetzung zwischen digitaler und reale Welt und den damit verbunden steigenden Datenmengen und -anforderungen innerhalb der Produktion – aufgrund der durchgängigen Integration von informationstechnischen Lösungen – nimmt die Bedeutung von Data Mining kontinuierlich zu. Durch eine systematische Integration von Data Mining in die PPS kann einerseits die Datenqualität erhöht werden und andererseits den Herausforderungen bezüglich Echtzeitverarbeitung der Daten genüge getan werden (Westkamp et al., 2014; Schöning, 2014, S.543). Dadurch soll ein Vertrauen der Mitarbeiter in die Planung und im speziellen der Akzeptanz von IT-Systemen geschaffen werden.

Durch die Implementierung von Data Mining Algorithmen in der PPS können Daten unterschiedlicher Wissensquellen echtzeitnahe miteinander verknüpft werden. Ziel ist die Ableitung von Planungsregeln und Kennzahlen welche dem Menschen bei der Planung unterstützen (Rainer, 2012, S.355), und unter Berücksichtigung der menschlichen Interaktion eine Optimierung der Produktionsplanung ermöglicht.

In Abbildung 3 wird ein Konzept zur Implementierung eines Data Mining Agenten in einem Produktionssteuerungssystems vorgestellt.

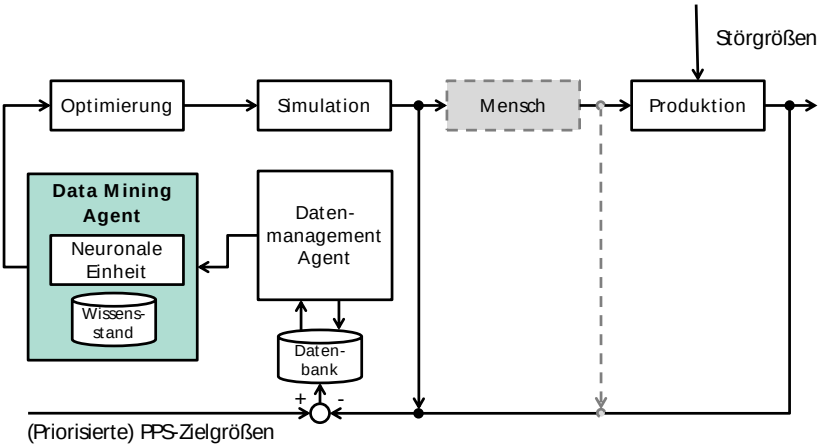


Abbildung 3: Konzept zur Implementierung eines Data Mining Agenten im Produktionssteuerungssystems

Der Data Management Agent übernimmt die Verwaltung der Daten und ist mit einer Datenbank gekoppelt, welche die Zielgrößen der PPS, wie beispielsweise Bedarfe, Kostensätze etc., enthält und regelmäßig aktualisiert wird. Die Datenbank wird zusätzlich sowohl mit Messdaten aus der realen Produktion, digitalen Ergebnissen der Simulation als auch mit Eingabedaten resultierend aus einer menschlichen Interaktion gespeist.

Der Datenmanagement Agent übernimmt im Folgenden die vorläufige Aufbereitung der Daten. Das bedeutet, dass Ausreißer eliminiert werden und Daten normalisiert und in das für den Data Mining Agenten notwendige Datenformat umgewandelt werden. Im Data Mining Agent wird ein Lernprozess initialisiert, in welchem die neuronalen Netze entsprechend den Daten, welche vom Datenmanagement Agenten aufbereitet wurden, geordnet werden. Durch die darauffolgende Bildung von Clustern, welche von den neuronalen Netzen identifiziert wurden, wird die Wissensbasis des Data Mining Agenten gebildet. Aufgrund der durch den Data Mining Agenten zur Verfügung gestellten Daten, kann schließlich eine Optimierung der Produktionsplanung und Steuerung erfolgen. Mittels einer

durchgeführten Simulation stellt sich ein iterativer Prozess ein, in dem Aufgrund der Simulationsergebnisse und der realen PPS Zielgrößen eine neuerliche Optimierung erfolgt. Somit ergibt sich ein Regelkreis der die menschliche Interaktion berücksichtigt und dadurch das Wissen der Mitarbeiter in die Planung integriert. Damit erhält man ein ganzheitliches System welches in der Lage ist echtzeitnah auf Änderungen in der realen Welt zu reagieren (in Anlehnung an Parshutin & Borisov, 2009).

3.3 Umsetzung in eine Planungs- und Steuerungssoftware

Oben genanntes Konzept muss in eine Software umgesetzt werden, die in ein Backend und in ein Frontend für die Benutzerinteraktion auf dem Shop-Floor aufgeteilt ist. Das Backend wird verwendet, um die Optimierungsalgorithmen auszuführen. Abhängig von den Algorithmen kann das Backend unter mehreren Modulen verteilt werden. Das Frontend ermöglicht die Nutzung von mobilen Geräten für die Mitarbeiter auf dem Shop-Floor.

Ferner soll das Frontend den Mitarbeitern auf dem Shop-Floor ermöglichen, die Konsequenzen ihres Handelns und die Ergebnisse des geplanten und optimierten Produktionsablaufs nachvollziehbar darzustellen. Eine weitere Funktion des Frontends soll des Weiteren auch darin bestehen, dass Mitarbeiter befähigt werden, ihre praktischen Kenntnisse in die laufenden Prozesse der Produktionsplanung einzubinden. Dieses Ziel soll das Risiko des Verlustes von Akzeptanz und damit negative Einflüsse auf die Produktivität und die Qualität des Produktionsprozesses reduzieren.

Für die Frontend-Anwendung ist die Entwicklung einer dynamischen Benutzerschnittstelle für verschiedene Arten von Eingabegeräten und Bildschirmgrößen von Nöten, da v.a. Mobiltelefone und Tablet-PCs als alternative Eingabegeräte ein wichtiger Aspekt für eine breite Akzeptanz des Frontends auf dem Shop-Floor darstellen.

4 Ergebnisse

4.1 Auswirkungen von Steuerungseingriffen auf die interne Logistik

In einer Simulationsstudie für die Automobilzulieferindustrie wurde folgende Fragestellung untersucht. „Welche Auswirkungen hat die Stabilität von Produktionsplänen auf die Auslastung der internen Logistik?“

Hierfür wurden eine Montagelinie für Scheinwerfer und der montagenahe Supermarkt modelliert. Das Montageband besteht aus einer Vormontage in der Module vormontiert werden, die dann auf dem Hauptmontageband endmontiert werden. Die Montageprozesse wurden nicht weiter betrachtet. Neben dem Supermarkt gibt es vor den Linien noch Pufferflächen, welche als Stellplätze für die Transportroller dienen auf denen Boxen mit den Teilen im Supermarkt zwischengelagert und zur Linie gebracht werden. Als logistische Prozesse wurden identifiziert:

- Transportroller zum Pufferplatz bringen
- Boxen von Puffer an Montageband bringen
- Transportrolle, Boxen und Verpackungsmaterial (Zwischenlagen und Gefache) von der Montagelinie abtransportieren und sortieren
- Materialbestellung mit Readern tätigen
- Nebentätigkeiten

Die Nebentätigkeiten wurden als fixe Zeit unabhängig von den Ver- bzw. Entsorgungsprozessen kumuliert aufgenommen und als Grundlast einbezogen.

Es wurde die Annahme getätigt, dass die Pufferfläche vor der Montagelinie sehr groß ist, sodass der Logistiker bereits Material aus dem Supermarkt im Puffer zwischenlagern kann, um bei der Rüstung dieses Material schneller an die Montagelinie bringen zu können und somit die Montage schneller wieder zu beginnen. Eine weitere Annahme war, dass die Montageplätze schneller rüsten können als die Logistiker. Das bedeutet, dass die Montagerüstzeit keine Stillstand am Band verursacht, sondern das Fehlen

des neuen Materials in Folge der Rüstung. Die letzte Annahme war, dass die Montage erst wieder beginnt, wenn alle Materialien am Montageband verfügbar sind.

In 3 Studien wurde untersucht, wie sich die Auslastung der Logistiker bei abhängig von der Vorschauzeit – die Zeitspanne, gemessen in Takten, zwischen der Bekanntmachung einer anstehenden Umrüstung des Montagebandes und des Beginns der Rüstung – verhält. Die drei Studien waren:

- Keine Vorschau auf den Montageplan: Die simuliert einen plötzlichen Rüstwechsel
- Lange Vorschau auf den Montageplan: Dies würde eine stabile Einhaltung des Montageplans simulieren (keine plötzlichen Rüstwechsel in Folge von z.B. Materialengpässen aus der Vorfertigung)
- Keine Rüstung: Hier sollte die Grundlast untersucht werden

Des Weiteren wurde für Studie eins uns zwei unterschiedliche Reihenfolgen der Produkte getestet, da bestimmte Produktewechsel weniger Rüstaufwand verursachen als andere.

Ergebnisse der Simulationsstudie

Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass die Logistik einen hohen Einfluss auf die Auslastung des Montagebandes hat. Während die Grundauslastung der Logistiker ohne Rüstung bei ca. 76 % liegt, so steigt diese Auslastung in Folge der Rüstungen auf bis zu 91% an, wenn genügend Vorschauzeit vorhanden ist. Bei plötzlichen Rüstwechseln sinkt die Auslastung wieder, da kein Material für die nächste Rüstung im Puffer bereitgestellt wird.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die interne Logistik in modernen Produktionssystemen als Ressource mit beschränkter Kapazität genauso berücksichtig werden sollte wie Maschinen und Anlagen. Dabei geht es im ersten Schritt nicht darum, die Reihenfolge der Arbeitsaufgaben eines Logistikers in Bezug auf z.B. eine Wegoptimierung zu optimieren,

sondern vielmehr die Auswirkungen von Produktionsplänen auf die Logistik zu verstehen und proaktive in der Erstellung von Produktionsplänen zu integrieren.

4.2 Entscheidungsunterstützung von Planern

Ein weiterer Aspekt des Konzepts aus Kapitel 3 ist die Einbindung des Mitarbeiterwissens. Im Forschungsprojekt „KoKa - Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems zur kostenoptimalen Kapazitätsanpassung für den kurz- und mittelfristigen Planungshorizont“ wurde eine Entscheidungsunterstützungssystems entwickelt, das dem Planer erlaubt aktiv Ergebnisse zu verändern und die dadurch vorgegeben Ergebniswerte als zusätzliche Beschränkungen für einen neuerlichen Optimierungslauf festzulegen. Durch verschiedene Darstellungsformen und Analysemöglichkeiten für den Planer, konnte die Akzeptanz der Lösung erheblich gesteigert werden. Dies lag vor allem daran, dass der Planer die vorgeschlagene Lösung besser verstehen konnte und notwendige Vereinfachungen des Modells besser ausgleichen konnte. Diese Vereinfachungen sind oft notwendig, um Modelle lösbar zu halten und wurden bei der Modellierung bewusst eingegangen. Es zeigte sich auch, dass die Anzahl der Veränderung der ursprünglichen Lösung mit fortlaufender Bedienung des Systems abnahm wurde. Dies kann als ein gesteigertes Vertrauen ins das System interpretiert werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Wie in den Ergebnissen gezeigt wird, kann die Akzeptanz der Mitarbeiter für eine IKT-gestützte Produktionsplanung und -steuerung durch eine verstärkte Einbindung dieser in den Planungs- und Steuerungsprozess erreicht werden. Ansätze wie beispielsweise die Simulation von Auswirkungen von Reihenfolgeänderungen und Visualisierung durch Kennzahlen sind hierfür notwendig. In weiterer Folge ist zu untersuchen, welche Kennzahlen für welche Mitarbeitergruppen, – Planer, Meister und operative Mitarbeiter – aussagekräftig und nachvollziehbar sind, um die

Tragweite ihrer vorgeschlagenen Planänderungen verstehen und interpretieren zu können.

Des Weiteren ist zu untersuchen, wie die operativen Mitarbeiter während ihrer Arbeitstätigkeit solche Reihenfolgeänderungen in einem IT-System simulieren können. Hier gilt es entsprechende mobile Devices wie z.B. Datenbrillen, Tablets oder Smartphones auf Eignung zu untersuchen. Darüber hinaus müssen Prozesse entwickelt werden, wie Änderungsvorschläge durch den operativen Mitarbeiter am Shop Floor, in die höheren Entscheidungsinstanzen transportiert werden können, um dort umgesetzt oder verworfen zu werden. Abschließend müssen Methoden entwickelt werden, wie diese Änderungen auch als neue Restriktionen in das Planungssystem eingebracht werden, um ein selbstlernendes System zu realisieren.

Literatur

Berlak, J. et al. (2009). E.EDV-Unterstützung in der Produktion und im Materialfluss. In: Dickamnn, P. (Hrsg.). Schlanker Materialfluss. Springer Verlag

Bernard, T. (2012). Datenbestände optimal nutzen - Entscheidungsunterstützung im Produktionsumfeld mit Data-Mining-Werkzeugen; in P&A-Kompendium 2011-2012, S. 115-117, publish-industry Verlag

Bokranz, R. / Landau, K. (2006). Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag.

Choudhary, A. et al. (2009). Data mining in manufacturing: a review based on the kind of knowledge; in: Journal of Intelligent Manufacturing Volume 20, Issue 5, S.501-521

Eversheim, W. (2002). Organisation in der Produktionstechnik. Band 3: Arbeitsvorbereitung. 4. Aufl., ISBN: 978-3-642-62640-1, Springer Verlag

Gröger, C. et al. (2012). Data mining-driven manufacturing process optimization; in: Proceedings of the World Congress on Engineering, Vol. 3, S. 4-6)

Günther, H.O. / Tempelmeier, H. (2012). Produktion und Logistik, 9.Auflage, ISBN-13: 978-3642251641, Springer Verlag

IPA (2014). Fraunhofer IPA. Strukturstudie „Industrie 4.0 für Baden-Württemberg". Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden Württemberg. 2014

Ismail R. et al. (2009). Data mining in production planning and scheduling: A review. In Data Mining and Optimization, DMO'09. 2nd Conference on Data Mining and Optimization (S. 154-159)

Kletti, J. (2007). Konzeption und Einführung von MES-Systemen: Zielorientierte Einführungsstrategie mit Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, Fallbeispielen und Checklisten. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Kuhlang, P. (2010). Prozesse und Produktivität – Produktivitätssteigerung durch die kombinierte An-wendung von MTM und Wertstromdesign, in: B. Britzke [Hrsg.] MTM in einer globalisierten Wirtschaft. Arbeitsprozesse systematisch gestalten und optimieren. Landsberg/ Lech : MI Verlag, 2010.

Kuhlang, P. / Edtmayr, T. / Sihn, W. (2011). Methodical approach to increase productivity and reduce lead time in assembly and production-logistic processes, in: CIRP Journal of Manufacturing and Technology, 4, pp. 24-32

Kuhlang, P. / Matyas, K. (2005). Entwicklung von Logistikprozessen; in: Schnäppi, B. et al. (Hrsg.); Handbuch Produktentwicklung; Carl Hanser Verlag; 2005.

Kuntze, H. et al. (2008). Entscheidungsunterstützung im Produktionsumfeld mit Data Mining Werkzeugen, in: Automatisierungs-ATLAS 2011, SPS-Magazin, Band 5, S. 608-610

Lödding, H. (2008). Verfahren der Fertigungssteuerung -Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration, ISBN: 978-3-540-76859-3, Springer Verlag

Maynard, H.B. / Stegemerten, G.J. / Schwab, J.L. (1948). Methods-time Measurement, McGraw Hill, New York.

Nyhuis, P. / Wiendahl, H.-P. (2012). Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen, 3. Aufl ed. Springer Vieweg, Berlin, Online-Ressource.

Parshutin, S. / Borisov, A. (2009). Agents Based Data Mining and Decision Support System in Agents and Data Mining Interaction ; Lecture Notes in Computer Science Volume 5680, 2009, pp 36-49

Plattform Industrie 4.0 (2014a). Cyber-Physical-System: Onlinequelle: http://www.plattform-i40.de/glossar/cyber-physical-systems-cps. Eingesehen am 15.04.2014.

Plattform Industrie 4.0 (2014b). Cyber-Physical-Production-System: Onlinequelle: http://www.plattform-i40.de/glossar/cyber-physical-production-systems -cpps. Eingesehen am 15.04.2014.

Rainer, Ch. (2012). Wissensbasierte Produktionsplanung in der flexibilitätsorientierten Prozessindustrie, BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte, Volume 157, S.354-359.

Rainer, Ch. (2013). Data Mining as Technique to Generate Planning Rules for Manufacturing Control in a Complex Production System, in: Robust Manufacturing Control, S. 203-214 , Springer Verlag.

Rossi, A. (2014). Flexible job shop scheduling with sequence-dependent setup and transportation times by ant colony with reinforced pheromone relationships. International Journal of Production Economics, 153(0), 253–267.

Schenk, M. et al. (2014). Fabrikplanung und Fabrikbetrieb - Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik, ISBN: 978-3-642-05458-7 , Springer Verlag

Schuh, G. et al. (2013a). Improving Data Integrity in Production Control , in: Procedia CIRP Volume 9, S. 44–48

Schuh, G. et al. (2013b). Cyber-Physical Production Management. In: Prabhu, V., Taisch, M., Kiritsis, D. (Hrsg.): APMS 2013. Part II. IFIP AICT 415. pp. 477 - 484

Schuh, G. / Potente, T. / Thomas, C. (2013c). Design of Production Control's Behavior. Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems 2013, 7(0), 145–150. doi:10.1016/j.procir.2013.05.025

Schuh, G. / Stich, V. (2012). Produktionsplanung und -steuerung 1 - Grundlagen der PPS, 4., überarbeitete Auflage, ISBN: 978-3-642-25422-2, Springer Verlag

Schöning, H. (2014). Data Mining und Analyse, in: Bauernhansl et al. (Hrsg.):Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, ISBN: 978-3-658-04681-1, Springer Verlag

Schönsleben, P. (2011). Integrales Logistikmanagement - Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend, 6. Auflage, ISBN: 978-3-642-20380-0, Springer Verlag

Stadtler, H. (2011). Multi-level single machine lot-sizing and scheduling with zero lead times, European Journal of Operational Research, Volume 209, Issue 3, S.241–252

Tanuska, P. et al. (2012). Data Mining Model Building as a Support for Decision Making in Production Management; in: Advances in Intelligent and Soft Computing Volume 166, S. 695-7

Thome, R. (2007). Business-Software. ERP, SCM, APS, MES – was steckt hinter dem Begriffsdschungel der Business-Software-Lösungen. Mainfränkisches Commerce Kompetenzzentrum

VDI 5600 (2007). Verein Deutscher Ingenieure: Fertigungsmanagementsysteme - Manufacturing Execution Systems (MES), Beuth Verlag Berlin

Wang, Y. et al. (2014). Data Mining Based Approach for Jobshop Scheduling; in: Proceedings of 2013 4th International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation (IEMI2013) S. 761-771

Westkamp, M. et al. (2014). Einsatz und Nutzenpotenziale von Data Mining in Produktionsunternehmen; Studie Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

Wiendahl, H.-H. / Behringer, S. (2006). Stolpersteine der Lieferterminermittlung und -erfüllung, in: Liefertreue im Maschinen- und Anlagenbau: Stand - Potenziale - Trends, Schuh G., Westkämper E., study results of FIR, IPA and WZL, Aachen and Stuttgart, pp.19-32.

Wiendahl, H.-P. / et al. (2007). Changeable Manufacturing – Classification, Design and Operation. Annals of the CIRP 56 (2), S. 782-809.

Zhang, Q. / Manier, H. / & Manier, M.-A. (2012). A genetic algorithm with tabu search procedure for flexible job shop scheduling with transportation constraints and bounded processing times. Computers & Operations Research, 39(7), 1713–1723.

Umgang mit Paradoxien von Industrie 4.0 – Die Bedeutung reflexiven Arbeitshandelns

Uta Wilkens, Thomas Süße, Bernd-Friedrich Voigt

1 Paradoxien von Industrie 4.0 – Erscheinungsformen und Herausforderungen

Die neuere Organisationsforschung macht auf Paradoxien aufmerksam, die besondere Herausforderungen für das Management mit sich bringen. Dieses muss in der Lage sein, in sich widersprüchlich erscheinende Handlungen und Praktiken parallel zu verfolgen und dynamisch zu balancieren (vgl. Evans, 1999; Sutherland & Smith, 2011). Jarzabkowski et al. (2013) beschreiben vier Paradoxien, die sich auf die Prinzipien des Organisierens, der Leistungserbringung, der Zugehörigkeit und Zusammenarbeit und auf die Lernprozesse beziehen. Diese nachfolgend näher auszuführenden Paradoxien treten insbesondere in neuen Arbeitsfeldern auf und lassen sich im Kontext von Industrie 4.0 deutlich erkennen.

Das Paradoxon des Organisierens (vgl. Jarzabkowski et al., 2013) tritt auf, wenn Kontroll- und Commitment-basierte Organisationshandlungen (dazu Walton, 1985) gleichermaßen gefordert sind und wenn Stabilität und Veränderung zu balancieren sind (dazu Lüscher & Lewis, 2008). So bilden Dezentralisierung und Automatisierung im Kontext von Industrie 4.0 eine Einheit. Die Dezentralisierung bringt dabei nicht mehr Autonomie und Entkoppelung vom Gesamtsystem. Vielmehr sorgt die Form der Automatisierung und Vertikalisierung (siehe Fraunhofer-Studie zu Industrie 4.0; vgl. Spath, 2013) für strenge Prozesse (Spath, 2011). Ebenso gehen Aktivitäten der Flexibilisierung mit Bestrebungen zur Stabilisierung der Belegschaften einher.

Das Paradoxon der Leistungserbringung bezieht sich auf die Gleichzeitigkeit von Exploitation und Exploration (March, 1991). Verwertungsaspekte und

Innovationsanliegen müssen parallel verfolgt werden. Auch hier verweist die Fraunhofer-Studie (vgl. Spath, 2013) auf Notwendigkeiten innovativer Arbeitskulturen, aber auch auf klare Verwertungsaspekte über neue Geschäftsmodelle. Industrie 4.0 erfordert Innovationssprünge unter gleichzeitiger Erwartung schnell sichtbarer Erfolge.

Das Paradoxon der Zugehörigkeit und Zusammenarbeit ergibt sich durch die Mehrfacheinbindung von Mitarbeitern, die gleichzeitig unterschiedlichen Arbeitsgruppen zugehörig sind und nicht selten in organisationsübergreifenden Teams arbeiten. Damit kann es Spannungen zwischen den teambezogenen und organisationsbezogenen Zielen, Wertorientierungen und kulturellen Faktoren geben (vgl. Jarzabkowski et al., 2013). In genau dieser Form der flexiblen Teamstrukturen und eines nahezu modularen Personaleinsatzes werden die Formen der Zusammenarbeit bei Industrie 4.0 beschrieben (vgl. Spath, 2013).

Mit Blick auf das vierte Paradoxon des Lernens betonen Jarzabkowski et al. (2013), dass dieses ein übergreifendes sei. Einerseits geht es darum, die Erfahrungen und mentalen Modelle der Vergangenheit zu wahren, andererseits aber auch darum, mit diesen bewusst zu brechen, so dass auch das Verlernen zu initiieren ist (vgl. Lewis, 2000; Smith & Lewis, 2011). Industrie 4.0 baut auf den technischen Expertisen und Errungenschaften der Vergangenheit auf, kann als Ausdruck einer neuen industriellen Revolution aber letztlich nur Raum greifen, indem mit bisherigen Denkmodellen und Optimierungslogiken zugleich auch komplett gebrochen wird.

In dieser Hinsicht bleiben die bisherigen Beschreibungen von Industrie 4.0 mit Blick auf die Organisations- und Personalfragen in der Regel zu einseitig und in der Tendenz unterkomplex, da die inhärenten Widersprüche nicht als Herausforderung benannt werden. Nimmt man sich dieser Herausforderungen nicht an, sind die Managementsysteme auf Industrie 4.0 aber möglicherweise nicht genügend vorbereitet. Es deutet sich an, dass in der Organisations- und Personalarbeit von Industrie 4.0 neue Problemlösungsansätze zu erarbeiten sind. Aus der Organisationsforschung lässt sich dabei der Hinweis gewinnen, bestehende Paradoxien nicht in die

eine oder andere Richtung aufzulösen bzw. den latenten Konflikt zu ignorieren, sondern diesen zu akzeptieren und nach einer dynamischen Balance zwischen den widerstreitenden Polen zu suchen (vgl. Evans & Doz, 1989; Poole & Van de Ven, 1989).

Im Fortgang dieses Beitrages zeigen wir einen Ansatz zum Umgang mit Paradoxien von Industrie 4.0. Wir stellen dabei auf das Konstrukt des reflexiven Arbeitshandelns ab und veranschaulichen dessen Wirkung am Beispiel von integrierten Produkt-Service-Systemen (PSS), die im deutschsprachigen Raum auch als hybride Leistungsbündel bekannt sind (dazu Oliva & Kallenberg, 2003; Meyer et al., 2010).

2 Dynamische Balance zwischen Paradoxien durch reflexives Arbeitshandeln

2.1 Konstruktbeschreibung

Wenn es im Arbeitskontext auf eine besondere Balancefähigkeit ankommt, dann geraten individuelles Arbeitshandeln und organisationale Bewältigungsmechanismen ins Zentrum der Betrachtung. Dabei wird die Fähigkeit, mit Paradoxien umgehen zu können, als *mindfulness* beschrieben (vgl. Levinthal & Rerup, 2006; Weick & Sutcliffe, 2006). Für den deutschsprachigen Raum werden wir dafür den Begriff des reflexiven Arbeitshandelns verwenden. Es geht um die Fähigkeit, neue Denkmodelle und Klassifikationssysteme zu entwickeln, um mit Ambiguität umgehen zu können (vgl. Weick et al., 2008) und vor diesem Hintergrund einen Transformationsprozess zu vollziehen. Der Definition von Jordan et al. (2009, S. 468) folgend geht es um “a state of mind or mode of practice that permits the questioning of expectations, knowledge and the adequacy of routines in complex and not fully predictable social, technological, and physical settings”. Das maßgebliche an dem Konstrukt ist, dass es kognitive Fähigkeiten beschreibt, die auf den konkreten Kontext bezogen einen Reflexionsprozess erzeugen, der zu einer Mitgestaltung und

Weiterentwicklung des Kontexts führt (Sternberg, 2000; Salvato, 2009). Mit Jordan et al. (2009) kann man das Konstrukt daher auch als interaktive Routine verstehen.

2.2 Zur Bedeutung reflexiven Arbeitshandelns in Produkt-Service-Systemen

Reflexives Arbeitshandeln ist besonders in Arbeitskontexten gefordert, in denen Individuen mit Widersprüchlichkeiten bzw. Paradoxien konfrontiert sind. Integrierte Produkt-Service-Systeme (PSS) sind ein exemplarisches Anwendungsfeld von Industrie 4.0, in dem die bereits skizzierten Paradoxien gut beobachtbar sind. Bei PSS gilt es den Service-Gedanken in der gesamten Prozesskette um die Planung, Entwicklung und Erbringung des Produktes zu berücksichtigen. Während die Produkt-orientierte Logik auf Standardisierung und Effizienzgewinne ausgerichtet ist, stehen bei der Service-orientierten Logik individualisierte, kundenspezifische Lösungsangebote im Zentrum (vgl. Martinez et al., 2010; Penttinen & Palmer, 2007; Windahl & Lakemond, 2006). Diesen paradigmatischen Unterschieden folgen dann weitere Dualitäten, gerade auch um flexible dezentrale Lösungen mit einer hohen Automatisierung, die wiederum Standardisierung voraussetzt, zu verbinden, um aus der Innovation Effizienzgewinne zu ziehen (vgl. Süße et al., 2013).

Zwar betont die Forschung zu Industrie 4.0 die Relevanz des Themas für das Personalmanagement. Der Durchdringungsgrad ist jedoch noch nicht sehr tiefgehend. Es wird auf quantitative und qualitative Personalbedarfe, insbesondere auf gestiegene Qualifikationsanforderungen abgestellt (Spath, 2013). Auf die konkreten Spannungsfelder, die sich aus der Steuerung intelligenter Maschinen durch Menschen versus der Steuerung von Menschen durch intelligente Maschinen ergeben, wird dabei jedoch nicht eingegangen. Auch werden die behandelten Kompetenzfragen (dazu Modrow-Thiel et al., 2010) noch zu wenig an dem de facto zu erbringenden Umgang mit Paradoxien ausgerichtet. Es wird bereits deutlich, dass

gestiegene Anforderungen eher in den systemgestaltenden Arbeitsfeldern als in den automatisiert gesteuerten Arbeitsbereichen zu vermuten sind.

Um zum Schließen dieser Forschungslücke beizutragen, analysieren und spezifizieren wir nachfolgend das Konstrukt des reflexiven Arbeitshandelns für Industrie 4.0 am Anwendungsfeld der PSS. Auf diese Weise findet eine Auseinandersetzung mit den konkreten Anforderungen an Arbeitshandeln angesichts in sich widersprüchliche erscheinender Arbeitskontexte statt.

3 Untersuchungsdesign und -methode

Um herauszufinden, mittels welcher Arbeitshandlungen es Individuen gelingt, sich in Arbeitsumgebungen mit widersprüchlichen Rahmenbedingungen zurecht zu finden, haben wir in Kooperation mit dem VDI in 2012 und 2013 eine standardisierte schriftliche Befragung unter Ingenieuren im deutschsprachigen Raum durchgeführt. Die Befragung erfolgte online und führte zu einem Rücklauf von 172 Befragungsteilnehmern, davon 86% männlich, 12,8% weiblich und 1,2% ohne geschlechtsspezifische Zuordnung.

Bei den im Fragebogen verwendeten Items haben wir die Skala von Cova & Salle (2008), die sich auf das Angebot der Organisation bezieht, modifiziert, um einzelne Arbeitskontexte mit PSS-Merkmalen eingrenzen und von primär Produkt- bzw. primär Service-orientierten Arbeitskontexten unterscheiden zu können. Ebenso haben wir Kompetenzen in Anlehnung an eine Skala von Wilkens & Gröschke (2008) in den Fragebogen integriert. Diese Skala misst Kompetenzen als handlungsbezogenes Konstrukt in Form von Selbstauskünften über tatsächliches Handeln. Für den eingesetzten Fragebogen wurde eine siebenstufige Likert-Skala von 1 (trifft gar nicht zu) bis 7 (trifft voll und ganz zu) verwendet. Angesichts des Zuschnitts der Skala auf Handlungsvollzüge beinhaltet sie auch unterschiedliche Items, die reflexives Handeln zum Analysegegenstand machen. Daher wurde angenommen, dass sich aus diesen Items eine Skala zum reflexiven Arbeitshandeln generieren lässt.

Aufbauend auf allgemeinen Validierungsschritten und der Überprüfung der Reliabilität der verwendeten Skalen wurde eine hierarchische Clusteranalyse (Ward Methode mit quadrierten Euklidischen Distanzen) auf der Basis der Skalen zum Organisationsangebot durchgeführt, um die Arbeitskontexte der befragten Ingenieure voneinander unterscheiden zu können. Hierbei ergeben sich drei Untergruppen der Gesamtstichprobe, auf deren Basis dann ein Vergleich unter PSS und anderen Arbeitsfeldern durchgeführt werden kann.

Mittels explorativer Faktorenanalyse (Hauptkomponentenanalyse, Varimax-rotiert) wurde aus den handlungsbezogenen Kompetenzitems eine Subskala für reflexives Arbeitshandeln als dominanter Faktor extrahiert. Hierauf aufbauend erfolgte eine gerichtete Varianzanalyse (ANOVA) auf der Basis einer Kontrastüberprüfung (Ward-Methode mit PSS: -1; Produktion: 0,5; Service: 0,5), um zu prüfen, ob reflexives Arbeitshandeln in PSS-Arbeitskontexten systematisch höher ausgeprägt ist als in primär Produkt- bzw. Service-orientierten Arbeitskontexten.

4 Ergebnisse

Es war möglich, mittels hierarchischer Clusteranalyse drei Untergruppen des Samples zu bilden. Die Gruppenbildung erfolgt entlang der drei Kriterien: Kombination von Produkt und Services, Interdependenz von Produkt und Services sowie kundenindividuelles Problemlösungsangebot. Sind alle drei Kriterien in hohem Maße ausgeprägt, kann von einem PSS-Arbeitskontext gesprochen werden. Dies trifft auf 39,5% der Befragten zu. Auch wenn man Unternehmen heute (noch) nicht als hybride Leistungsanbieter in ihrer Gänze bezeichnen kann, so liegen doch typische Merkmale für hybride Leistungserbringung in Teilarbeitsbereichen vieler Unternehmen vor. Wird ein mittleres Maß an Produkt-Service-Kombination und Produkt-Service-Interdependenz erreicht, ohne dass eine individualisierte Kundenlösung erarbeitet wird, sprechen wir von einem Produkt-orientierten Arbeitskontext. Diesem konnten 29,7% der Befragungsteilnehmer

zugeordnet werden. Ist die kundenindividuelle Problemlösung hoch ausgeprägt, während die beiden anderen Variablen gering ausgeprägt sind, sprechen wir von einem Service-orientierten Arbeitskontext. In diesem waren 30,2% der Befragten tätig.

Auf der Grundlage der schrittweise optimierten Faktorenanalyse zur Bereinigung der Skala (Kommunalitäten > 0,400), Kaiser-Meyer-Olkin = 0,770) und anschließender Dimensionalitätsüberprüfung nach Eigenwert und Varianzaufklärung konnte ein dominierender Faktor auf der Basis von 13 Items identifiziert werden, welcher reflexives Arbeitshandeln beschreibt und mit einem Cronbach's Alpha von 0.824 eine zufriedenstellende Reliabilität aufweist. Die Items sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Reflexives Arbeitshandeln zur Bewältigung von widersprüchlichen Anforderungen

Itemliste	Faktorladung
Um mich weiterzuentwickeln, fordere ich von anderen Personen aktiv Feedback ein.	.414
Ich nehme mir immer wieder einmal die Zeit, zu überlegen, wie ich meine Arbeitsweise noch verbessern kann.	.453
Es gelingt mir gut, mein vorhandenes Wissen auf neuartige Probleme zu übertragen.	.616
Um neue Problemlösungen zu entwickeln, wende ich oft auch kreative Methoden an.	.683
Ich kann mich gegenüber anderen Personen gut verständlich machen.	.649
Ich kann mich gut in die Perspektive anderer Personen eindenken.	.478
In Konfliktsituationen gelingt es mir in der Regel, zu gemeinsamen Lösungen zu kommen.	.411

Ich kann mich gut auf neue Personen einstellen und mit diesen zusammenarbeiten.	.673
Ich fühle mich verpflichtet, meine Zusagen auch einzuhalten.	.446
Ich spreche andere Personen auf zugesagte Unterstützung an.	.635
Es fällt mir leicht mit Personen außerhalb des Unternehmens (z.B. Lieferanten oder Kunden) Probleme zu diskutieren.	.400
Ich kann leicht und wirkungsvoll mit anderen Personen kommunizieren.	.589
Es fällt mir leicht, zu den meisten Menschen ein gutes Verhältnis aufzubauen.	.628

Auf der Grundlage der durchgeführten Kontrastanalyse zeigt sich schließlich, dass Ingenieure, die in PSS-Arbeitskontexten tätig sind, einen signifikant höheren Durchschnittswert an reflexivem Arbeitshandeln aufweisen als Ingenieure, die in Produkt-orientierten Arbeitskontexten tätig sind. Tabelle 2 zeigt die Übersicht über die eingesetzten Post-hoc-Tests und Ergebnisse der multiplen Mehrfachvergleiche für die ungewichteten Mittelwerte der Skala zum Reflexiven Arbeitshandeln. Auch gegenüber Ingenieuren aus den Servicefeldern ist das durchschnittliche Maß an reflexivem Arbeitshandeln höher ausgeprägt, wenngleich dieser Unterschied nicht signifikant wird. Der hier geringere Mittelwertunterschied lässt sich mit der insgesamt höheren Nähe zwischen PSS und Services im Vergleich zu PSS und Produktion erklären (vgl. Süße et al., 2013). Für das exemplarische Anwendungsfeld von PSS ist dies zu erwähnen. Blickt man auf den Bereich von Industrie 4.0 insgesamt, so ist auch ein hoher Wert an reflexivem Arbeitshandeln im Bereich von Services, die von Ingenieuren erbracht werden, durchaus berichtenswert.

Tabelle 2: Ergebnisse der Post-hoc Testverfahren für multiple Mittelwertvergleiche der Kontrastanalyse

	(I) Ward Methode	**(J) Ward Methode**	**Mittel-wert-differenz (I-J)**	**Standard-fehler**	**Sig.**	**95% Konfidenzintervall**	
						Unter-grenze	**Ober-grenze**
Tukey-HSD	PSS	Produktion	.25420*	.10365	.040	.0400	.4684
		Service	.08754	.10308	.673	-.1255	.3005
LSD	PSS	Produktion	.25420*	.10365	.015	.0828	.4256
		Service	.08754	.10308	.397	-.0829	.2580
Bonferroni	PSS	Produktion	.25420*	.10365	.046	.0318	.4766
		Service	.08754	.10308	1.000	-.1336	.3087
Dunnett-T	PSS	Production	-.25420*	.10365	.015		-.0887
	PSS	Service	-.08754	.10308	.319		.0771

*. Mittelwertunterschiede signifikant auf dem 0.05 Niveau.

5 Diskussion und Ausblick

Wir haben in diesem Beitrag auf mögliche Paradoxien aufmerksam gemacht, die im Kontext von Industrie 4.0 auftreten können und auf theoretischer Basis argumentiert, dass reflexives Arbeitshandeln eine Voraussetzung darstellt, um eine dynamische Balance zwischen widersprüchlich erscheinenden Anforderungen herstellen zu können. Exemplarisch für Industrie 4.0 haben wir Produkt-Service-Systeme (PSS) betrachtet und an diesem Anwendungsfeld gezeigt, dass hier Kompetenzfacetten besonders hoch ausgeprägt sind, die reflexives Arbeitshandeln beschreiben können. Daran lässt sich plausibilisieren, dass

reflexives Arbeitshandeln in PSS eine besonders wichtige Voraussetzung bildet, um in diesem Arbeitsfeld zu bestehen.

Im Ergebnis wurde damit auf empirischer Basis eine Skala für reflexives Arbeitshandeln generiert, mit der sich Mittelwertunterschiede zwischen unterschiedlichen Arbeitsbereichen von Ingenieuren identifizieren lassen. Betrachtet man die einzelnen Items näher, so zeigt sich, dass dabei die Fähigkeit zur Gestaltung des Interaktionsprozesses innerhalb und außerhalb der Organisation als wichtiger Impuls zur Weiterentwicklung der eigenen Arbeit den entscheidenden Faktor bildet. So kann eine Konkretisierung gegenüber der bisherigen Forschung erfolgen, in welcher Hinsicht sich gestiegene Anforderungen an die Arbeitskräfte tatsächlich zeigen. Die gestiegenen Anforderungen sind danach vor allem von kommunikativ-reflexiver Natur, um zu neuen Problemlösungen beitragen zu können.

Die hier vorgestellten Untersuchungsergebnisse, die die Bedeutung von reflexivem Arbeitshandeln für den Umgang mit Paradoxien plausibilisieren können, sind zunächst explorativer Natur. In Folgeuntersuchungen wird es darum gehen müssen, das erhobene und spezifizierte Konstrukt direkter an einzelne Paradoxien zu koppeln und vor diesem Hintergrund Wirkungen und Effekte näher zu untersuchen. Auch wird es notwendig sein zu prüfen, ob reflexives Arbeitshandeln auch unter weniger qualifizierten Arbeitskräften eine ähnlich hohe Bedeutung im Kontext von Industrie 4.0 hat wie für die betrachtete Gruppe der Ingenieure.

Literatur

Cova, B. / Salle, R. (2008). Marketing solutions in accordance with the SD logic: co-creating value with customer network actors. Industrial marketing management, 37(3), 270-277.

Evans, P. A. L. / Doz, Y. (1989). The dualistic organization. In: P. A. L. Evans, Y. Doz & Laurent, A. (Hg.) Human Resource Management in International Firms: Change, Globalization, Innovation. London: Macmillan.

Evans, P. A. L. (1999). HRM on the Edge: A Duality Perspective. Organization, 6(2), 325-338.

Jarzabkowski, P. / Le, J. K. / Van de Ven, A. H. (2013). Responding to competing strategic demands: How organizing, belonging, and performing paradoxes coevolve. Strategic Organization, 11(3), 245-280.

Jordan, S. / Messner, M. / Becker, A. (2009). Reflection and Mindfulness in Organizations: Rationales and Possibilities for Integration. Management Learning, 40(4), 465-473.

Levinthal, D. / Rerup, C. (2006). Crossing an Apparent Chasm: Bridging Mindful and Less-Mindful Perspectives on Organizational Learning. Organization Science, 17(4), 502-513.

Lewis, M. W. (2000). Exploring Paradox: Toward a More Comprehensive Guide. The Academy of Management Review, 25(4), 760-776.

Lüscher, L. S. / Lewis, M. W. (2008). Organizational Change and Managerial Sensemaking: Working Through Paradox. Academy of Management Journal, 51(2), 221-240.

March, J. G. (1991). Exploration and exploitation in organizational learning. Organization Science, 2(1), 71-87.

Martinez, V. et al. (2010). Challenges in transforming manufacturing organisations into product-service providers. Journal of manufacturing technology management, 21(4), 449-469.

Meier, H. / Roy, R. / Seliger, G. (2010). Industrial Product-Service Systems—IPS2. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 59(2), 607-627.

Modrow-Thiel, B. et al.: Kapitel 7 (2010). Arbeitsintegrierter Kompetenzaufbau. In: Aurich, J.C.; Clement, M.H.: Produkt-Service Systeme - Gestaltung und Realisierung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer: 117-162.

Oliva, R. / Kallenberg, R. (2003). Managing the transition from products to services. International Journal of Service Industry Management, 14(2), 160-172.

Penttinen, E. / Palmer, J. (2007). Improving firm positioning through enhanced offerings and buyer–seller relationships. Industrial Marketing Management, 36(5), 552-564.

Poole, M. S. / Van de Ven, A. H. (1989). Using Paradox to Build Management and Organization Theories. Academy of Management Review, 14(4), 562-578.

Salvato, C. (2009). Capabilities Unveiled: The Role of Ordinary Activities in the Evolution of Product Development Processes. Organization Science, 20(2), 384-409.

Spath, D. (Hg.) (2011). Wissensarbeit-zwischen strengen Prozessen und kreativem Spielraum. Berlin: GITO mbH Verlag.

Spath, D. (Hg.) (2013). Produktionsarbeit der Zukunft-Industrie 4.0. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

Sternberg, R. J. (2000). Images of mindfulness. Journal of Social Issues, 1, 11-26.

Süße, T. / Wilkens, U. / Mänz, K. (2013). Integrating production and services for product-service systems in the engineering sector: The challenge of bridging two organizational paradigms as a question of structures, leadership and competencies. Paper accepted at the 29th EGOS Colloquium „Bridging Continents, Cultures and Worldviews“, Montréal, 04.-06.07.2013.

Sutherland, F. / Smith, Aaron C. T. (2011). Duality theory and the management of the change–stability paradox. Journal of Management & Organization, 17(4), 534-547.

Walton, R. E. (1985). From control to commitment in the workplace. Harvard Business Review, 63(2), 77-84.

Weick, K. E. / Sutcliffe, K. M. (2006). Mindfulness and the Quality of Organizational Attention. Organization Science, 17(4), 514-524.

Weick, K. E. / Sutcliffe, K. M. / Obstfeld, D. (2008). Organizing for high reliability: Processes of collective mindfulness. Crisis management, 3, 81-123.

Wilkens, U. / Gröschke, D. (2008). Measuring the leverage effect between individual and collective competence. Paper presented at the Conference of the Strategic Management Society, Cologne 13th Oct. - 14th Oct. 2008.

Windahl, C. / Lakemond, N. (2006). Developing integrated solutions: The importance of relationships within the network. Industrial Marketing Management, 35(7), 806-818.

Humanzentrierte Entscheidungsunterstützung in intelligent vernetzten Produktionssystemen

Egon Müller, Ralph Riedel

1 Einleitung

Aufgrund vielfältiger äußerer und innerer Einflüsse wie zunehmende Globalisierung, Individualisierung, Komplexität usw. wachsen die Anforderungen an Produktionssysteme. Im Fokus stehen dabei vor allem Aspekte wie Selbstorganisation, Wandlungsfähigkeit, Resilienz, geschlossene Kreisläufe und Ressourceneffizienz, Kundenintegration in Engineering und Produktion sowie flexible Prozessfolgen und Technologien. (Kagermann et al., 2013) Technologien und Konzepte, die häufig im Zusammenhang mit dem neuen Paradigma Industrie 4.0 genannt werden, bieten offensichtlich das Potenzial, den o.g. Anforderungen in geeigneter Weise zu begegnen; besonders hervorzuheben sind die flexible und intelligente Vernetzung, die Dezentralisierung und Echtzeitfähigkeit von Entscheidungsprozessen sowie die Nutzung virtueller Unterstützungstechniken.

Allerdings darf dabei nicht die Rolle des Menschen in Produktionssystemen als Wissensträger sowie als Entscheider vernachlässigt werden. Gleichwohl ist absehbar, dass sich Arbeitsinhalte und Arbeitsbedingungen mit den neuen Technologien ändern werden. (Spath, 2013) Es gilt somit, den Menschen intelligent in die Konzepte zukünftiger Produktionssysteme einzubeziehen und diese so zu gestalten, dass die Stärken des Menschen (Prognosen, Umgang mit Unsicherheit und Soft Facts, Heuristiken, Verhandlungen usw.) optimal genutzt und unterstützt werden und gleichzeitig Anforderungen aus der menschlichen Informationsverarbeitung (Nutzerschnittstelle) sowie Technologieakzeptanz unter Beachtung zukünftiger Rahmenbedingungen (Demographie, Fachkräfte, usw.) berücksichtigt werden.

Der Beitrag stellt einen Rahmen sowie beispielhafte Ansätze für die Gestaltung der Entscheidungsunterstützung in Produktionssystemen vor und geht auf entsprechende Anforderungen ein. Die Basis bildet zunächst die Vernetzung in und von Produktionssystemen sowie die Systematisierung typischer Entscheidungsfälle. Im Anschluss werden (menschliche) Entscheidungsprozesse selbst sowie Anforderungen, die sich aus der Humanorientierung ergeben, thematisiert. Aus den Vorbetrachtungen werden Handlungsfelder abgeleitet und mit exemplarischen Lösungsansätzen untersetzt.

2 Intelligent vernetzte Produktionssysteme

2.1 Produktionssysteme

Die Definition eines Produktionssystems lehnt sich an die allgemeine Systemtheorie an. Demnach ist ein Produktionssystem ein System, das den Zweck der Produktion, also der Erstellung von Gütern und Leistungen, hat. Es besteht aus Elementen, die über Beziehungen miteinander vernetzt sind. Für die qualitative Beschreibung der Beziehungen sowie deren Quantifizierung wird häufig die Flusssystemtheorie (Schenk et al., 2014) herangezogen. Ein System, so auch ein Produktionssystem, lässt sich in Sub- und Teilsysteme zerlegen und in Supersysteme als deren Bestandteile einordnen. Zur Beschreibung von Systemen dienen i.d.R. verschiedene Sichtweisen bzw. Aspekte: Funktion, Struktur, Hierarchie. (Ropohl, 2009) Die typischen Elemente eines Produktionssystems sind die Arbeitsmittel (Betriebsmittel, Vorrichtungen, sonstige technische Infrastruktur), die Arbeitskraft (Mitarbeiter) sowie der Arbeitsgegenstand (Material, Produkt). (Wiendahl, 2010) Diese stehen in Wechselwirkung zur Erfüllung einer Arbeitsaufgabe, geregelt durch die Arbeitsorganisation. Produktionssysteme sind eingebettet in eine politisch-rechtliche, natürliche, wirtschaftliche, soziokulturelle und technologische Umwelt, welche in Wechselwirkung mit dem System steht. (Nachtwey, 2010) Zur Beschreibung und Gestaltung von Produktionssystemen dient vornehmlich ein hierarchischer Ebenen-Ansatz, wobei die einzelnen Ebenen das (Produktions-) Netz, das Werk, einzelne

Gebäude, Segmente/ Bereiche sowie das einzelne Arbeitssystem darstellen. (Schenk et al. 2014; VDI 5200)

Von besonderem Interesse für die Entscheidungsunterstützung ist die Arbeitsaufgabe. Diese wird auf individueller Ebene zerlegt in einzelne Arbeitsaufträge, diese wiederum in einzelne Arbeitsschritte. Es handelt sich also auch hier um einen hierarchischen Ansatz der nicht nur die Handlungen sondern auch die damit verbundenen Ziele und Teilziele berücksichtigt. Die Arbeitspsychologie spricht in diesem Zusammenhang von der hierarchisch-sequentiellen Handlungsorganisation. (Hacker & Sachse, 2014)

Als Zwischenfazit für die weitere Betrachtung kann festgehalten werden, dass in einem Produktionssystem Handlungen durch den Menschen, im Zusammenwirken mit Technik, vermittelt durch organisatorische Bedingungen, ausgeführt werden. Dies stellt gleichermaßen die physische Ebene dar. Daneben existiert eine informatorische Ebene, auf der Ziele und Parameter vorgegeben werden und Rückmeldungen erfolgen. Handlungen sind mit Entscheidungen verbunden. Handlungen sind zielorientiert und hierarchisch organisiert; die Zielerreichung reguliert dabei die Handlungen. Handlungen finden in einem bestimmten Kontext sowie i.d.R. in einem arbeitsteiligen Prozess statt.

2.2 Vernetzung

Die Vernetzung von Produktionssystemen resultiert zum einen aus dem bereits erwähnten Ebenen-Modell. Demnach lassen sich unterscheiden (Schenk et al., 2014):

- die Vernetzung zwischen Unternehmen und Standorten
- die Vernetzung innerhalb eines Standortes
- die Vernetzung zwischen einzelnen Arbeitssystemen

Es resultieren daraus die Arbeitsplatzstruktur (Betriebsmittel, Flusssysteme, Aufstellung und Anordnung), die Bereichsstruktur (Verknüpfung und Anordnung der Arbeitsplätze über die Flusssysteme), die Gebäudestruktur

(Anordnung der Produktionsstätte einschließlich Bereichsstruktur), die Generalstruktur (Anordnung der Gebäude innerhalb des Werksgeländes), die Standortstruktur (Anordnung des Werksgeländes im Wirtschaftsraum/ Region einschließlich Infrastruktur) sowie die (Unternehmens-) Netzstruktur. (Schenk et al., 2014).

Weiterhin ist mit besonderem Blick auf die Arbeitsaufgabe und die Arbeitsorganisation die Vernetzung von Tätigkeiten zu identifizierten. Hierbei ist eine kollektive Handlungsregulation erforderlich, die verschiedene Ausprägungen haben kann. (Weber, 1997) Es werden in diesem Zusammenhang nicht nur operative Tätigkeiten im Wertschöpfungsprozess abgestimmt, sondern durchaus auch übergreifende und mittel- bis langfristige Pläne erarbeitet. (Windischer, 2003)

Gibt es mehrere Beteiligte an einem Wertschöpfungsprozess, so müssen deren einzelne Handlungen mehr oder minder aufeinander abgestimmt werden. Dafür haben speziell die Kooperation, Koordination und Kommunikation eine entscheidende Bedeutung. Sie dienen zum Austausch von Botschaften, zum Aufstellen gemeinsamer Regeln, zur Abstimmung von Zielen, zur Definition von Aufgaben, sowie zur gemeinsamen Bearbeitung eines Gegenstandes. (Clauß, 2013). Speziell die Kommunikation dient zur Erzeugung eines gemeinsamen (mentalen) Modells, welches die Koordination individuellen Handelns auf ein gemeinsames Ziel hin überhaupt erst ermöglicht.

Aus technischer Sicht kann Vernetzung als die Kopplung mehrerer Komponenten über ein bestimmtes Medium verstanden werden. Im Kontext aktueller Entwicklungen rückt derzeit vor allem die flexible, bedarfsorientierte Vernetzung in den Vordergrund, verbunden mit der Möglichkeit nahezu alle Objekte der realen Welt (informationstechnisch) zu identifizieren und damit auch adressierbar für eine Vernetzung zu machen (Internet der Dinge).

Von intelligenten, oder „smarten“ Objekten oder Systemen spricht man, wenn bestimmte Eigenschaften erfüllt werden (Jentsch et al., 2013):

- Funktionen zur Identifikation, Lokalisation und Diagnose interner Parameter
- Interaktionsfähigkeit: Erfassen und Messen physikalische Daten sowie Ausführen von Aktionen
- Datenverarbeitungsfähigkeit: Auswertung gesammelter Daten (z. B. Filterung, Konvertierungen) und Gewinnen relevanter Informationen
- Kommunikationsfähigkeit: Verbindungsaufbau mit anderen intelligenten Objekten und Zentralsystemen
- Standardisierung, Offenheit, Zugänglichkeit und Multifunktionalität: Existenz einheitlicher Standards/Protokolle; Zugänglichkeit der Objekte und Verwendbarkeit für unterschiedliche Anwendungsfälle

Von intelligenter Vernetzung kann man demnach sprechen, wenn die o.g. Eigenschaften von Objekten in einem Netzwerk vorhanden sind und die Vernetzung problem- und bedarfsorientiert, flexibel erfolgt und entsprechend adaptionsfähig auf übergeordneter Ebene, d.h. lernfähig ist.

2.3 Rahmenmodell für die weitere Betrachtung

Die bisherigen Überlegungen zum Produktionssystem sowie zur Vernetzung können nun zusammengeführt werden, um ein Rahmenmodell für die weitere Betrachtung aufzuspannen, vgl. Bild 1.

Das einzelne Produktionssystem im Sinne eines Arbeitssystems kann in Anlehnung an die Systemtheorie sowie an die Definition einer Kompetenzzelle (Schenk et al., 2014) beschrieben werden durch seine Leistung und Funktion, durch Ressourcen, Input/ Output, vorhandene Kompetenzen, seine Struktur sowie Dimension. Das System besteht aus Mensch und Technik, die auf Basis der Organisation zusammenwirken und die definierte Leistung erbringen. Somit besteht auf unterster Ebene eine Vernetzung innerhalb des Systems zwischen den einzelnen Elementen. Die Leistung kann individuell oder in Zusammenarbeit mit anderen erbracht

werden. In letzterem Falle ist eine systemübergreifende Vernetzung erforderlich, was wiederum Koordinations-, Kollaborations- und Kommunikationsbedarf nach sich zieht.

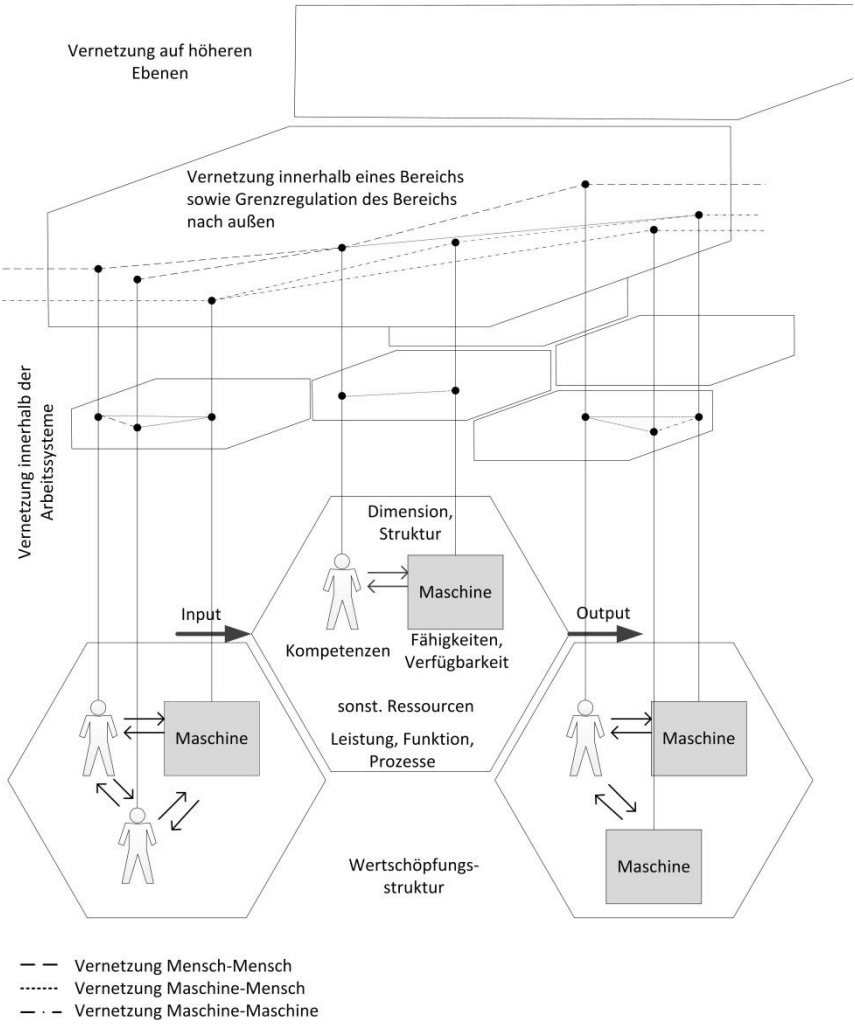


Bild 1: Rahmenmodell für die Vernetzung in Produktionssystemen

Die Vernetzung auf übergreifender Ebene wird letztendlich durch einzelne Elemente der einzelnen Systeme der untersten Ebene realisiert. Die Vernetzung kann unterschiedlicher Art sein, d.h. ausschließlich zwischen Maschinen, ausschließlich zwischen Menschen oder zwischen Mensch und Maschine erfolgen. Im Sinne einer hierarchischen und selbstreferentiellen Betrachtung können für die vernetzten Einheiten wiederum Funktionen, Input und Output etc. definiert werden. Die Funktionen können primär (eigentliche Leistungserstellung) oder sekundär (Grenzregulation, Kompensation von Schwankungen und Störungen, sonstige Unterstützungsprozesse wie Disposition) sein.

Weiterhin ist denkbar, die Vernetzung, letztendlich handelt es sich dabei ja um Beziehungen zwischen Systemelementen, nach ihren Inhalten zu qualifizieren; hierbei sind materiell-technische (Material, Energie, Information), partnerschaftliche sowie betriebswirtschaftliche Beziehungen (in Anlehnung an (Schenk et al., 2014)) denkbar. Von besonderem Interesse für die hier geführte Diskussion sind vor allem Beziehungen informatorischer Art, da diese die Grundlage für Entscheidungen und deren Unterstützung bilden. Nicht zu vergessen ist, dass informatorische Beziehungen i.d.R. (zumindest im Kontext der Produktion) eng verbunden sind mit physischen Prozessen, d.h. entweder einem Materialfluss oder Arbeitsaufgaben im Wertschöpfungsprozess.

3 Entscheidungen und Entscheidungsunterstützung

3.1 Entscheidungen in (vernetzten) Produktionssystemen

Entscheidungen in Produktionssystemen hängen unmittelbar mit den Aufgaben in Fabrikplanung und Fabrikbetrieb zusammen. Schenk et al. (2014) geben dazu einen systematischen Überblick. Demnach beinhalten Fabrikplanung und Fabrikbetrieb Festlegungen zu Prozessen, Elementen, Strukturen, zum Gesamtsystem, zur Aufbau- und Ablauforganisation, zum Produktionsbetrieb, zur Lenkung und Steuerung sowie zu Instandhaltung und Service. Grundlegend lassen sich diese Aufgaben bzw. damit

zusammenhängende Entscheidungen auch in verschiedene Ebenen der Systemgestaltung einordnen (Riedel, 2012):

- die Lenkung des Leistungserstellungsprozesses und damit die Sicherstellung der Leistungserfüllung, siehe dazu auch (Wiendahl, 2012)
- die Gestaltung des leistungserstellenden Systems, d.h. dessen Konfiguration und Parametrisierung
- die Gestaltung des Planungs- und Lenkungssystems selbst – quasi als Meta-Ebene, welche u.a. Planungsabläufe, Methoden, Kompetenzen usw. beinhaltet, siehe dazu bspw. auch (Gomez et al., 1975)

Entscheidungen generell können als Informationsverarbeitung verstanden werden. (Dörner, 1987) Aus systemtheoretischer Perspektive können auch hier Input (Eingangsinformationen zu Zielen, zum Objektbereich, zu Rahmenbedingungen, etc.), Output (Maßnahmen, Gestaltungslösungen, Freigaben, etc.) sowie funktionale Aspekte (d.h. das Entscheiden) unterschieden werden. Insbes. die Funktion wird durch strukturelle Gegebenheiten (wer darf/ soll in welchem Umfang entscheiden, Einzel-, vs. Gruppenentscheidungen) und Prozesse (Problemlösen) bestimmt. Gesteuert wird die Funktion über Aufträge unter Zuhilfenahme von Ressourcen, Methoden und Hilfsmitteln. (Riedel, 2012) Entscheidungen in vernetzten Systemen sind ebenfalls zwangsläufig miteinander vernetzt.

3.2 Merkmale von Entscheidungen

Für die Beschreibung von Entscheidungsprozessen existieren diverse Entscheidungsmodelle aus der Psychologie, siehe stellvertretend (Boy, 2011; Dörner, 1987). Grundsätzliche Zusammenhänge sind in Bild 2 (in Anlehnung an (Boy, 2011)) wiedergegeben.

Entscheidungen sind hierarchisch organisiert (Hacker & Sachse, 2014). Von besonderer Bedeutung ist die Situation Awareness, für die verschiedene Level beschrieben werden: (1) Elemente der aktuellen Situation

wahrnehmen, (2) die aktuelle Situation erfassen/ verstehen, (3) zukünftige Zustände projizieren. (Boy, 2011) Als Einflüsse auf die Wahrnehmung und Beurteilung der Situation sowie daran anknüpfende Informationsverarbeitungsprozesse werden üblicherweise genannt: die Systemfähigkeit, Schnittstellen, Stress und Belastung, Komplexität.

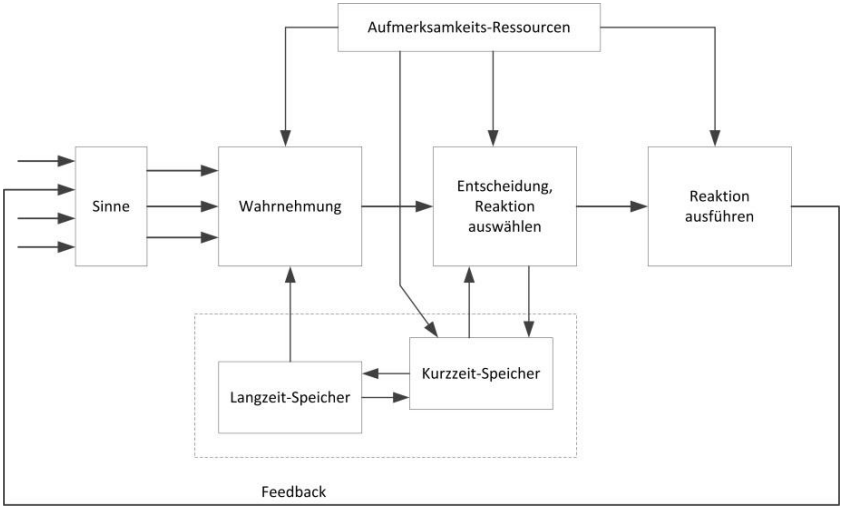


Bild 2: Modell menschlicher Entscheidungsprozesse

Versucht man Entscheidungen zu klassifizieren, so kann man bspw. in sichere Entscheidungen, Risikoentscheidungen und unsichere Entscheidungen (Hacker & von der Weth, 2012) oder in individuelle und kollektive Entscheidungen unterscheiden. Insbes. vor dem Hintergrund vernetzter Systeme und daraus resultierender kollektiver Abstimmungs- und Entscheidungserfordernisse müssen relevante Einflussfaktoren Beachtung finden, so bspw. Aufgabenmerkmale, der Vernetzungsgrad von Aufgaben und damit einhergehenden Kooperations- und Kommunikationsprozesse, die Gruppenzusammensetzung und gruppendynamische Effekte, die Organisation der Entscheidungsprozesse sowie situative Gegebenheiten. (Badke-Schaub, 2012; Buerschaper, 2012)

Die (denk-) psychologische Forschung kennt und beschreibt typische Probleme bei (menschlichen) Entscheidungsprozessen, so z.B. nicht ausreichende Zielklärung, Handeln ohne Planung, Missachtung von Zielkonflikten, Übergeneralisierung bestehenden Wissens, Suche nach bestätigender Information, Planoptimismus, Einkapselung, Vernachlässigung von Nebenwirkungen und Risiken, keine nachhaltige Kontrolle der Auswirkungen, fehlende Reflexion usw. (Hofinger, 2012)

Inwieweit derartige Phänomene auftreten, hängt vorrangig vom Zusammenspiel dreier Faktoren ab: (1) menschlichen Eigenschaften und Fähigkeiten (Erfahrung, Kompetenzen, Selbstreflexionsfähigkeit, aktueller motivationaler und emotionaler Zustand, usw.), (2) Merkmalen der Aufgabe (Komplexität, Durchschaubarkeit usw.) sowie (3) Merkmalen der Situation (Informationsverfügbarkeit, Zeitdruck, Gruppendynamik, usw.). Will man Entscheidungen bzw. Entscheidungsprozesse unterstützen, so muss man sich dieser Zusammenhänge bewusst sein.

3.3 Humanzentrierte Gestaltung

Anforderungen, wie eine Entscheidungsunterstützung zu gestalten ist, können zunächst aus den Kriterien humaner Arbeitsgestaltung (Ulich, 2011) abgeleitet werden. Demnach muss Arbeit schädigungslos, beeinträchtigungsfrei, den Bedürfnissen und der Qualifikation des Mitarbeiters entsprechend gestaltet sein, die individuelle und kollektive Einflussnahme ermöglichen sowie die Persönlichkeitsentwicklung fördern.

Explizit wird die Humanzentrierung im Magdeburger Modell der Integrierten Produktentwicklung (IPE) genannt. (Vajna, 2014) Dort genannte Eigenschaften der Humanzentrierung sind u.a. das Berücksichtigen des menschlichen Denkens und Handelns bei der Gestaltung von Organisationen und Abläufen, die Beachtung der speziellen Fähigkeiten und Eigenschaften der Mitarbeiter, verbunden mit der gezielten Förderung ihrer Fach-, Methoden- und Sozialkompetenz mit angemessenen und zeitlich abgestimmten Qualifikationsmaßnahmen sowie die Umsetzung der Arbeitsphilosophie eines lebenslangen Lernens. (Vajna, 2014)

Insgesamt geht man davon aus, dass die Humanzentrierung das selbständige und zielorientierte Arbeiten fördert, die Arbeitszufriedenheit erhöht, die Selbstregulationsfähigkeit des gesamten Systems unterstützt und damit dessen Effektivität, Effizienz und Anpassungsfähigkeit verbessert.

Als Konsequenz lässt sich ableiten, dass die Entscheidungsunterstützung nicht losgelöst von der Aufgabengestaltung betrachtet werden kann und sich auch die Mensch-Maschine-Funktionsteilung in cyber-physischen Systemen damit genauso den genannten Ansprüchen stellen muss.

4 Entscheidungsunterstützung im Kontext der Digitalen Fabrik und von Industrie 4.0

Diskutiert man über die Vernetzung von (Produktions-) Systemen sowie die Unterstützung von Entscheidungen im operativen oder planerischen Kontext, so führt kein Weg an Systemen der Informationsverarbeitung vorbei. Im Bereich der Produktionssystemgestaltung haben die Digitale Fabrik sowie unlängst Industrie 4.0 bzw. cyber-physische Systeme diese Thematik geprägt.

Die Digitale Fabrik ist nach VDI 4499 der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden. Ziel der Digitalen Fabrik ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung von Strukturen, Prozessen und Ressourcen der realen Fabrik. (Bracht et al., 2011; VDI 4499) Die Anwendungsgebiete der Digitalen Fabrik erstrecken sich über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes und einer Fabrik hinweg und umfassen u.a. Projektmanagement, Entwurf, Produktdaten, Digital Mock-Up, Logistik, Prozessplanung, Anlagenplanung, Inbetriebnahme und Anlauf, Serienproduktion, Vertrieb, Auftragsabwicklung, Service, Instandhaltung. (Bracht et al. 2011) Die Anwendung der Digitalen Fabrik im Fabrikbetrieb wird auch als Digitale Produktion bezeichnet (Westkämper et al., 2013), wobei sowohl bei der Digitalen Fabrik als auch bei der Digitalen Produktion von engen Kopplungen zwischen realem Prozess und digitalem

Modell ausgegangen wird, vgl. dazu Bild 3, in Anlehnung an (Westkämper et al., 2013).

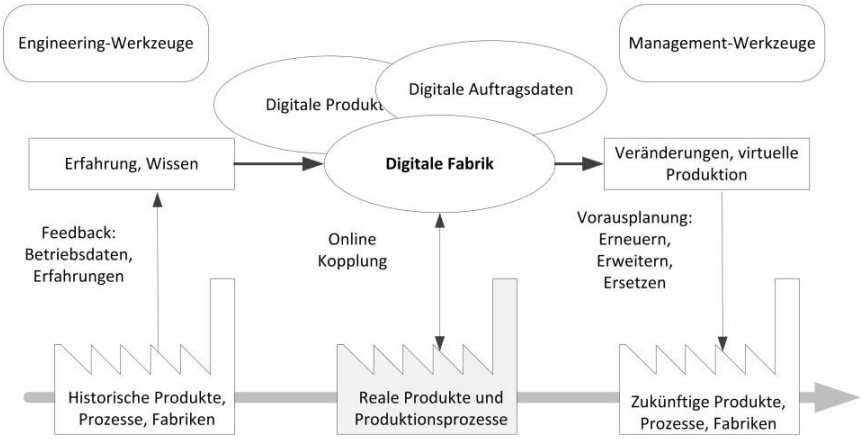


Bild 3: Kopplungen in der Digitalen Fabrik

Dieser Ansatz wurde im Modell der Cyber-Physical Systems (CPS) wieder aufgegriffen, welche eine zentrale Rolle in der vierten industriellen Revolution (Industrie 4.0) spielen. CPS stehen für die Verbindung von physikalischer und informationstechnischer Welt und entstehen durch ein komplexes Zusammenspiel von eingebetteten Systemen, Anwendungssystemen und Infrastrukturen auf Basis ihrer Vernetzung und Integration sowie der Mensch-Technik-Interaktion in Anwendungsprozessen. (Geisberger & Broy, 2012)

Die Digitale Fabrik wie auch CPS stellen somit eine wesentliche Grundlage für die Entscheidungsunterstützung sowohl in operativen Prozessen als auch bei der Planung und Gestaltung von Produktionssystemen dar. Die Rolle des Menschen wird in diesem Zusammenhang so definiert, dass dieser zukünftig für die Festlegung einer übergeordneten Produktionsstrategie, für die Überwachung von deren Umsetzung sowie für bedarfsweise Interventionen verantwortlich sein soll. (Loskyll, 2014) Insgesamt wird davon ausgegangen, dass der Mensch damit ein höheres Maß an Verantwortung übernimmt. Bei seiner Arbeit wird er durch entsprechende

Dienste mobil und kontextsensitiv unterstützt. (ebenda) Es wird dabei deutlich, dass der Mensch damit nicht nur zum Füllen der „Automatisierungslücke“ genutzt werden soll, sondern insbes. seine strategischen und kreativen Fähigkeiten durch eine entsprechende Unterstützung und Entlastung entfalten können soll. Damit wird gleichzeitig entsprechender Gestaltungsbedarf deutlich, der im folgenden Kapitel aufgegriffen wird.

Für die weitere Betrachtung sind die in einem (cyber-physischem) Arbeitssystem zusammenwirkenden Elemente Mensch und Maschine, insbes. Informationen verarbeitende und ausgebende Maschinen, als soziotechnisches System zu verstehen, das bestimmte Aufgaben in einem bestimmten Kontext erfüllen muss und das bestimmten Zielen dient.

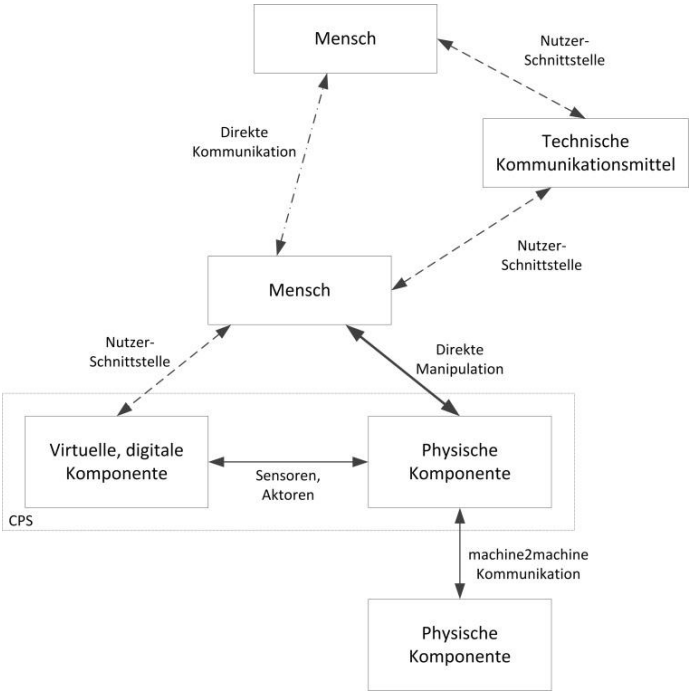


Bild 4: Rahmen für die Vernetzung im Arbeitssystem

Das Sachsystem (in diesem Sinne die Informationstechnik) wird entsprechend der gegebenen Zielsetzung sinnvoll integriert. (Ropohl, 2009) Die entsprechend sinnvolle Verwendung des Sachsystems bedarf der Planung. (Clauß, 2013) Die grundlegenden Zusammenhänge in solcherart Systemen sind in Bild 4 dargestellt (in Anlehnung an (Loskyll, 2014), erweitert). Diese Zusammenhänge bilden eine Grundlage für die nachfolgenden Ausführungen.

5 Handlungsfelder und exemplarische Lösungsansätze

5.1 Handlungsfelder

Für die Gestaltung einer humanzentrierten Entscheidungsunterstützung lassen sich aus den vorangegangenen Ausführungen folgende Handlungsfelder ableiten:

1. Organisatorisch/ individuell: Zunächst ist es von enormer Wichtigkeit die Passfähigkeit zwischen Aufgabe(n) und der Erfüllung des damit verbundenen Informationsbedarfs herzustellen. Die Informationen müssen dabei an die Rolle und Qualifikation des jeweiligen Mitarbeiters bzw. der Mitarbeitergruppe angepasst sein. Im Hinblick auf die Aufgabengestaltung müssen die Humankriterien der Arbeitsgestaltung beachtet werden. Der Mensch darf auch im Kontext der Digitalen Fabrik oder von Industrie 4.0 nicht den Bezug zum Prozess, zum Arbeitsgegenstand, zum Kunden und damit zum Sinn seiner Arbeit verlieren. Entsprechende Kriterien aus etablierten Verfahren (KABA, VERA, RHIA, TBS, SAA, STA, TBI, siehe für einen Überblick (Laue, 2010)) oder MABA-MABA-Listen (Boy, 2011) können bei der Bewertung und Gestaltung hilfreich sein. Neben der individuellen Aufgabe müssen auch Informationen, der Koordination, Kollaboration oder Kommunikation im Rahmen von Gruppenaufgaben oder im Rahmen vernetzter Systeme einbezogen werden.

2. Technisch/ individuell: Dies betrifft insbesondere die Art und Weise der Informationsbereitstellung, d.h. ihre Anpassung an die menschlichen Gegebenheiten der Informationsaufnahme und -verarbeitung. Wichtige

Aspekte sind hier u.a. die Wahrnehmbarkeit der Information, die kontextabhängige Filterung, die für Entscheidungen richtige Informationsmenge und -granularität sowie Update-Geschwindigkeit. Ebenso muss die Bedienung entsprechender Schnittstellen durch den Menschen (Sprache, Gesten, Berührung) ergonomischen Gestaltungsrichtlinien genügen. Sowohl Informationsausgabe als auch -eingabe sollten sowohl an die individuellen Nutzereigenschaften (Alter, Erfahrung, usw.) als auch an den jeweiligen situativen Kontext (Störungen aus der Umwelt, Routinebetrieb vs. Notfall usw.) anpassbar sein; das Gesamtsystem sollte eine gewisse Lernfähigkeit aufweisen.

3. Technisch/ organisatorisch: Dieses Handlungsfeld betrifft den Gesamtkontext der Informationserfassung, -speicherung, -aufarbeitung und -verteilung innerhalb des betrachteten, vernetzten Systems bzw. des gesamten Netzwerks. Die primäre Anforderung ist hier, dass die entsprechenden strukturellen Voraussetzungen geschaffen werden, sodass die in den ersten beiden Punkten genannten Aspekte erfüllt werden können und im System bzw. Netzwerk eine entsprechende Informationsbasis zur Entscheidungsunterstützung sowie zum Wissensmanagement bereitsteht. Das Handlungsfeld umfasst die folgenden Aspekte:

- die Identifikation, Verfügbarmachung und „Ausbeutung“ relevanter Wissens- und Informationsquellen, um wichtige Daten zu erkennen, zu explizieren, zu erfassen, zu sammeln, zu aggregieren
- das Management von Informationsressourcen und Wissensträgern im Sinne des Speicherns, Verifizierens, Vernetzens, Pflegens von Informationen
- die Erzeugung des „richtigen“, d.h. kontextspezifischen Informationsangebots im Sinne des Analysierens, Strukturierens, Verdichtens/ Aggregierens, Verteilens
- die Deckung des entsprechenden Wissens- bzw. Entscheidungsunterstützungsbedarfs durch Funktionen des Bewertens, Interpretierens, Vernetzens.

4. Vernetzung: Ein übergreifendes Handlungsfeld stellt die Vernetzung von Entscheidungen und damit auch der Entscheidungsunterstützung dar. Hierbei ist zum einen die horizontale Vernetzung zwischen (internen und externen) Partnern in einer Wertschöpfungskette zu berücksichtigen, zum anderen aber auch die vertikale Vernetzung zwischen System, Subsystemen und Supersystemen. Eine besondere Herausforderung stellt hier die Flexibilität dar. Darüber hinaus sind Rückkoppelungen zwischen den einzelnen Ebenen der Fabrikbetriebsplanung (Riedel, 2012; siehe auch Kapitel 3.1) zu berücksichtigen, d.h. zwischen Betrieb und Systemgestaltung sowie zur Metaebene der Methoden, Kompetenzen, Planungsregeln etc.

5.2 Beispiele

Im folgenden werden anhand aktueller Beispiele aus der Forschungspraxis Lösungsansätze für verschiede der o.g. Handlungsfelder illustriert.

Facility Management mit Hilfe semantischer Technologien und Augmented Reality

Das Forschungsprojekt FM-Star verfolgt einen neuartigen Systemansatz für die systematische Vernetzung von realer und virtueller Welt für komplexe Facility-Management-Prozesse. Die Lösung zielt auf eine optimale Unterstützung im Bereich des Abnahme- und Instandhaltungsmanagements ab. Den Mitarbeitern (Instandhalter, Meister, Dienstleister, Anlagenbauer) sollen relevante Planungs- und Zustandsdaten von technischen Anlagen vor Ort bspw. mittels Smartphone oder Tablet PC zugänglich gemacht werden. Dies wird ermöglicht durch die Nutzung von Augmented Reality Technologie auf geeigneten Endgeräten, wobei die relevanten Informationen zu einer technischen Anlage inkl. CAD-Modellen lage- und blickwinkelgerecht direkt über die Anlage projiziert werden. Die Realität wird so kontextspezifisch mit digitalen Informationen angereichert. (FMStar, 2014; Müller & Riedel, 2013)

Alle Daten zu Anlagen, Gebäuden, Infrastruktur etc. sind in einer semantischen Datenbank miteinander vernetzt. Für die Verwendung und Ausgabe werden diese mithilfe von Kontextinformationen wie Benutzerrolle und -aufgaben, Ort, Distanzen zum Objekt oder Blickwinkel gefiltert, sodass

die Informationsmenge auf ein relevantes Maß reduziert wird. Die Lösung verhindert zeitaufwändiges Suchen in technischen Spezifikationen, Zeichnungen und Schemata und ermöglicht es aufgabenspezifisch die jeweils passenden Informationen zu nutzen. Die Datenbasis kann dabei u.a. die komplette Anlagenhistorie, Planungs- und Betriebsdaten sowie Prozessanweisungen enthalten und mit den unterschiedlichsten, auch heterogenen, Daten angereichert werden. (FM Star, 2014)

Synchrone Produktion durch teilautonome Planung und humanzentrierte Entscheidungsunterstützung

Zur Bewältigung der eingangs skizzierten aktuellen und zukünftigen Herausforderungen soll im Rahmen des Projektes SOPHIE (Synchrone Produktion durch teilautonome Planung und humanzentrierte Entscheidungsunterstützung) ein modulares Entscheidungsunterstützungs-system entwickelt werden. Der Kern des dabei verfolgten Lösungsansatzes besteht in der Echtzeit-Verknüpfung von Real- und Digitalwelt. Damit werden Entscheidungsträger mit virtuellen Techniken (Augmented und Virtual Reality) befähigt, geplante und reale Abläufe direkt in der Produktion abzugleichen und Eingriffe in den realen Prozessablauf durch virtuelle Simulation abzusichern. Um die entstehenden Datenvolumina zu beherrschen und die Anwender zu entlasten, werden autonom agierende Agentensysteme selbstständig Analysen durchführen und Entscheidungsoptionen vorschlagen. (BMBF, 2014; Prinz et al., 2014)

Die im Rahmen des Forschungsprojektes zu lösenden Teilaufgaben betreffen 1) die Visualisierung und Manipulation, 2) die Entwicklung und Integration einer agentenbasierten autonomen Planungsunterstützung, 3) die echtzeitfähige Verknüpfung der Automatisierungsebene mit der Digitalen Fabrik sowie 4) die organisatorische Integration und Mitarbeiterentwicklung. Mithilfe der Projektergebnisse wird es durch den zielorientierten und durchgängigen Einsatz virtueller Techniken zur Unterstützung von Planungs- und Steuerungsprozessen möglich, dass Entscheidungen trotz einer heterogenen Informationsflut innerhalb

kürzerer Reaktionszeiten getroffen werden können. Der Forschungsansatz folgt damit den in Zusammenhang mit Bild 3 vorgestellten Überlegungen.

Ressourcencockpit für die (mobile) Instandhaltung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme

Das Thema nutzergerechte Bereitstellung von Daten für die Instandhaltung technischer Anlagen wird auch im Projekt S-CPS adressiert. Hierbei stehen insbes. die unterschiedlichen, rollenspezifischen Informationsbedarfe (Anlagenzustand, Belegung mit Produktionsaufträgen und entsprechende Freiräume für Wartungsarbeiten, Ausfallverhalten, technische Dokumentation, Ersatzteile) sowie die Verteilung der Verantwortung für verschiedene Instandhaltungs- und damit zusammenhängende Aufgaben auf mehrere interne und externe organisatorische Einheiten im Fokus.

Ziel des Projektes ist die flexible Integration von übergreifenden (Master-) und dynamischen Daten sowie die mobile Unterstützung für internes und externes Instandhaltungspersonal. Der Begriff „sozio-cyberphysisch“ wurde gewählt, um die Bedeutung der Interaktion des menschlichen Bedieners mit smarten Objekten hervorzuheben. Im Ergebnis der Forschungsarbeiten soll ein Ressourcencockpit entstehen, welches die Informationsflüsse zu Produkten und Produktionsressourcen integriert. Die Datenbereitstellung soll über mobile Endgeräte, also Smartphones oder Tablet PCs, erfolgen. Rollenabhängig werden den Mitarbeitern so automatisch bspw. dynamische Aufgabenlisten, freie Ressourcen, Maschinenzustände und Belegungspläne zur Verfügung gestellt. (Hopf et al., 2014)

Die Forschungsergebnisse resultieren in einer erhöhten Effizienz sowohl von Instandhaltung als auch der Produktion. Darüber hinaus wird erwartet, dass die Arbeitszufriedenheit der betroffenen Mitarbeiter steigt und deren Belastung aufgrund optimierter Aufgabenzuteilung und verbeserter Ergonomie sinkt.

PLUG+LEARN – wandlungsfähiges, marktplatzbasiertes Kompetenznetzwerk

Vor dem Hintergrund aktueller Trends wie dem demographischen Wandel, kürzeren Innovationszyklen, veränderten Produkt- und Produktions-

strukturen etc. wurde das betriebliche Kompetenzmanagement als Schlüsselfunktion für die nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen identifiziert. Dies ist in dem in Kapitel 3.1 postulierten Modell der Gestaltungsebenen in Fabrikplanung und Fabrikbetrieb auf oberster Ebene (Systemgestaltung 2. Ordnung) zu verorten, geht es dabei doch um die laufende Anpassung notwendiger (Handlungs-) Kompetenzen an aktuelle Erfordernisse aus operativen und/oder planerischen Problemsituationen. An das Kompetenzmanagement stellen sich dabei die gleichen Anforderungen wie an die Gestaltung von Produktionssystemen oder Unternehmen allgemein: Effizienz, Flexibilität, Wandlungsfähigkeit.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wird im Rahmen eines Forschungsprojekts der Ansatz verfolgt, Kompetenzmodule zu entwickeln, die analog zur PLUG+PLAY Technologie kombinierbar sind und eine neuartige Strukturierung und Anwendung von Kompetenzen beinhalten. Qualifizierungsobjekte der Unternehmenspraxis werden dabei mit situationsadäquaten Lernmethoden auf Basis der Wandlungsbefähiger (Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit, Modularität, Kompatibilität) genutzt. Die so entstehenden Module werden im Rahmen eines Marktplatzes zur Verfügung gestellt, sodass diese individuell, situationsbezogen abgerufen werden können. Lerninhalte werden damit adaptierbar und stehen werden zielgruppen- und situationsgerecht zur Verfügung, was eine arbeitsprozessintegrierte, Demographie-sensible Kompetenzentwicklung unterstützt. Neben der konkreten Anwendung der Lösung im Konsortium wird ein wesentliches Ergebnis der Forschung auch die Entwicklung eines generellen Prinzips (PLUG+LEARN) zur Kompetenzentwicklung sein.

<u>Humanorientierte Simulation</u>

Wie die Ausführungen in Kapitel 3 gezeigt haben, spielen menschliche Eigenheiten und Verhaltensweisen sowohl bei der Bearbeitung von komplexen Planungsaufgaben als auch bei der Problemlösung im operativen Betrieb eine wichtige Rolle. Daher ist es nur konsequent, diese Besonderheiten menschlichen Verhalten in umfassender Weise in die

Modellierung von Produktionssystemen zu integrieren, um damit die Grundlage für qualitativ bessere Modelle von Fabrik- und Produktionssystemen mit höherem Erklärungswert zu schaffen, was wiederum eine verbesserte Simulation und Gestaltung komplexer Prozesse, wie z.B. Anläufe und Störungen, ermöglicht.

Die eben genannten Anforderungen werden derzeit im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsansatzes erfolgt, in dem produktionstechnische, fabrikplanerische, arbeitswissenschaftliche und psychologische Aspekte integriert werden, um ein empirisch fundiertes Modells eines Produktionssystems zu entwickeln, welches die Problemlösekompetenz der Mitarbeiter angemessen abbildet. (Riedel et al., 2014) Die grundsätzliche Struktur eines solchen Modells ist in Bild 5 dargestellt.

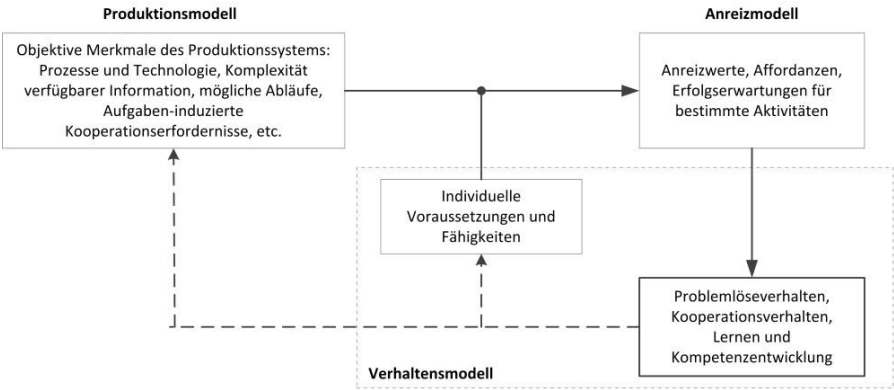


Bild 5: Grundmodell menschlichen Problemlöseverhaltens in komplexen Situationen

Mithilfe eines solchen Modells wird es möglich, komplexere Prozesse, wie Anläufe oder die Integration von Prozessinnovationen und damit verbundene Anpassungs-, Lern- und Entwicklungsprozesse ganzheitlich zu beschreiben, zu erklären, im Rahmen von Simulationen abzubilden und Gestaltungsvarianten bspw. im Hinblick auf Produktivität, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit, Lernen und Entwicklungsmöglichkeiten, Mitarbeitereinsatz sowie die Arbeitsorganisation experimentell zu prüfen. Weiterhin lässt das Modell die Ableitung von generellen Aussagen zu, bspw. im

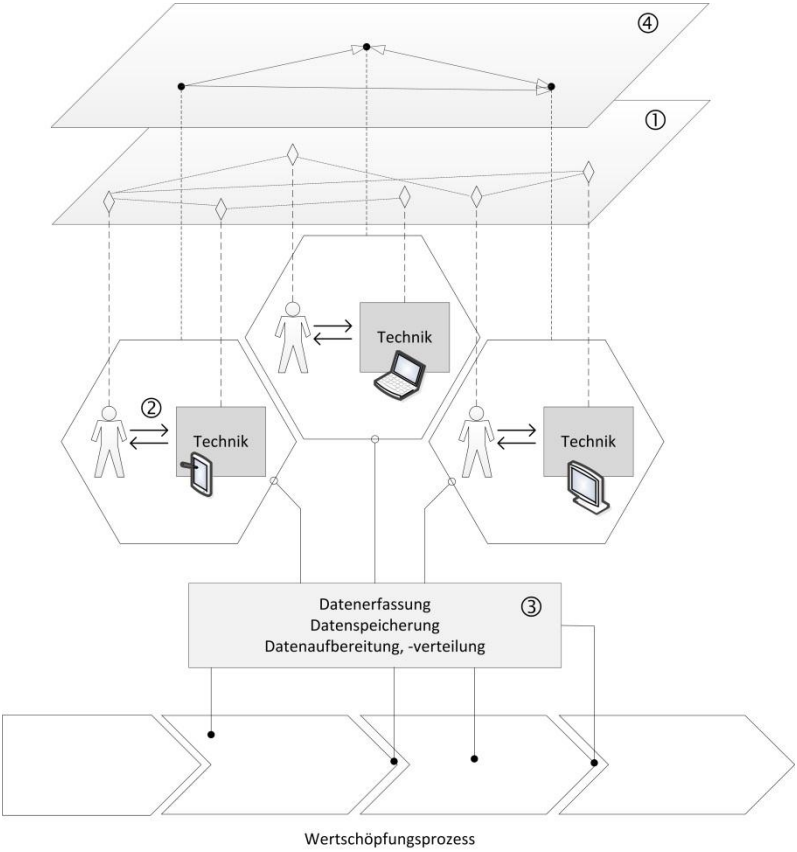
Hinblick darauf, wie unterschiedliche Varianten von Produktionssystemen die Motivation und Kompetenz der Mitarbeiter zur eigenständigen Lösung von Problemen beeinflussen und wie sich diese Mitarbeiterressourcen auf die Leistung des Gesamtsystems auswirken.

6 Zusammenfassung

Wie aus der Diskussion deutlich wurde, stellt die flexible Vernetzung von Produktionssystemen sowie die Entwicklung cyberphysischer Systeme, was durch die gegenwärtige und zukünftige Leistungsfähigkeit der Informationstechnologie befördert wird, die Zukunft der industriellen Produktion dar. Damit verbunden sind neue Formen der Arbeit, der Arbeitsorganisation, neue Arbeitsbedingungen. Es herrscht weitgehend Einigkeit darüber, dass der Mensch nach wie vor eine entscheidende Rolle, auch in automatisierten Prozessen, spielt. Daneben führen die genannten Entwicklungen aber auch zu einer neuen Qualität – und auch zu neuen Anforderungen – der Planung und Steuerung von (vernetzten) Produktionssystemen, vgl. hierzu bspw. den Ansatz des Advanced Industrial Engineering (Westkämper et al., 2013).

Die positiven Effekte auf Prozess, System und v.a. auf den Mitarbeiter, die aus kurzen Rückkopplungsschleifen und dezentraler Entscheidungsfindung resultieren, wurden schon vor längerer Zeit im Rahmen der Theorie soziotechnischer Systeme beschrieben (Ulich, 2011). Vor dem Hintergrund der mittlerweile möglichen Unterstützungsleistungen durch die moderne Informationstechnologie haben die Anforderungen aus Arbeitswissenschaft und Arbeitspsychologie eine hohe Aktualität, die es entsprechend der vorn beschriebenen Handlungsfelder zu berücksichtigen gilt; nachfolgend seien noch einmal die wichtigsten genannt:

Die Aufgabengestaltung sollte dem Prinzip des „best fit“ folgen, d.h. die jeweiligen Stärken von Mensch und Technik sollten genutzt werden. Darüber hinaus sind positive Effekte nur zu erzielen, wenn sowohl Qualifikation, Organisation als auch Technik gemeinsam entwickelt und aufeinander abgestimmt werden.



① Mensch-Maschine-Funktionsteilung
② Mensch-Maschine-Schnittstelle
③ Informations- und Wissensmanagement
④ Vernetzung von Systemen, Vernetzung von Entscheidungen

Bild 6: Überblick über die Handlungsfelder

Die Informationsbereitstellung zur Unterstützung von Entscheidungen muss Aufgaben- und Mensch-gerecht (ergonomisch) erfolgen. Dabei ist stets der Wechselwirkung von Merkmalen der Aufgabe (Komplexität), des Menschen (Erfahrung, Fähigkeiten, aktueller Zustand) sowie der Situation Rechnung zu

tragen. D.h. die Entscheidungsunterstützung muss in hohem Maße kontextsensitiv, flexibel und individualisierbar sein.

Die Gestaltung der Entscheidungsunterstützung muss Selbstorganisation und Lernen ermöglichen. Nur so ist es möglich, dass Systeme effizient arbeiten und sich schnell an veränderte Bedingungen anpassen können. Zudem ist Lernen im Sinne einer Weiterentwicklung förderlich für die Menschen im Produktionssystem. Lernen muss dabei sowohl individuell als auch übergreifend, auf organisatorischer Ebene, Beachtung finden. Neue technische Möglichkeiten, wie bspw. Simulationsmodelle, Data Mining, die Verarbeitung unstrukturierter Daten, können dabei Hilfestellung geben.

Einen Überblick über die abgeleiteten Handlungsfelder gibt zusammenfassend noch einmal Bild 6. Die Beispiele haben dabei einen jeweils unterschiedlichen Fokus, wie aus Tabelle 1 erkennbar ist. Erkennbar wird hierbei auch, dass die einzelnen Handlungsfelder nicht losgelöst voneinander betrachtet werden können.

Tabelle 1: Zuordnung der Beispiele zu den Handlungsfeldern

	① Mensch-Maschine-Funktionsteilung	② Mensch-Maschine-Schnittstelle	③ Informations- und Wissensmanagement	④ Vernetzung von Systemen, Vernetzung von Entscheidungen
Facility Management mit Hilfe semantischer Technologien und Augmented Reality	■	▒	■	▫
Synchrone Produktion durch teilautonome Planung und humanzentrierte Entscheidungsunterstützung	■	▒	▒	■
Ressourcencockpit für die (mobile) Instand-haltung auf Basis sozio-cyberphysischer Systeme	■	■	▒	▫
PUG+LEARN – wandlungsfähiges, marktplatzbasiertes Kompetenznetzwerk	▫	▫	■	▒
Humanorientierte Simulation	▒	▫	▒	■

Legende:
■ steht unmittelbar im Fokus
▒ steht mittelbar im Fokus
▫ steht weniger im Fokus

Im Rahmen der vorgestellten Fallbeispiele ist deutlich geworden, dass es bereits vielversprechende Ansätze für die genannten Handlungsfelder und

Anforderungen gibt. Nichtsdestotrotz führt die fortschreitende Entwicklung (informations-) technischer Möglichkeiten sowie die Dynamik im Umfeld von Unternehmen und den damit verbundenen Herausforderungen zu einem umfangreichen Handlungsbedarf, der nur durch eine zunehmend integrative Betrachtung unter Beteiligung verschiedener Wissenschaftsgebiete sowie durch eine hohe Anpassungsfähigkeit und ständige Weiterentwicklung der Methodenbasis zu bewältigen ist.

Literatur

Badke-Schaub, P. (2012). Handeln in Gruppen. In: Badke-Schaub, P. / Hofinger, G. / Lauche, K. (Eds.): Human Factors. Psychologie sicheren Handelns in Risikobranchen (pp. 121-139). Berlin, Heidelberg: Springer.

Boy, G.A. (2011). The Handbook of Human-Machine Interaction: A Human-Centered Design Approach. Burlington; Farnham: Ashgate.

Bracht. U. / Geckler, D. / Wenzel, S. (2011). Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele. Berlin; Heidelberg [u.a.]: Springer.

Buerschaper, C. (2012). Organisationen-Kommunikationssystem und Sicherheit. In: Badke-Schaub, P. / Hofinger, G. / Lauche, K. (Eds): Human Factors. Psychologie sicheren Handelns in Risikobranchen (pp. 165-187). Berlin; Heidelberg: Springer.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Referat Forschung für Produktion, Dienstleistung und Arbeit (Ed.) (2014). Industrie 4.0. Innovationen für die Produktion von morgen. Bonn.

Clauß, M. (2013). Methode zum Einsatz von Web 2.0-Werkzeugen in der Fabrikplanung. Dissertation, Technische Universität Chemnitz.

Dörner, D. (1987). Problemlösen als Informationsverarbeitung (3. Aufl.). Stuttgart [u.a.]: Kohlhammer.

FM Star (2014). FM Star: Das Projekt (Internetauftritt des Projekts). Retrieved 25.06.2014 from http://www.fmstar.de/das-projekt/.

Geisberger, E. / Broy, M. (Hrsg.) (2012). Agenda CPS: Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems. München: acatech.

Gomez, P. / Malik, F. / Oeller, K.-H. (1975). Systemmethodik: Grundlagen einer Methodik zur Erforschung und Gestaltung komplexer soziotechnischer Systeme. Bern [u.a.]: Haupt.

Hacker, W. / Sachse P. (2014). Allgemeine Arbeitspsychologie: Psychische Regulation von Tätigkeiten (3., vollständig überarb. Aufl.). Göttingen: Hogrefe.

Hacker, W. / von der Weth, R. (2012). Denken-Entscheiden-Handeln. In: Badke-Schaub, P. / Hofinger, G. / Lauche, K. (Eds.): Human Factors. Psychologie sicheren Handelns in Risikobranchen (pp. 83-99). Berlin; Heidelberg: Springer.

Hofinger, G. (2012). Fehler und Unfälle. In: Badke-Schaub, P. / Hofinger, G. / Lauche, K. (Eds): Human Factors. Psychologie sicheren Handelns in Risikobranchen (pp. 39-60). Berlin; Heidelberg: Springer.

Hopf, H. et al. (2014). Improving Maintenance Processes with Socio-Cyber-Physical Systems. In: Chen, F.F. (Ed.): Proceedings of the 24th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufaturing (pp. 1163-1170). Lancaster, Pennsylvania, USA : DEStech Publications.

Jentsch, D. et al. (2013). Fabrikaudit Industrie 4.0 - Strategischer Ansatz zur Potenzialermittlung und schrittweisen Einführung einer Smart Factory. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 108 (9), 678-681.

Kagermann, H. / Wahlster, W. / Helbig, J. (2013). Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Frankfurt: acatech.

Laue, M. (2010). Methodik zur humanorientierten Systementwicklung und Kommunikationsoptimierung. Dissertation, Technische Universität Chemnitz.

Loskyll, M. (2014). Industrie 4.0 in der praktischen Anwendung. In: Bauernhansl, T. / Hompel, M. / Vogel-Heuser, B. (Eds.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik (pp. 57-84). Wiesbaden: Springer-Vieweg.

Müller, E. / Riedel, R. (2013). Produktion von morgen: Trends, Herausforderungen und exemplarische Lösungsansätze. In: Müller, E. (Ed.): Trends und Strategien für die Produktion von morgen. 10. Fachtagung "Vernetzt planen und produzieren - VPP2013" (pp. 3-12). Wissenschaftliche Schriftenreihe des IBF, Sonderheft 19. Chemnitz.

Nachtwey, A. (2010). Methodischer Beitrag zur Betriebsanalyse komplexer Produktionssysteme. Dissertation, Technische Universität Chemnitz.

Prinz, C. et al. (2014). Concept of Semi-Autonomous Production Planning and Decision Support Based on Virtual Technology In: Chen, F.F. (Ed.): Proceedings of the 24th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufaturing (pp. 1049-1057). Lancaster, Pennsylvania, USA: DEStech Publications.

Riedel, R. (2012). Systematische Fabrikbetriebsplanung auf Basis eines kybernetisch-soziotechnischen Modells. Habilitationsschrift, Technische Universität Chemnitz.

Riedel, R. / Starker, U. / von der Weth, R. (2014). A Multidisciplinary Model of Problem Solving in Complex Production Systems. In: Grabot, B.et al. (Eds.): Innovative and knowledge-based production management in a global-local world; IFIP Advances in Information and Communication Technology; Springer.

Ropohl, G. (2009). Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik (3. Aufl.). Karlsruhe: Universitätsverlag.

Schenk, M. / Wirth, S. / Müller, E. (2014). Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik (2., vollständig überarb. und erw. Aufl.). Berlin; Heidelberg: Springer-Vieweg.

Spath, D. (Hrsg.) et al. (2013). Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation.

Ulich, E. (2011). Arbeitspsychologie (7., neu überarb. und erw. Aufl.). Zürich: Vdf, Hochschulverlag an der ETH; Stuttgart: Schäffer-Poeschel.

Vajna, S. (2014). Integrated Design Engineering: Ein interdisziplinäres Modell für die ganzheitliche Produktentwicklung. Berlin; Heidelberg: Springer-Vieweg.

Verein Deutscher Ingenieure (2008). VDI Richtlinie 4499: Digitale Fabrik. Düsseldorf: VDI.

Verein Deutscher Ingenieure (2011). VDI-Richtlinie 5200: Fabrikplanung. Düsseldorf: VDI.

Weber, W.G. (1997). Analyse von Gruppenarbeit: kollektive Handlungsregulation in soziotechnischen Systemen. Bern [u.a.]: Huber.

Westkämper, E. et al. (2013). Digitale Produktion. Berlin; Heidelberg: Springer

Wiendahl, H.-H. (2012). Auftragsmanagement der industriellen Produktion: Grundlagen, Konfiguration, Einführung. Berlin; Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Wiendahl, H.-P. (2010). Betriebsorganisation für Ingenieure (7., aktualisierte Aufl.). München: Hanser.

Windischer, A. (2003). Kooperatives Planen: Theoretische Herleitung und empirische Überprüfung von Merkmalen und Einflussgrößen kooperativer Planungstätigkeiten in der abteilungsübergreifenden Bedarfsplanung. Dissertation, Universität Zürich.

Erweiterung einer kognitiven Architektur zur Unterstützung der Mensch-Roboter-Kooperation in der Montage

Christopher M. Schlick, Marco Faber, Sinem Kuz, Jennifer Bützler

1 Einleitung

Aufgrund der stetig steigenden Ansprüche der Kunden an die Qualität der Produkte und Prozesse werden produzierende Unternehmen mit immer höheren Anforderungen konfrontiert. Die typischen Prinzipien und Standards der Massenproduktion, die durch Frederick Winslow Taylor und Taiichi Ohno während der zweiten industriellen Revolution geprägt worden sind, finden heutzutage immer weniger Anwendung im betrieblichen Alltag. Stattdessen müssen Unternehmen zunehmend flexibel auf kundenindividuelle Wünsche eingehen, um weiterhin konkurrenzfähig zu bleiben. Diese Individualisierung durch kundenspezifische Anpassungen wirkt sich insbesondere im Bereich der Montage aus und vergrößert die Variantenvielfalt des Produktspektrums in der Regel ganz erheblich. Eine detaillierte Planung der Montageprozesse für alle Produktvarianten wird dadurch immer aufwändiger.

Eine Möglichkeit, diesen neuen Anforderungen zu begegnen, ist die Flexibilisierung der eingesetzten Montagesysteme. Wenn sich die Steuerung der automatisierten Systeme flexibel an die situativen Bedingungen im Fertigungsumfeld anpassen und selbstständig Lösungswege für ein entstandenes Problem aus Prozess-Sicht finden könnte, ließe sich der Aufwand durch Anpassungsentwicklungen der Steuerungsprogramme und Regelungsalgorithmen sowie der Planungsaufwand vor und während der Montage erheblich reduzieren.

Zusätzlich bieten neue Technologien wie die der Leichtbaurobotik neue Möglichkeiten im Bereich der Mensch-Roboter-Kooperation. Mit zahlreicher Sensorik ausgestattet ist es mit diesen Robotern erstmals möglich, die zuvor strikte Trennung zwischen den Arbeitsbereichen des Roboters und des

Menschen aufzulösen (z.B. Bascetta et al. (2011); Fryman & Matthias (2012); Matthias et al. (2011)). Optische und haptische Sensoren ermöglichen es dem Roboter, den Menschen rechtzeitig zu erkennen und seine Bewegung anzupassen oder im Notfall sogar zu stoppen. Die aufgebrachten Kräfte von Leichtbaurobotern sind im Falle einer Kollision wesentlich niedriger als die von bisherigen Industrierobotern, sodass auch das Verletzungsrisiko für die kooperierende Arbeitsperson minimiert wird. Somit können Mensch und Roboter eine Arbeitsaufgabe effektiv und sicher in Kooperation durchführen. Der Roboter übernimmt dabei repetitive Aufgaben oder Aufgaben, die einen hohen Kraftaufwand oder hohe Präzision benötigen. Der Mensch hingegen kann mit seinen sensomotorischen Fertigkeiten und der Fähigkeit des kreativen Denkens insbesondere komplexe und schlecht strukturierte Aufgaben übernehmen (Faber et al., 2013a). Diese sind aufgrund fehlender Modelle der sensumotorischen Koordination sowie der menschlichen Kreativität nur schwer in den automatisierten Prozess integrierbar.

Vor diesem Hintergrund wurde eine kognitive Steuerung (Cognitive Control Unit, CCU) für eine robotergestützte Montagezelle auf Basis einer kognitiven Architektur entwickelt.

2 Kognitives Simulationsmodel

Um die zuvor genannten neuen Herausforderungen an heutige Montagesysteme bewältigen zu können, wurde zunächst ein kognitives Simulationsmodell (Cognitive Simulation Model, CMS) auf der Basis der verbreiteten kognitiven Architektur Soar entwickelt (Faber et al., 2013b). Das CMS zielt auf die Integration einer vereinfachten Repräsentation des mentalen Modells der Arbeitsperson in einem Montageprozess in das dynamische Produktionsumfeld ab. Hierzu zählt insbesondere die transparente Gestaltung des Montageprozesses, sodass sich die involvierte Arbeitsperson mit dem Arbeitsfluss vertraut fühlt und die Arbeitsschritte erwartungskonform sind. Durch das Verständnis für den Prozessablauf wird sie in die Lage versetzt, Fehlersituationen akkurat einzuschätzen und

zukünftige Schritte des kognitiv automatisierten Systems vorherzusehen (Kuz et al., 2012, Odenthal et al., 2012).

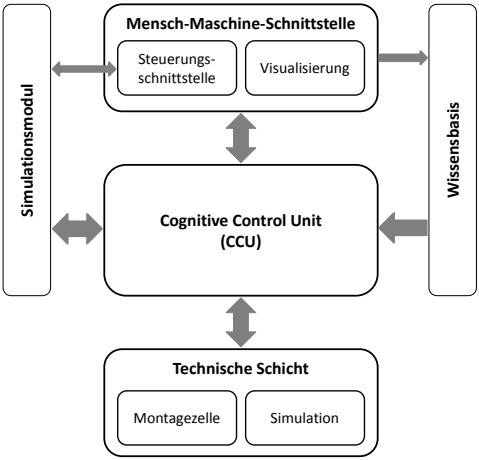


Abbildung 1: Architektur des Cognitive Simulation Model (CSM) (nach Faber et al. (2013b))

Die Architektur des CMS ist modulartig aufgebaut und in Abbildung 1 dargestellt. Das zentrale Element stellt die genannte CCU dar. Sie ist für die Planung und Optimierung der Montagesequenz zuständig. Hierfür unterteilt sie den Arbeitsbereich in drei verschiedene Abschnitte: auf einem Förderband werden Komponenten in das System hinein gegeben und an dem zugehörigen Arbeitsplatz werden diese Komponenten zu einem finalen Produkt montiert. Komponenten, die zwar für das Produkt benötigt aber noch nicht direkt verbaut werden können, können in einem Zwischenlager vorrätig gehalten werden. Die Zuführung der Bauteile kann beliebig sein, sodass auch nicht benötigte Komponenten (beispielsweise für eine weitere Montagestation, die am selben Förderband angeschlossen ist) zugeführt werden können. Als Zielvorgabe erhält die CCU lediglich die Geometrie-Daten in Form eines CAD-Modells des finalen Produkts, d.h. im Wesentlichen den Typ sowie die Lage und Orientierung der einzelnen Bauteile. Hieraus ermittelt die CCU in Kombination mit dem in der

Wissensbasis hinterlegten Prozesswissen eine gültige, d.h. montierbare, Sequenz von Montageschritten.

Die von der CCU ermittelten Montageschritte werden zur Laufzeit über definierte Schnittstellen der technischen Schicht an eine reale robotergestützte Montagezelle (siehe Abbildung 2) weitergeleitet. Diese Montagezelle zeichnet sich durch einen 6-Achs-Knickarmroboter (KUKA KR30 Jet) und einem 3-Finger Greifer mit haptischen Sensoren aus. Um den Montagebereich läuft ein zirkuläres Förderband. Zur Umsetzung der Planungsschritte der CCU hält die Montagezelle auch einen Bereich als Zwischenlager bereit. Um den Planungsprozess effizienter zu gestalten, lässt sich die reale Montagezelle auch durch eine Simulation ersetzen.

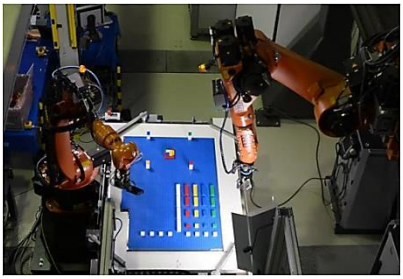


Abbildung 2: Robotergestützte Montagezelle für die kognitiv automatisierte Montage (Brecher et al., 2012)

Über die Mensch-Maschine-Schnittstelle lassen sich Planungs- und Montageparameter anpassen und der Montageprozess kontrollieren. Mit Hilfe des Simulationsmoduls kann nicht nur der Montageprozess selbst simuliert werden, es bietet vielmehr auch die Möglichkeit, neues Prozesswissen für die Planung zu evaluieren.

Wie bereits erwähnt, beruht der Entscheidungszyklus der CCU auf der kognitiven Architektur Soar (Laird, 2012), einem System zur Simulation der menschlichen Kognition. Das für die Montageplanung benötigte Prozesswissen wird ausschließlich in Form von Wenn-Dann-Regeln formuliert. Durch die nicht benötigte Parametrisierungszeit im Vergleich zu anderen Methoden wie beispielsweise neuronalen Netzen kann sich das

CMS flexibel an Änderungen des Produktionsablaufs bzw. der Produktionsumgebung anpassen. Soar kommuniziert über zwei explizite Schnittstellen mit der Umwelt: Über den Input-Link werden Sensordaten sowie andere für die Montageplanung benötigten Informationen eingelesen. Der Output-Link dient zur Weitergabe der getroffenen Entscheidungen an die ausführenden Systeme wie beispielsweise dem Montageroboter. Die Entscheidungsfindung ist hierbei an die menschliche Kognition angelehnt, indem kontinuierlich ein Informationsverarbeitungszyklus durchlaufen wird. Hierbei wird zunächst die aktuelle Situation anhand der zur Verfügung stehenden (Sensor-)Daten analysiert. Darauf aufbauend werden Handlungsalternativen aufgestellt und gegeneinander abgewägt. Schließlich wird die erfolgversprechendste Handlung ausgewählt und an die Umwelt zur Ausführung kommuniziert.

Das für die Entscheidungsfindung notwendige Prozesswissen ist in Soar in Wenn-Dann-Produktionsregeln (engl. Production Rules) hinterlegt. Das Wissen zielt auf eine für die beteiligte Arbeitsperson transparente Gestaltung des Produktionsablaufs ab. Hierfür wurden verschiedene Ebenen des Prozesswissens integriert. Auf unterster Ebene sind Basisregeln formuliert, die die grundsätzliche Fähigkeit der Montage ausdrücken, d.h. ob ein Bauteil zum aktuellen Zeitpunkt montierbar ist. Auf der zweiten Ebene liegen die Regeln, die zur Durchführung eines Montageschritts notwendig sind. Hierbei wurden die elementaren Montagebewegungen an die Bewegungen des Finger-, Hand- und Armsystems des „Methods Time Measurement“-Grundsystems (MTM-1) angelehnt: HINLANGEN, GREIFEN, BRINGEN, POSITIONIEREN und LOSLASSEN. Durch die Anlehnung an das MTM-1-System sind die einzelnen Aktionen des kognitiv automatisierten Systems für die Arbeitsperson planbarer und vorhersagbarer. Daher dienen diese Elementarbewegungen auch als Schnittstelle für die Ansteuerung der realen Montagezelle in der technischen Schicht. Schließlich wurden für die dritte Ebene in empirischen Studien menschliche Strategien für die Montage abgeleitet und in Produktionsregeln überführt (Mayer, 2012a). Die identifizierten Strategien können je nach Planungsziel aktiviert oder

deaktiviert werden. Die Kombination und Anwendung der drei Wissensebenen erhöht die Transparenz des Montageprozesses für den Menschen signifikant (Mayer & Schlick, 2012b).

Trotz der weitreichenden Wissensformulierung stößt die CCU in dieser Form an Grenzen. Aufgrund des RETE-Algorithmus (Dorenbos, 1994; Forgy, 1982), der der Entscheidungsfindung in Soar zu Grunde liegt, hat die CCU im ungünstigsten Fall ein in der Anzahl der Bauteile exponentielles Laufzeitverhalten. Hierzu zählen insbesondere Situationen, in denen mehrere äquivalente Komponenten zur selben Zeit an verschiedenen Orten verbaut werden könnten (Mayer et al., 2012c). Des Weiteren besitzt die CCU lediglich eine Planungstiefe von einem Montageschritt. Dies bedeutet, dass insbesondere komplexe Planungskriterien, die unter Umständen die komplette Montagesequenz benötigen würden, nicht adäquat umgesetzt werden können. Daher hängt der Verlauf der Montage maßgeblich vom nächsten gewählten Montageschritt ab. In Hinblick auf die Mensch-Roboter-Kooperation kann dies zu ungewollten oder gar gefährlichen Situationen führen, die im Vorfeld nicht durch die CCU vorhergesehen werden können. Die menschlichen Fähigkeiten und Fertigkeiten haben einen entscheidenden Einfluss darauf, ob eine Aktion durch den Menschen ausführbar ist oder nicht. Eine Erhöhung des Planungshorizonts würde allerdings den Planungsaufwand und damit die benötigte Planungszeit erheblich steigern, sodass das CMS die relevanten Entscheidungen nicht mehr in Echtzeit treffen könnte. Eine detaillierte Vorabplanung ist aufgrund des hohen Variantenreichtums in der Produktpalette allerdings auch nicht mehr möglich. Aus diesem Grund wurde die CCU um eine weitere Planungseinheit ergänzt.

3 Montageplanung für die Mensch-Roboter-Interaktion

Die im vorherigen Abschnitt genannten Grenzen der CCU zeigen die Notwendigkeit einer Erweiterung der Planungsprozedur des CSM. Die Erweiterung innerhalb der CCU ist allerdings schwierig, da der Lösungsraum für das Treffen von Entscheidungen sehr groß werden würde. Für komplexe

Planungskriterien müssten viele mögliche Systemzustände simuliert werden, um den am besten passenden nächsten Montageschritt zu bestimmen. Daher wurde die CCU um eine externe Graph-basierte Planungseinheit erweitert. Ihr hybrides Vorgehen ist in einen Offline- und einen Online-Abschnitt aufgeteilt (Ewert, 2013). Im Vorfeld des Montageprozesses wird ein Zustandsgraph generiert, der alle gültigen Montagesequenzen des finalen Produktes enthält. Dieser Graph dient als Grundlage für die weiteren Planungsschritte und kann, solange sich die Zusammensetzung des Produkts nicht verändert, für alle Wiederholungen der Montage wiederverwendet werden. Zur Laufzeit der Montage werden die Kanten des Zustandsgraphen entsprechend des notwendigen Aufwands für den Montageschritt mit Strafkosten gewichtet. Anschließend werden mittels Graphsuchalgorithmen die möglichen Montageschritte bestimmt und anhand der ermittelten Kosten verglichen. Die hieraus resultierende Lösungsmenge der potentiellen Montageschritte wird zusammen mit den Gewichtungen der CCU als weitere Entscheidungsgrundlage zur Verfügung gestellt. Die Integration der Graph-basierten Planungseinheit ist in Abbildung 3 dargestellt.

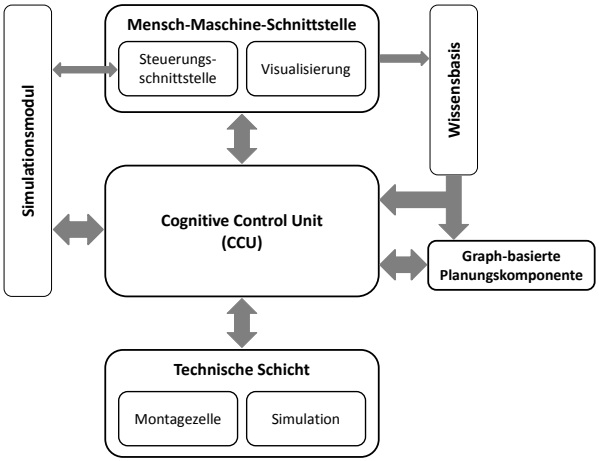


Abbildung 3: Erweiterung der CCU um eine Graph-basierte Planungkomponente (nach Faber et al. (2013b))

3.1 Generierung des Montagegraphen

Der der Planung zu Grunde liegende Montagegraph ist ein gerichteter Zustandsgraph, in dem jeder Zustand einen gültigen Zwischenzustand des Montageprozesses und jede Kante zwischen zwei Zuständen einen gültigen Montageschritt repräsentiert. Für den Aufbau des Graphen müssen alle gültigen Montagesequenzen identifiziert werden, d.h. alle Sequenzen, in denen die Komponenten nacheinander montiert werden können. Hierzu wird die sogenannte „assembly by disassembly"-Strategie (Thomas & Wahl, 2001) angewendet, bei der das finale Produkt rekursiv um jeweils eine Komponente demontiert wird bis keine Komponente mehr übrig bleibt. Die benötigten Informationen hierfür werden ausschließlich aus den Geometrie-Daten des Produkts extrahiert. Um die Allgemeingültigkeit des Montagegraphen zu sichern, kommt beim Zerlegen des Produkts nur ein minimaler Regelsatz zur Anwendung. Demontierbare Komponenten sind demnach dadurch gekennzeichnet, dass sie durch keine anderen Komponenten von oben blockiert werden. Dies entspricht – in umgekehrter Weise – dem in der CCU hinterlegten Prozesswissen auf der ersten Ebene. Jede Komponente ist somit im Allgemeinen genau dann montierbar, wenn alle unterhalb liegenden Komponenten bereits im Vorfeld montiert worden sind. Diese Restriktion geht auf das verwendete Anwendungsszenario zurück, in dem die Fügeoperationen des Roboters stets von oben erfolgen. Eine Festlegung auf einen bestimmten Greifertyp geschieht aus Gründen der Flexibilität an dieser Stelle jedoch nicht, sodass keine nähere Spezifikation der notwendigen Greifflächen erfolgt.

Jeder Zustand des Montagegraphen enthält die Informationen über die bereits montierten Komponenten. Zwei identifizierte Zustände werden während des Aufbaus des Graphen genau dann als äquivalent angesehen, wenn sie denselben Zwischenzustand des Produkts repräsentieren. In diesem Fall werden sie zu einem Knoten zusammengefasst. Alle ausgehenden Kanten eines Knoten stellen die möglichen Montageschritte dar. Eine Kante $s_1 \rightarrow s_2$ zwischen zwei Zuständen s_1 und s_2 wird somit genau dann erstellt, wenn s_2 durch die Montage von genau einer weiteren

Komponente aus s_1 hervorgeht. Während der Montage werden die Kanten mit Strafkosten gewichtet (siehe unten), um auszudrücken, wie „aufwändig“ ein Montageschritt ist. Bei der Auswahl der Montageschritte werden geringere Kosten präferiert, da dadurch in der Regel weniger Planungskriterien verletzt werden.

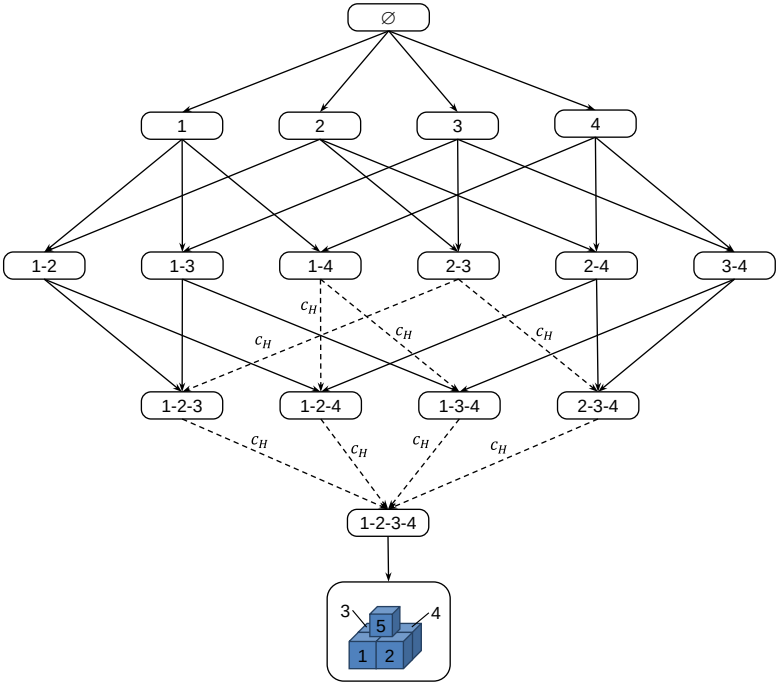


Abbildung 4: Montagegraph eines einfachen Produkts aus kubischen Bauteilen. Die gestrichelten Kanten kennzeichnen die Montageschritte, die aufgrund technischer Restriktionen durch den Menschen durchgeführt werden müssen. (Faber et al., 2013b)

In Abbildung 4 ist der Montagegraph für ein beispielhaftes einfaches Produkt bestehend aus fünf kubischen Komponenten dargestellt. Die Ziffern in den Zuständen geben die bereits montierten Komponenten an. Der so erstellte Montagegraph ist für verschiedene Planungsszenarien wiederverwendbar, solange sich die Zusammensetzung und Struktur des

Endprodukts nicht verändert. Die dynamische Gewichtung der Kanten zur Laufzeit erleichtert dabei die Anpassung des Montagegraphen an die jeweiligen Planungsziele.

3.2 Bewertung von Risiken bei der Montage

Die Bewertung, wie aufwändig ein Montageschritt ist oder ob er für die Arbeitsperson eine Gefahr darstellt, erfolgt über die Gewichtung der Kanten des Montagegraphen. Diese sogenannten Strafkosten werden über hinterlegte Regeln gesteuert, die aus den Planungskriterien abgeleitet sind. Die Bestimmung der Kosten ist dabei vom aktuellen Systemzustand abhängig, der neben den bereits montierten Bauteilen auch die aktuell zur Verfügung stehenden Bauteile enthält. Dadurch müssen die Kosten für eine Montagesequenz in jedem Planungszyklus angepasst werden. Die Planungskriterien umfassen unter Anderem technische Restriktionen, die aufgrund der Verwendung spezieller Hardware zustande kommen. Bei der Verwendung eines 2-Finger- statt eines 3-Finger-Greifers müssen beispielsweise zwei gegenüberliegende Seiten der zu greifenden Komponenten frei zugänglich sein, da sie andernfalls nicht korrekt montiert werden können.

Aber auch die Interaktion mit dem menschlichen Operateur kann über hinterlegte Regeln gesteuert werden. Montageschritte, die als ergonomisch ungünstig angesehen werden oder gar eine Gefahr für den Mitarbeiter darstellen, werden mit hohen Kantenkosten bewertet und somit durch die Regel verhindert. Ebenso sind häufige bzw. unnötige Wechsel zwischen manuellen Arbeitsphasen durch den Menschen und autonomen Arbeitsphasen durch den Roboter zu vermeiden. Ein genereller Ausschluss von Montageschritten, die nicht optimal sind, ist allerdings aus zwei Gründen nicht empfehlenswert. Zum einen kann durch Akzeptieren von mehreren Arbeitsschritten, die nicht optimal sind, eventuell ein einzelner gefährlicher Arbeitsschritt vermieden werden, zum anderen kann sich eine Variation der Belastung auch positiv auf den langfristigen Erhalt der körperlichen Leistungsfähigkeit und Gesundheit auswirken.

Beginnend mit dem aktuellen Knoten des Montagegraphen, werden die Kosten für alle Nachfolgeknoten bestimmt. Hierfür wird für jede Regel überprüft, ob ihre Bedingungen verletzt sind. Falls dies so ist, werden zwei Fälle unterschieden: Wenn es zulässig ist, Planungskriterien zu verletzen, werden die zusätzlichen Kosten zu den bisherigen Kosten der Kante hinzu addiert. Dies bewirkt lediglich eine schlechtere Bewertung des Montageschritts und ist für Planungskriterien geeignet, die eine Präferenz ausdrücken. Sofern eine Regel aber niemals verletzt werden darf, wird der Montageschritt und somit die entsprechende Montagesequenz von der Kandidatenmenge der möglichen Montageschritte ausgeschlossen. Dies ist insbesondere für ausschließende Kriterien wie beispielsweise technische Restriktionen oder die Kennzeichnung von gefährlichen Situationen wichtig. Die beschriebene Bestimmung der Strafkosten wird für alle vom aktuellen Knoten erreichbaren Zustände wiederholt.

In dem Beispielgraph aus Abbildung 4 sind zunächst alle Kanten mit den gleichen Basiskosten c_b bewertet, die den Aufwand für die elementare Montage einer Komponente angeben. Die gestrichelten Kanten kennzeichnen die Montageschritte, bei denen die zu montierende Komponente keine zwei parallelen Greifflächen aufweist. Dadurch kann sie beispielsweise nicht mit Hilfe eines 2-Finger-Greifers montiert werden, sodass dieser Schritt, sofern kein Wechsel des Greifers möglich ist, durch den Menschen erledigt werden muss, In diesem Fall werden die Kanten zusätzlich zu den Basiskosten c_b mit den Kosten c_H für die manuelle Montage bewertet. Im vorliegenden Fall gibt es offensichtlich keine Möglichkeit, das Produkt mittels eines 2-Finger-Greifers ohne menschliche Intervention zu montieren. Die Anzahl der Eingriffe kann allerdings durch eine geeignete Wahl der Montagesequenz minimiert werden.

$$\underbrace{s_0 \rightarrow \cdots \rightarrow}_{\substack{\text{nicht}\\ \text{betrachtet}}} \underbrace{\underbrace{s_i \rightarrow \cdots \rightarrow s_{i+j}}_{\substack{\text{verfügbare}\\ \text{Komponenten}}} \rightarrow \underbrace{s_{i+j+1} \rightarrow \cdots \rightarrow s_n}_{\substack{\text{nicht verfügbare}\\ \text{Komponenten}}}}_{\text{Basiskosten+Strafkosten}}$$

Abbildung 5: Bestimmung der Kosten für eine beliebige Montagesequenz (s_0: leerer Zustand, s_i: aktueller Zustand, s_n: Endzustand).

Abbildung 5 zeigt eine Montagesequenz, in der s_0 den (leeren) Startzustand und s_n den Endzustand des finalen Produkts darstellen. Jede Kante $s_u \rightarrow s_v$ $(i \leq u, v \leq n)$ wird mit den Basiskosten c_b sowie den durch die spezifizierten Planungskriterien entstehenden Kosten bewertet. Um die Kosten der möglichen Montageschritte zu bestimmen, müssen auch die Kosten der zugehörigen Montagesequenzen betrachtet werden, da sie als Ordnungskriterium für die zurückgelieferten Lösungen verwendet werden. Hierfür wird beginnend vom aktuellen Zustand s_i eine Suche im Graphen gestartet (siehe unten). Zur Bestimmung der Pfadkosten ist dabei auch die Menge der zur Montage zur Verfügung stehenden Komponenten entscheidend. Sei j die Anzahl dieser Komponenten, dann können lediglich die Montageschritte s_{i+1},…,s_{i+j} zuverlässig geplant werden. Über die verbleibenden Schritte können aufgrund der ungewissen Bauteilzuführung nur Annahmen getroffen werden. Dennoch werden auch die Strafkosten dieser Arbeitsschritte mit in die Gesamtkosten einbezogen. Hierbei wird die Annahme getroffen, dass die benötigten Komponenten jeweils zur Verfügung stehen, wenn beim Realisieren des optimalen Pfades die Zustände s_{i+j},…,s_{n-1} erreicht werden. Dies ist sicherlich eine rigorose Annahme, da alle folgenden Zustände bereits ohne Berücksichtigung der zukünftigen Lage in s_i fixiert werden. Allerdings würde eine Nichtbeachtung dieser Strafkosten eine unter Umständen erhebliche Unterschätzung der Kosten zur Folge haben, insbesondere dann, wenn die nicht genauer planbaren Montageschritte hohe Kosten verursachen würden. Die Annahme wird auch dadurch gestützt, dass in der Regel die Anzahl der verbleibenden Montageschritte $n - (i + j)$ wesentlich höher ist als die Anzahl der zur Montage zur Verfügung stehenden Komponenten, sodass die verbleibende Sequenz s_{i+1+j},…,s_n einen größeren Einfluss auf die Suche nach den optimalen Montagesequenzen hat.

3.3 Auswertung der Montagemöglichkeiten

Die Erweiterung der CCU durch die Graph-basierte Planungskomponente dient der Reduzierung des Lösungsraums bei der Entscheidungsfindung durch die CCU. Daher ist sie in jedem Montagezyklus involviert und wertet

den aktuellen Systemzustand aus. Wenn die CCU nicht mit der Montage einer Komponente beschäftigt ist, wird dazu der Montagegraph aktualisiert, indem anhand des aktuellen Systemzustands die Kosten für die einzelnen Montageschritte angepasst werden (siehe Kapitel 3.2).

Der aktualisierte Montagegraph wird anschließend hinsichtlich der möglichen Erweiterungen der aktuell realisierten Montagesequenz ausgewertet. Dazu wird eine modifizierte Version des Algorithmus A*Prune (Liu & Ramakrishnan, 2001) verwendet. A*Prune unterscheidet sich vom weit verbreiteten Suchalgorithmus A* insofern, dass nicht nur der optimale Pfad zurückgeliefert wird, sondern die besten k Pfade. Dies ist notwendig, da die CCU nicht nur die Informationen über den optimalen Pfad erhalten soll, sondern über mehrere „gute“ Pfade, sodass sie sich unter Berücksichtigung des hinterlegten Wissens für den insgesamt besten Pfad entscheiden kann. Zusätzlich hält A*Prune durch geeignete Verfahren die Kandidatenmenge für die zurückgelieferten Pfade möglichst gering.

Die Auswertung der Pfadkosten in A*Prune muss für den Bereich der Montageplanung angepasst werden. Aufgrund der Art wie die Klasse der A*-Algorithmen arbeiten, können die Kosten zweier konkurrierender Knoten nicht durch den Vergleich der Basiskosten für die Montage sowie der Strafkosten ins Verhältnis gesetzt werden. Ist eine Kante nämlich aufgrund eines nicht verfügbaren Bauteils nicht realisierbar, müsste die Kante mit unendlich hohen Kosten bewertet werden. Dies hätte allerdings zur Folge, dass der Zielzustand auf diesem Pfad nicht mehr erreichbar ist und der Pfad aus der Kandidatenmenge der Lösungsmenge ausgeschlossen werden würde. Um dies zu vermeiden, werden zwei Knoten zunächst anhand des realisierbaren Montagefortschritts verglichen, d.h. es wird die Anzahl bestimmt, wie viele Montageschritte mit den verfügbaren Bauteilen durchgeführt werden können, wenn der zu untersuchende Knoten gewählt werden würde. Der Knoten mit dem höheren erreichbaren Montagefortschritt wird dabei bevorzugt. Wenn beide Knoten anhand dieser Regel nicht unterschieden werden können, werden sie mithilfe der durch A*Prune ermittelten regulären Kosten des verbleibenden

Montagepfades verglichen. Hierbei haben niedrige Kosten eine höhere Präferenz für den Knoten zur Folge. Sollten zwei Knoten auch dann noch nicht unterscheidbar sein, werden sie anhand des bisher realisierten Montagefortschritts verglichen. Durch die Wahl des Knotens mit dem höheren Fortschritt kann die Gesamtanzahl der notwendigen Iterationen verringert werden. Erst wenn alle drei Vergleiche fehlschlagen, werden die Knoten als äquivalent angesehen.

Eine weitere Anpassung von A*Prune betrifft die Menge der zurückgelieferten Pfade. Da die Planung der CCU stets nur den nächsten Montageschritt betrifft, sollten die zur Auswahl stehenden Pfade möglichst heterogen sein. Von mehreren Pfaden mit demselben ersten Montageschritt wird daher immer nur der jeweils beste Pfad in Bezug auf die Gesamtkosten in der Lösungsmenge belassen.

Die so erzielte Lösungsmenge der k besten nächsten Montageschritte wird schließlich der CCU als Unterstützung für die weitere Entscheidungsfindung zugeführt. Dabei werden die Montageschritte entsprechend der Gesamtkosten des zugehörigen Pfades gewichtet, sodass der Schritt mit den geringsten Kosten die höchste Präferenz erhält. Die CCU kann dabei Pfade, die eine zu hohe Abweichung vom optimalen Pfad haben, von der weiteren Betrachtung ausschließen. Aufgrund der limitierten Planungsmöglichkeiten der CCU können Montageschritte vorgeschlagen werden, die durch den Graph-basierten Planungsalgorithmus abgelehnt wurden. Da dieser über mehr Informationen verfügt, werden solche Schritte dann auch in der CCU abgelehnt. Die Entscheidungsfindung basiert anschließend sowohl auf dem durch den Graphen eingeführten externen Wissen als auch auf dem vorhandenen internen Prozesswissen. Dadurch bleiben die kognitiven Fähigkeiten sowie das reaktive Verhalten der CCU auf Veränderungen in der Umgebung erhalten.

4 Evaluation der Montageplanung am Beispiel kubischer Bauteile

Die um die Graph-basierte Planungskomponente erweiterte CCU wurde in einer Simulationsstudie evaluiert. Dabei stand sowohl die Korrektheit der

Planungsprozedur als auch die Unterstützung der Mensch-Roboter-Kooperation im Vordergrund. Basierend auf der entwickelten Architektur wird von folgenden Hypothesen bei der Montageplanung ausgegangen:

- Reduzierung der Häufigkeit der manuellen Interventionen durch den Menschen in der Mensch-Roboter-Kooperation: Die Montage sollte möglichst autonom ablaufen und der Mensch nur noch solche Montageschritte zugeteilt bekommen, bei denen seine Kernkompetenzen liegen, d.h. bei denen es auf kreatives Denken oder sensumotorische Fähigkeiten ankommt.
- Reduzierung der zeitlichen Varianz der manuellen Montageschritte: Ein Stauchen der manuellen Einsatzzeitpunkte ermöglicht der Arbeitsperson ein möglichst unterbrechungsfreies Arbeiten. Gleichzeitig hat sie für ihre Tätigkeiten mehr Gestaltungsspielraum, beispielsweise in Bezug auf die Aufteilung der Taktzeit, als wenn jeder Montageschritt isoliert durchgeführt werden müsste.
- Reduzierung der Wechsel zwischen Baugruppen: Produkte, die aus mehreren Baugruppen bestehen, sollten in der zeitlichen Abfolge möglichst so aufgebaut werden, dass wenig zwischen den Baugruppen gewechselt werden muss. Dies erhöht die Transparenz des Montageablaufs für die Arbeitsperson und erleichtert ein potentielles Eingreifen für die manuelle Montage.

4.1 Simulationsexperimente

Die in der Simulation untersuchten Faktoren umfassten die Produktgröße, die Komplexität des Montagegraphen sowie die Anzahl der gleichzeitig zugeführten Bauteile. Die Produkte bestanden aus 4 bis 24 einfarbigen kubischen Bauteilen und variierten in der Komplexität des zugehörigen Montagegraphen. Die Komplexität wurde anhand des durchschnittlichen Knotengrades bestimmt, d.h. der durchschnittlichen Anzahl an benachbarten Knoten im Montagegraph. Produkte des Typs 1 bestanden aus einer Ebene von Bauteilen, sodass der zugehörige Graph einen sehr hohen Verzweigungsgrad aufweist. Der Typ 5 beschreibt Produkte, deren

Bauteile in Form eines Turms alle übereinander montiert werden und somit nur einen einzigen Pfad im Montagegraphen erzeugen. Die Typen 2 bis 4 beschreiben Zwischenstufen in der Komplexität des Graphen. Die Bauteilzuführung war zufällig, wobei auch Bauteile enthalten sein konnten, die für das aktuelle Produkt nicht benötigt wurden. Die Anzahl der gleichzeitig zugeführten Bauteile wurde zwischen 1 und 24 variiert.

Für jede Kombination der obigen Faktoren wurden Simulationen mit der ursprünglichen sowie mit der erweiterten CCU berechnet. Dabei wurde folgendes Planungswissen verwendet: (1) Neue Bauteile dürfen nur an bereits bestehende Bauteile montiert werden (in Anlehnung an die in Mayer (2012a) herausgefundenen Montageregeln zur Steigerung der Transparenz des Montageprozesses). (2) Die beispielhafte Anwendung eines 2-Fingergreifers erfordert die Berücksichtigung technischer Restriktionen in Form zweier freier, paralleler Greifflächen. Falls dies nicht der Fall ist, muss das Bauteil manuell durch den Menschen montiert werden (in dieser Studie ebenfalls durch den Computer simuliert).

Als abhängige Variable dienten die generierte Montagesequenz sowie die daraus hervorgehenden notwendigen manuellen Eingriffe durch den menschlichen Operateur.

4.2 Ergebnisse

Zunächst wurden die benötigten Montagegraphen für die verschiedenen Produktvarianten generiert. Die Größe des Graphen wächst aufgrund der kombinatorischen Vielfalt im Montageablauf in Abhängigkeit der Produktgröße exponentiell (siehe Abbildung 6). Selbst kleine Produkte erreichen bereits eine hohe Anzahl an Knoten, wobei Produkte des Typs 1 (alle Bauteile in einer Ebene) den größten Graphen und Produkte des Typs 5 (alle Bauteile aufeinander) den kleinsten Graphen hervorrufen.

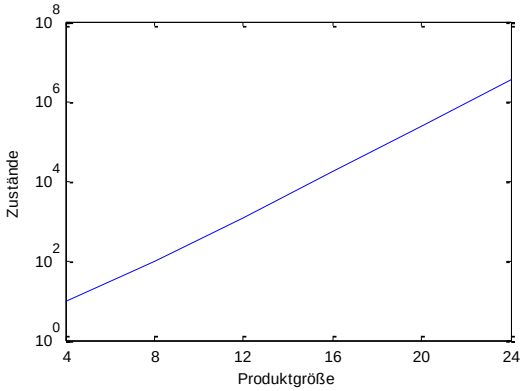


Abbildung 6: Anzahl der Knoten des Montagegraphen in Abhängigkeit der Anzahl der Bauteile des Produkts (Faber et al., 2013b)

Zur Überprüfung der Hypothesen fokussierte das in dieser Studie untersuchte Szenario die notwendigen manuellen Interventionen durch den Menschen. Die Anzahl der manuellen Montageschritte kann dabei durch die Aktivierung der Graph-basierten Planungskomponente signifikant reduziert werden ($F(1; 27) = 46{,}420,\ p < 0{,}05$). Gleichermaßen tritt auch in Bezug auf die Anzahl der Bauteile des Produkts eine signifikante Reduktion auf ($F(1{,}013; 27{,}361) = 302{,}165,\ p < 0{,}05$), welche sich durch die Struktur der Produkte erklären lässt. Bei größeren Produkten müssen potentiell mehr Bauteile manuell montiert werden als bei kleineren Produkten. In Abbildung 7 ist die durchschnittliche Anzahl der manuellen Montageschritte dargestellt. Die Produkte der Größe 4 sowie des Typs 5 wurden dabei nicht berücksichtigt, da sie in Bezug auf das verwendete Planungswissen keinerlei manuelle Intervention verlangen. Die durchschnittliche Anzahl der manuellen Montageschritte konnte um bis zu 20,3 % reduziert werden. Aufgeschlüsselt auf den zeitlichen Verlauf (siehe Abbildung 8) ist zu erkennen, dass die manuellen Interventionen durch Einsatz des Graph-basierten Planungsalgorithmus im Allgemeinen erst später notwendig sind und sich deren zeitliche Streuung verringert. Für die Produkte, die aus 8 Bauteilen bestehen, konnte der manuelle Eingriff sogar auf einen einzelnen fest definierten Punkt in der Montagesequenz reduziert werden.

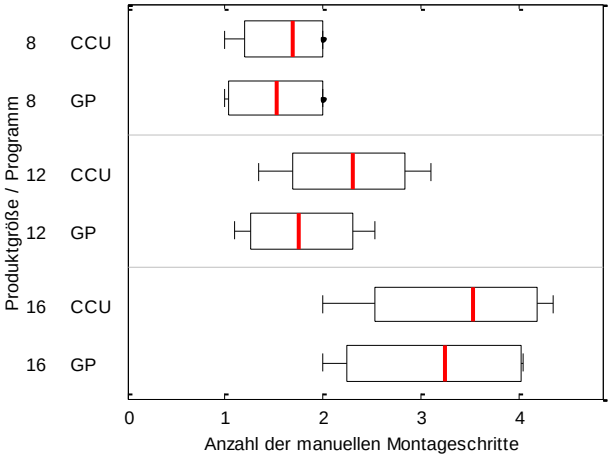


Abbildung 7: Anzahl der notwendigen manuellen Montageschritte mit der ursprünglichen CCU (CCU) und der um die Graph-basierte Planungskomponente erweiterten CCU (GP).

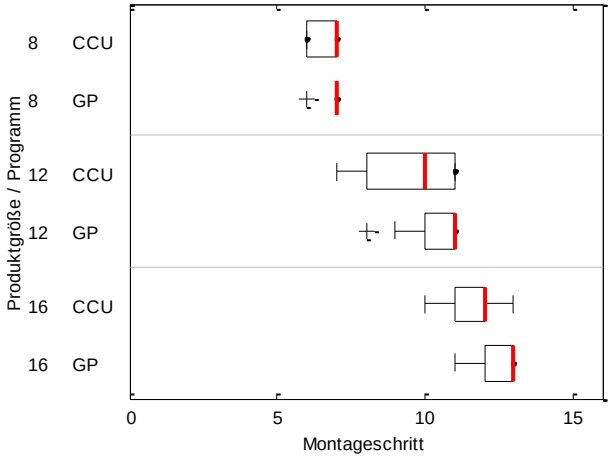
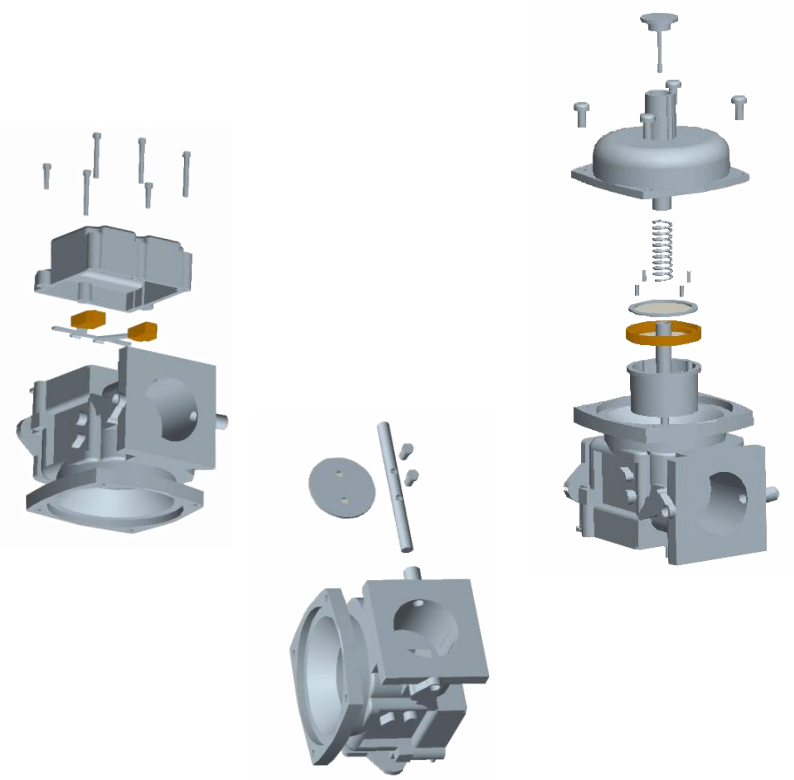


Abbildung 8: Zeitlicher Verlauf der notwendigen manuellen Montageschritte mit der ursprünglichen CCU (CCU) und der um die Graph-basierte Planungskomponente erweiterten CCU (GP) für Produkte des Typs 2.

5 Übertragung auf reale Bauzusammenhänge

Zur Überprüfung der Effekte der Graph-basierten Planungskomponente auf reale Bauzusammenhänge wurde eine weitere Simulationsstudie durchgeführt. Als Montageprodukt diente hierbei ein vereinfachtes Modell eines Strombergvergasers (siehe Abbildung 9), der aus drei voneinander unabhängigen Baugruppen besteht, die jeweils an ein zentrales Gehäuse montiert werden. Analog zur vorherigen Simulationsstudie wurde die ursprüngliche CCU mit der durch den Graph-basierten Planungsalgorithmus erweiterten CCU hinsichtlich der Anzahl der Baugruppenwechsel verglichen. In der Graph-basierten Planungskomponente wurde dazu eine Planungsregel aktiviert, die vorschreibt, dass eine angefangene Baugruppe zunächst fertig montiert werden muss, bevor eine neue Baugruppe angefangen werden darf.

In der Studie wurden drei Szenarien miteinander verglichen: (1) Die ursprüngliche CCU plant die Montage des Vergasers ohne Hilfe des Graph-basierten Planungsalgorithmus. (2) Die Graph-basierte Planungskomponente unterstützt die CCU, wobei die Planungsregel zur Vermeidung der Baugruppenwechsel verletzt werden darf. (3) Die Graph-basierte Planungskomponente unterstützt die CCU, wobei die Planungsregel nicht verletzt werden darf. In allen drei Szenarien wurden die Bauteile zufällig zugeführt, wobei die Anzahl der zugleich zugeführten Bauteile zwischen 1 und 24 variiert worden ist. Das zentrale Gehäuse, auf dem die übrigen Bauteile montiert werden, wurde als erste Komponente bereitgestellt, damit sich der Beginn des Montageprozesses nicht unnötig verzögert.



(a) (b) (c)

Abbildung 9: Vereinfachtes Modell eines Strombergvergasers bestehend aus drei Baugruppen.

Der Vergleich der beiden ersten Szenarien zeigt, dass der Graph-basierte Planungsalgorithmus teilweise einen Effekt auf die Anzahl der durchgeführten Baugruppenwechsel hat. In Abbildung 10 ist die durchschnittliche Anzahl der Wechsel sowie der zugehörige Standardfehler während der Montage des Vergasers in Abhängigkeit der Anzahl der zugeführten Bauteile dargestellt. Insbesondere in den Fällen, in denen viele Bauteile gleichzeitig zugeführt werden, werden die Effekte deutlich, da die Montagereihenfolge so gewählt wurde, dass möglichst wenige Wechsel

zwischen den Baugruppen notwendig sind. Der Wilcoxon Rangsummentest zeigt, dass dort der erzielte Effekt signifikant ist (siehe Tabelle 1).

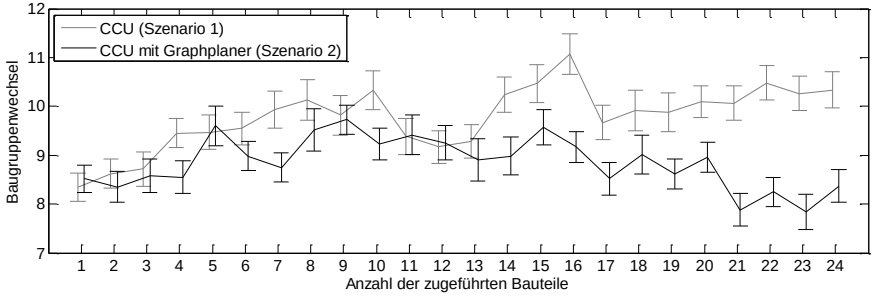


Abbildung 10: Durchschnittliche Anzahl der Baugruppenwechsel in Abhängigkeit von der Anzahl der zugeführten Bauteile.

Tabelle 1: Ergebnis des Rangsummentests für die Anzahl der Baugruppenwechsel in Abhängigkeit der Anzahl der zugeführten Bauteile (ZF, * = signifikant für $\alpha = 0{,}05$).

ZF	1	2	3	4*	5	6	7*	8	9	10*	11	12
p	0,405	0,239	0,686	0,026	0,973	0,282	0,008	0,292	0,833	0,042	0,790	0,751
ZF	13	14*	15	16*	17*	18	19*	20*	21*	22*	23*	24*
p	0,299	0,031	0,088	0,001	0,015	0,125	0,019	0,034	<0,00	<0,00	<0,00	<0,00

Große Auswirkungen hat die neue Planungsregel allerdings auf den Zeitbedarf der Montage. Die Bauteile, die aufgrund der aufgestellten Restriktionen nicht direkt montiert werden dürfen, werden zunächst in ein Zwischenlager gebracht, um vor dort aus zu einem späteren Zeitpunkt verbaut zu werden. Während zwischen den ersten beiden Szenarien mit durchschnittlich +0,84 % kaum ein Unterschied darin besteht, wie viele zusätzliche Bewegungszyklen (Aufnehmen und Platzieren) durchgeführt werden müssen, sind im dritten Szenario deutlich mehr Zyklen erforderlich. Hier liegt der Anstieg bei durchschnittlich +63,66 %. Dies ist auch plausibel, da ein zwischenzeitliches Montieren von Bauteilen anderer Baugruppen explizit verboten wird.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die zunehmende Veränderung in Richtung kundenindividualisierte Produktion stellt neue Herausforderungen an produzierende Unternehmen. Die größer werdende Variantenvielfalt lässt es immer aufwändiger werden, die Montageprozesse exakt voraus zu planen. Eine wichtige Voraussetzung zur Kompensation ist die Flexibilisierung solcher Montagesysteme, sodass sie sich dynamisch an unvorhersehbare Veränderungen anpassen können. Daneben ist es essentiell, dass Fähigkeiten und Fertigkeiten des Menschen geeignet mit den Funktionen der Maschinen kombiniert werden. Ein Roboter kann mit hoher Präzision und Wiederholgenauigkeit repetitive Aufgaben erledigen, wohingegen der Mensch insbesondere bei Aufgaben, bei denen es auf kreatives Denken oder sensumotorische Fähigkeiten ankommt, der Maschine überlegen ist.

Das CSM stellt einen Ansatz dar, wie die Montage von variantenreichen Produkten erfolgreich in Kooperation mit dem Menschen kognitiv automatisiert werden kann. Die CCU ist in der Lage, anhand der geometrischen Eigenschaften eines Produktes in Form von CAD-Modellen eine Montagesequenz abzuleiten, anhand der das Produkt in einer Montagezelle montiert werden kann. Zusätzlich sind permanente Umplanungen bei Änderungen im Materialfluss oder sogar der Produktionsstruktur möglich, ohne dass die RC-Programme manuell angepasst werden müssen. Das dazu hinterlegte prozedurale Wissen ist so gestaltet, dass der Montageprozess für den kooperierenden Operateur transparent und verständlich ist. Um auch komplexe Planungskriterien integrieren zu können, wurde die CCU mit einer Graph-basierten Planungskomponente erweitert. Dessen Graph beinhaltet alle validen Montagesequenzen und kann anhand von hinterlegten Regeln die möglichen Alternativen im Montageablauf bewerten und miteinander vergleichen. Damit erhält die CCU wichtige Zusatzinformationen in Form von gewichteten Vorschlägen für den nächsten Montageschritt, die sie selber nicht ableiten könnte.

In zwei Simulationsstudien haben sich die aufgestellten Hypothesen an das Planungsverhalten bestätigt und es konnte gezeigt werden, dass der Montageablauf mit aktiviertem Graph-basiertem Planungsalgorithmus signifikant verbessert werden konnte. So ließen sich die Anzahl der Wechsel zwischen Montagetätigkeiten durch den Roboter und den Menschen einerseits reduzieren und andererseits die zeitliche Varianz der manuellen Eingriffe verringern. Die simulative Montage eines vereinfachten Modells eines Strombergvergasers zeigte zudem, dass Bauteile mit mehreren Baugruppen durch geeignete Regeln mit weniger Wechseln zwischen den Baugruppen montiert werden können. Die verbleibende hohe Anzahl der Wechsel im Vergleich zum theoretischen Minimum liegt in der Art der Bauteilzuführung: Die zeitgleich zugeführten Bauteile werden zunächst allesamt verarbeitet, d.h. entweder montiert, in den Puffer gelegt oder als nicht benötigt verworfen, bevor neue Bauteile zugeführt werden. Bei einer sofortigen Nachführung der Bauteile würden sich die Effekte stärker zeigen.

Insbesondere die Ergebnisse der zweiten Simulationsstudie zeigen allerdings auch deutlich, dass es auf die richtige Abwägung der Planungskriterien ankommt. So ist es zwar einerseits möglich, die Wechsel zwischen Baugruppen auf ein Minimum zu reduzieren. Dies bedingt aber andererseits, dass Bauteile, die in der Zwischenzeit dem Montageplatz zugeführt werden, entweder abgewiesen werden und zunächst zur Seite gelegt werden müssen. Eine zu strikte Auslegung der Planungsregeln kann also unter Umständen auch kontraproduktiv sein. Für weitergehende Aussagen müsste die Wirksamkeit der Graph-basierten Planungskomponente anhand eines Produkts mit höherer Variantenvielfalt im Montageablauf als der Vergaser evaluiert werden.

Für eine weitergehende Unterstützung der Mensch-Roboter-Kooperation ist zudem geplant, den Montageprozess unter ergonomischen Gesichtspunkten zu optimieren. Die Aufgaben, die besser durch den Menschen durchgeführt werden sollten, dürfen ihn weder auf Dauer zu sehr belasten noch seine Gesundheit gefährden. Hierzu können Mechanismen in der CCU helfen, die es ermöglichen, die Montage eines jeden Bauteils

situationsabhängig hinsichtlich des ergonomischen Risikos zu bewerten. Hierbei können auch (temporäre) Einschränkungen der Arbeitsperson berücksichtigt werden, um den Montageprozess individuell anzupassen und zu optimieren.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), welche im Rahmen des Exzellenzclusters „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“ die vorgestellten Arbeiten fördert.

Literatur

Bascetta, L. et al. (2011). Towards safe human-robot interaction in robotic cells: an approach based on visual tracking and intention estimation. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (p. 2971-2978).

Brecher, C. et al. (2012). Design and Implementation of a Comprehensible Cognitive Assembly System. In: Conference Proceedings of the 4th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE). Stoughton: USA Publishing.

Doorenbos, R.B. (1994). Combining Left and Right Unlinking for Matching a Large Number of Learned Rules. In: Proceedings of the Twelfth National Conference on Artificial Intelligence.

Ewert, D. (2013). Adaptive Ablaufplanung für die Fertigung in der Factory of the Future. Dissertation, RWTH Aachen University. Aachen: Apprimus.

Faber, M. / Mayer, M. P. / Schlick, C. M. (2013a). Requirements for Modeling the Human Operator in Socio-Technical Production Systems. In: The 11th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments. Aachen: Apprimus.

Faber, M. et al. (2013b). Design and Implementation of a Cognitive Simulation Model for Robotic Assembly Cells. In: Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics. Understanding Human Cognition (p. 205-214). Heidelberg: Springer.

Forgy, C. L. (1982). Rete: A fast algorithm for the many pattern/many object pattern match problem. Artificial Intelligence, 19(1), 17-37.

Frymann, J. / Matthias, B. (2012). Safety of Industrial Robots: From Conventional to Collaborative Applications. In: Proceedings of 7th German Conference on ROBOTIK 2012.

Kuz, S. et al. (2012). The Effect of Anthropomorphic Movements of Assembly Robots on Human Prediction. In: Advances in Ergonomics in Manufacturing (p. 263-271). Boca Raton, FL, USA: CRC Press

Laird, J. E. (2012). The Soar Cognitive Architecture. MIT Press.

*Liu, G. / Ramakrishnan, K. (2001). A*Prune: an algorithm for finding K shortest paths subject to multiple constraints. In: Proceedings of the 20th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (p. 743-749).*

Matthias, B. et al. (2011). Safety of collaborative industrial robots: Certification possibilities for a collaborative assembly robot concept. In: IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM).

Mayer, M. P. (2012a). Entwicklung eines kognitionsergonomischen Konzeptes und eines Simulationssystems für die robotergestützte Montage. Dissertation, RWTH Aachen University. Aachen: Apprimus.

Mayer, M. P. / Schlick, C. M. (2012b). Improving operator's conformity with expectations in a cognitively automated assembly cell using human heuristics. In: Advances in Ergonomics in Manufacturing(p. 302-311). Boca Raton, FL, USA: CRC Press.

Mayer, M. P. et al. (2012c). Cognitively Automated Assembly Processes: A Simulation Based Evaluation of Performance. Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation - IEA 2012: 18th World congress on Ergonomics - Designing a sustainable future (p. 3449-3454).

Odenthal, B. et al. (2012). Design and Evaluation of an Augmented Vision System for Human-Robot Cooperation in Cognitively Automated Assembly Cells. In: Proceedings of the 9th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices (SSD).

Thomas, U. / Wahl, F. (2001). A System for Automatic Planning, Evaluation and Execution of Assembly Sequences for Industrial Robots. In: Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems (p. 1458-1464).

Industrie 4.0 in der Anwendung

Industrie 4.0 – Wege und Lösungsbeispiele

Michael Schenk

Der Einfluss von Cyber-Physical Systems auf die Gestaltung von Produktionssystemen

Norbert Gronau

Augmented Reality zur kundenintegtrierten Variantenplanung (1407)

Hermann Lödding, Fedor Titov

Ansätze für eine Online-Optimierung der Losgrößen in der Serienfertigung

Wilhelm Dangelmaier

Intelligenter Störungsassistent im Serienanlauf als Industrie 4.0-Anwendungsfall

Dieter Spath, Bastian Pokorni, Oliver Ganschar, Sebastian Schlund

Wissensentdeckung in vernetzten, industriellen Datenbeständen

Jochen Deuse, Olga Erohin, Daniel Lieber

IT-Sicherheit als besondere Herausforderung von Industrie 4.0

Sander Lass, David Kotarski

Industrie 4.0 – Wege und Lösungsbeispiele

Michael Schenk

1 Ausgangslage

Laut der Bundesregierung befinden wir uns gerade in einer revolutionären Phase bzw. auf einer Schwelle. Diese Phase wird als 4. Industrielle Revolution bezeichnet und mit dem Begriff der Industrie 4.0 versehen.[1]

Im Bezug zur Industrie 4.0 wird sehr oft darüber diskutiert, ob es eine wirkliche Revolution oder doch eher eine Evolution ist, dazu kurz folgende Ausführungen:

Die Begriffe Revolution und Evolution (Entwicklung) verursachen in den Köpfen der Menschen unterschiedliche Bilder und Erinnerungen. Eine Revolution wird vermutlich mit der französischen Revolution und dem Bild der Hinrichtung von Ludwig dem XVI. in Verbindung gebracht oder mit den friedlichen Demonstrationen der DDR Bürger. Im Ergebnis ist eine Revolution immer ein schneller, radikaler und oft gewaltsamer Wandel. Dagegen projiziert die Evolution vermutlich das Bild des Affenmenschen hervor, der langsam den aufrechten Gang erlernt, immer größer wird und irgendwann als „richtiger“ Mensch seiner Tätigkeit nachgeht.

Auf dem Weg zur Industrie 4.0 hat die Menschheit schon mehrere Industrielle Revolutionen erlebt. Als die erste und damit die Industrielle Revolution schlechthin, wird die Mechanisierung der Produktionsanlagen in Großbritannien am Ende des 18.Jahrhunderts und ihrer einhergehenden Verbreitung um den ganzen Globus verstanden. Der Auslöser dieser Revolution war die Erfindung des ersten mechanischen Webstuhls 1784.[2] Jedoch wurde der Begriff erst zirka 50 Jahre später geprägt und besitzt eine Analogie zur Französischen Revolution. Die zweite Industrielle Revolution

---

[1] (Plattform Industrie 4.0, 2014)

[2] (Wrede, 2014)

hatte ihren Auslöser in der Erfindung des ersten Fließbandes und der Nutzung dieser Technologie zum Beispiel in den Schlachthöfen von Cincinnati im Jahr 1870.[3] Wiederum besteht hier ein großer zeitlicher Unterschied zwischen dem Auslöser und der Begriffsprägung in den 1930er Jahren. Dieser zeitliche Unterschied ist bei der dritten Industriellen Revolution geringer geworden. Für diese Revolution war der Auslöser der Modicon 084 (1969),[4] eine sogenannte speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) von Maschinen und Anlagen. Bereits wenige Jahre danach kam es zur Prägung des Begriffs „dritte Industrielle Revolution“. Eine Umkehrung der zeitlichen Abfolge zwischen Auslöser und Begrifflichkeit findet in der vierten Industriellen Revolution statt. Im Unterschied zu den vorherigen drei industriellen Revolutionen, entsteht hier das Gefühl, dass die Begriffsentstehung vor dem eigentlichen Auslöser der „Revolution“ stattgefunden hat. Dieser Unterschied ist im folgenden Bild verdeutlicht:

[3] (Wrede, 2014)
[4] (Wrede, 2014)

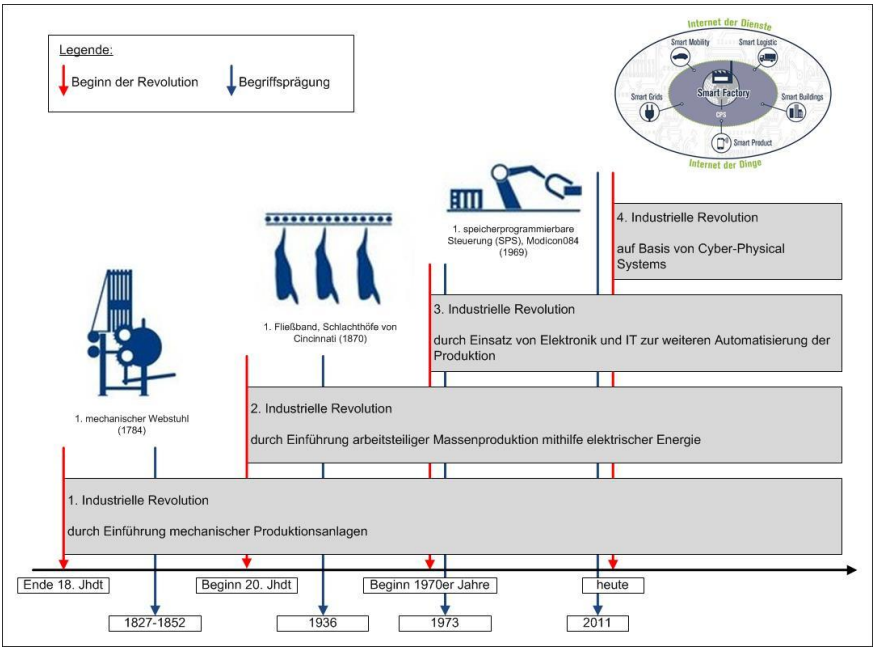


Abbildung 1: Auslöser und Begriffsprägung der Industriellen Revolution[5]

Wir wissen demnach heute schon, wie die Zukunft aussehen wird, welcher Nutzen daraus entsteht und welcher Weg bis dahin gegangen werden muss. Aus diesem Grund, soll jeder für sich darüber entscheiden, ob die Industrie 4.0 eine Revolution oder Evolution ist. Beide Sichtweisen haben einen gemeinsamen Nenner, es entstehen neue Herausforderungen die auf unterschiedlichen Wegen, mit verschiedenen Lösungen bearbeitet werden können. An dieser Stelle werden diese für das Zukunftsbild Industrie 4.0 aufgezeigt.

2 Wege und Lösungsbeispiele

Die Industrie 4.0 wird kurz gesagt, die physisch-reale Welt mit der virtuellen Welt verschmelzen und die sogenannten cyber-physischen Systeme (CPS)

[5] In Anlehnung an: (Wahlster, 2012)

entstehen lassen.[6] An dieser Stelle muss festgehalten werden, dass die Verknüpfung von realer und virtueller Welt im Virtuellen Entwicklungs- und Trainingscenter (VDTC) des Fraunhofer IFF bereits seit 2006 möglich ist und diese weiter vorangetrieben wird.[7] Vier unterschiedliche Arten der Verknüpfung beider unterschiedlichen Welten zeigen folgende Bilder:

Intuitive Mensch-Maschine Interaktion

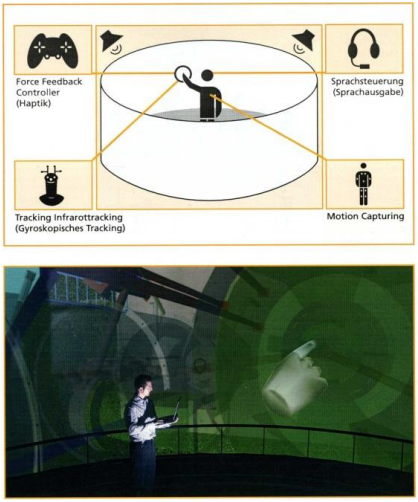


Abbildung 2: Mensch-Maschine Interaktion[8]

Mensch-Computer-Mensch Interaktion (verteilte Kooperation)

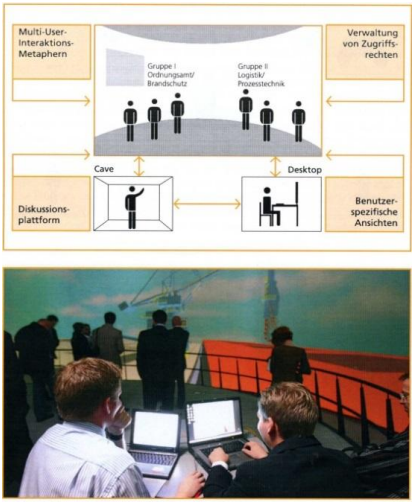


Abbildung 3: Mensch-Computer-Mensch Interaktion[9]

[6] (Anderl, 2014)

[7] (Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, 2006)

[8] (Schenk & Schumann, Interoperable Testumgebung für verteilte domänenübergreifende Anwendungen, 2008)

[9] (Schenk & Schumann, Interoperable Testumgebung für verteilte domänenübergreifende Anwendungen, 2008)

Mixed Reality

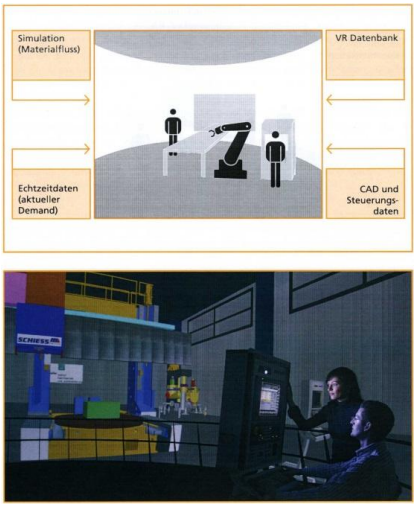


Abbildung 4: Mixed Reality[10]

Automated Mixed Reality

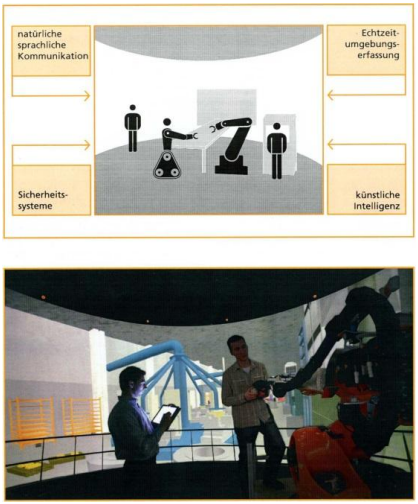


Abbildung 5: Automated Mixed Reality[11]

Wenn die Begrifflichkeit „Industrie 4.0“ von der Verknüpfung realer und virtueller Welten spricht, ist eine größer werdende, vernetzte Interaktion und Kommunikation zwischen den Maschinen, Produkten und Dienstleistungen gemeint. Der Mensch nimmt dabei eine andere Rolle ein, als es in den vier vorherigen Arten der Verknüpfung dargestellt ist. Dafür müssen die Objekte intelligent gemacht werden und miteinander kommunizieren, ohne dass der Mensch sich großartig einmischen muss. Dieses daraus resultierende „Internet der Dinge und Dienste“ verändert

[10] (Schenk & Schumann, Interoperable Testumgebung für verteilte domänenübergreifende Anwendungen, 2008)

[11] (Schenk & Schumann, Interoperable Testumgebung für verteilte domänenübergreifende Anwendungen, 2008)

dementsprechend nicht nur die Produktion sondern die gesamte Wertschöpfungskette inklusive Organisationsstruktur und Arbeitsweisen der Menschen. Welche Veränderungen im gesamten Netzwerk entstehen, sind in folgenden Thesen zusammengefasst[12]:

1. Die Digitalisierung von Produkten während ihrer Entwicklung, Erprobung, Produktion als auch Nutzung macht es möglich, auf dieser Basis, neue Funktionalitäten und Dienste zu generieren. Damit entsteht für Industriegüter ein **neues Nutzerverhalten** sowie für Konsumgüter ein **anderes Verbraucherverhalten**.

2. Der zunehmende digitale Charakter dieser Dienstleistungen führt zu **neuen Formen der dezentralen und direkten Vernetzung** aller Beteiligten.

3. Diese unterschiedlichen Ausprägungen der Vernetzung machen **neue Kommunikationsarten** notwendig und führen zu **neuen Kommunikationsformen und -techniken**.

4. Diese Vielfältigkeit der Kommunikationen ist nicht nur Resultat vorhandener Möglichkeiten und der jeweiligen Zweckmäßigkeit, sondern verlangt auch **geeignete und adäquate Infrastrukturen**.

5. Auf Basis erweiterter Infrastrukturen zur Kommunikation wird eine Online-Planung und Steuerung logistischer Prozesse möglich sein, sodass sich **neue Märkte und Dienstleistungen** um die Logistik erschließen.

Die in der ersten These beschriebene Digitalisierung soll intelligenter durchgeführt werden als bisher. Dafür notwendig ist eine digitale und intelligente Verknüpfung auf allen Ebenen, in allen Bereichen, zwischen

[12] (Schenk, Wege zur digitalen Logistik, 2014)

allen Akteuren und allen Sendern von Daten. Zur Folge hätte dies, dass für Industriegüter ein neues Nutzerverhalten sowie für Konsumgüter ein anderes Verbraucherverhalten entsteht bzw. möglich macht. Aufgrund der Transparenz würde möglicherweise ein Nutzer- bzw. Verbraucherverhalten eher in Richtung der Nachhaltigkeit gelenkt werden, weil jeder Konsument sein Verhalten mit anderen abgleichen könnte und so die Kunden positiv im Wettbewerb zueinander stehen könnten. Die smarte Vernetzung[13] ist in der nachfolgenden Abbildung erörtert:

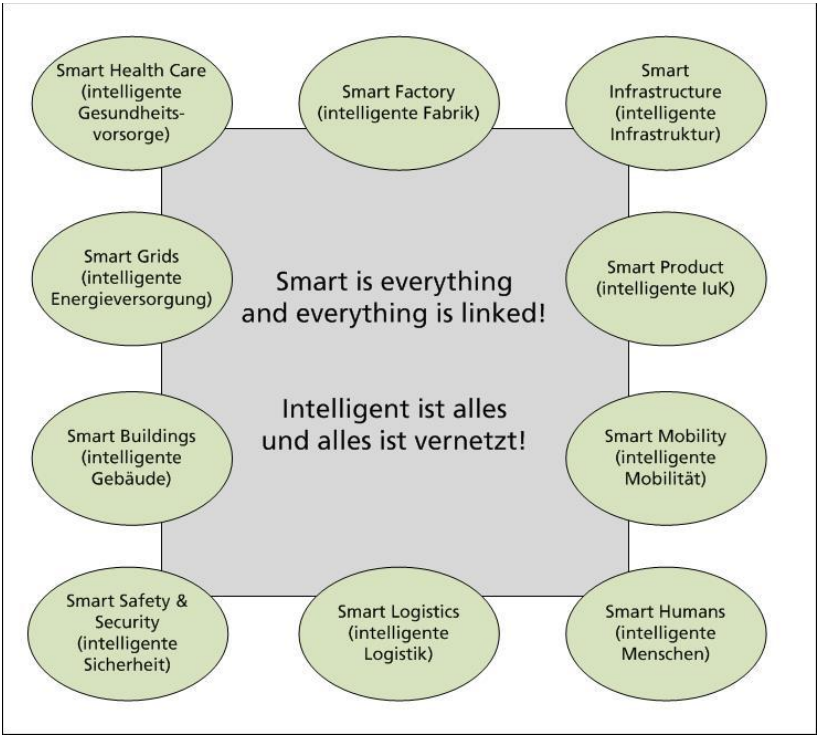


Abbildung 6: Smarte Vernetzung

[13] (Eßer, 2014)

Anhand des Demonstrationsbeispiels für Industriegüter wird durch die fortschreitende Digitalisierung in der Instandhaltung von Maschinen und Anlagen erst dann ein Ersatzteil benötigt, wenn durch die ständige digitale Zustandserfassung (Auslastungsgrad, Abnutzung von Teilkomponenten, Warnmeldungen etc.) ein Bedarf gemeldet wird. Durch das in der Cloud gesicherte Wissen über die benötigten Komponenten, kann dann recht einfach ein Ersatzteil durch eigenen 3D-Druck angefertigt werden. Ähnlich könnte es bei den Konsumgütern vonstattengehen. Am Beispiel der Kaffeeversorgung bei Meetings/Konferenzen kann dies recht simpel verdeutlicht werden. Wieder hilft dabei die ständige digitale Zustandserfassung. In einer Kaffeekanne können dadurch die Temperatur des Kaffees, der Füllstand in der Kanne und die Zeitspanne der Nutzung erfasst werden. Mit Hilfe der Informationen könnte die Kaffeekanne einen Befehl an die Kaffeemaschine senden, neuen Kaffee zu kochen und dadurch die logistischen Wege durch das betreuende Personal verringern.

In der zweiten These geht es vor allem um die neuen Formen der dezentralen und direkten Vernetzung. Diese neuen Formen besitzen vielfältige Ausprägungen (B2B, B2C, C2C, C2B, M2M, M2C, C2M, M2B und B2M). Die schon angesprochene Cloud spielt dabei eine wesentliche Rolle. Denn die dort gespeicherten Daten bzw. Informationen sind für jeden Nutzer von überall abfragbar. Dadurch können Prozesse intelligenter gestaltet werden, ein Abgleich von Informationen stattfinden, mit Hilfe des Abgleichs eine ständig aktuelle Anpassung von Vorgängen erfolgen und bedarfsgerecht Dinge automatisch angestoßen werden, ohne das der Mensch dabei eine Rolle spielen muss bzw. brauch. Das heißt auch für das Beispiel mit der Kaffeeversorgung, dass die Zustandserfassungen, die Rückmeldung in der Cloud und die darauf abgestimmte Disposition des Kaffees komplett ohne Personal erfolgen können. Das Personal ist letztlich nur für die Interaktion mit dem Kunden verantwortlich und erhält dadurch eine wesentliche Entlastung in seiner Arbeit.

These 3 behauptet, dass durch die unterschiedlichen Ausprägungen der Vernetzung neue Kommunikationsarten notwendig sind und diese zu neuen

Kommunikationsformen und -techniken führen. Neue Kommunikationsformen und -techniken sind zum Beispiel digitale Arbeitsanweisungen als Hinweis für den Mitarbeiter, virtuelle Arbeitsschritte beim Ersatzteilwechsel, automatische Defektmeldung und Ersatzteilbestellung sowie Menschen-Maschine-Kommunikation via Gesten. Dazu muss festgehalten werden, dass die Maschinen mittlerweile hören, sehen, sprechen, zum Teil auch fühlen können. Das heißt, die Maschinen werden immer sensibler und intelligenter. Daraus resultiert die Optimierung von Prozessen, die Erhöhung des Servicegrads und die Integration neuer Dienstleistungen.

Für die vierte These ist es wichtig, nicht nur vorhandene Infrastrukturen auszubauen oder zu verbessern, sondern neue geeignete und adäquate Infrastrukturen zu entwickeln um das neue Nutzerverhalten bzw. Verbraucherverhalten, die dezentrale und direkte Vernetzung sowie die neue Kommunikationstechniken ermöglichen zu können. Solche Infrastrukturen müssen in der Lage sein, logistische Objekte zu erfassen (1), diese zu orten (2), deren Zustandsüberwachung zu ermöglichen (3) und diese online, in Echtzeit auszuwerten (4). Der Ausbau eines schnellen Breitband-Netzes ist aus diesem Sinne unumgänglich. Als Beispiel ist hier die durchgehende Kommunikation in und zwischen Logistikräumen zu nennen. Ein Produkt, das per Luftfracht von einem Lagerort zum Zielort gebracht wird, kommuniziert innerhalb des Lagers, während des Umschlagens und des Fluges über die Cloud mit den zuständigen Systemen und kann dadurch Folgeprozesse automatisch auslösen. Da im Zuge von Industrie 4.0 eine fortschreitende Individualisierung und Flexibilisierung erzielt werden soll, hieße dass, eine unnötige Lagerung zu vermeiden, Prozesse besser zu koppeln, Wartezeiten von Arbeitern zu verhindern, mögliche Probleme nicht reaktiv sondern aktiv zu beseitigen und damit Fehlerquoten bzw. Ausfallquoten zu minimieren.

Die letzte hier genannte These, zeigt die Chancen die aus der Industrie 4.0 hervorgehen. Durch eine Online-Planung und -Steuerung der logistischen Prozesse und dem Austausch der Daten von Mitarbeitern, Maschinen und Bauteilen, entstehen neue wissensbasierte Dienstleistungen und damit

neue bzw. neuartige Jobs.[14] Welche neuen Jobs dabei entstehen, kann heute noch nicht vorausgesagt werden, aber aufgrund der Vernetzung über die Kommunikationstechnologien kann ein Eingriff mit Hilfe von Touchdisplays, Sprachsteuerung etc. unabhängig vom Ort, der Zeit und möglicherweise des Zustands eines Mitarbeiters erfolgen. Das heißt, der Mitarbeiter erlangt eine nie dagewesene Form der Selbstorganisation und Autonomie. Darüber hinaus kann ein Arbeiter aufgrund dieser Tatsache einen bisher körperlich sehr anstrengenden Beruf mit Hilfe des Einsatzes von Maschinen und der beiderseitigen Kommunikation, diesen länger ausüben und das Wissen somit weitertragen bzw. weitergeben.

3 Fazit und Ausblick

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass auf dem Weg zur Industrie 4.0 neue technische und organisatorische Innovationen entwickelt, neue Märkte und Dienstleistungen entlang des Wertschöpfungsnetzwerkes entstehen und ein Wertewandel in Richtung Nachhaltigkeit stattfinden müssen. Der europäische Weg sieht dabei eine Individualisierung bei hochkomplexen Produkten vor, um damit den Produktionsstandort in Europa zu sichern, zu festigen und auszubauen. [15] Als Ergebnis der Industrie 4.0 lassen sich eine stärkere Automatisierung in der Industrie, eine Entwicklung hoch intelligenter Monitoring- und Sensorikprozesse, autonome Entscheidungsprozesse der Maschinen, eine dezentrale Steuerung und Optimierung von Prozessen in Echtzeit, neue Geschäftsmodelle und Dienstleistungen prognostizieren.[16] Relativ schlecht vorherzusagen, ist die Akzeptanz bzw. der Umgang mit allem Neuen durch die Menschen. Die gewünschten Ergebnisse verändern die Arbeitsweise und die Anforderungen an den Menschen in ihren Tätigkeiten. Veränderungen

[14] (Plattform Industrie 4.0, 2014, S. 7)
[15] (Anderl, 2014)
[16] (Arbeitskreis Industrie 4.0, 2013)

die wiederum eine Anpassung zum Beispiel in der Bildung bzw. Ausbildung der Menschen bedürfen. Ein weiterer Aspekt, aufgrund der Individualisierung bei hochkomplexen Produkten, könnte die Rückkehr einiger Produktionsstandorte nach Deutschland bzw. Europa sein, um wieder näher am Kunden und den Entwicklern zu sein.

Zum Abschluss soll daran appelliert werden, nicht alles von vornherein planen zu wollen, gewisse Dinge einfach auf sich zukommen zu lassen und in manchen Momenten auf das „Improvisationstalent“ zu vertrauen. In gewisser Weise soll Industrie 4.0 genauso wie jedes langfristiges Projekt sein und Platz für positive Überraschungen lassen.

Literatur

Anderl, R. (24. Juni 2014). Industrie 4.0 - Revolution oder Evolution? 17. Wissenschaftstage Magdeburg.

Arbeitskreis Industrie 4.0. (2013). Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 - Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern. Abschlussbericht, acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.

Bundesministerium für Bildung und Forschung. Industrie 4.0 - Informationstechnologie für die vierte industrielle Revolution. Abgerufen am 1. Juli 2014 von Zukunftsbild "Industrie 4.0": http://www.bmbf.de/pubRD/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_0.pdf

Die Bundesregierung. Ideen Innovation Wachstum - Die Hightech-Strategie für Deutschland. Abgerufen am 1. Juli 2014 von Industrie 4.0: http://www.hightech-strategie.de/de/59.php

Eßer, G. (24. Juni 2014). Digitale Fabrik 4.0. 17. Wissenschaftstage Magdeburg.

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF. (2006). Festschrift anlässlich der feierlichen Eröfnnung des Virtual Development and Training Centre VDTC des Fraunhofer-Instituts für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF. Magdeburg.

Plattform Industrie 4.0. (2014). Plattform Industrie 4.0. Abgerufen am 8. Juli 2014 von Startseite: http://www.plattform-i40.de/

Plattform Industrie 4.0. (3. April 2014). Plattform Industrie 4.0. Abgerufen am 1. Juli 2014 von Whitepaper: Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf dem Weg zu Industrie 4.0: http://www.plattform-i40.de/sites/default/files/Whitepaper_Forschung%20Stand%203.%20April%202014.pdf

Schenk, M. (2014). Wege zur digitalen Logistik. 30. Logistik Dialog 2014: Logistik total digital Erfolg durch Vernetzung, (S. 86-87). Wien.

Schenk, M. (Hrsg., 2009), Digital Engineering. Herausforderung für die Arbeits- und Betriebsorganisation, Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V.

Schenk, M. / Schumann, M. (2008). Interoperable Testumgebung für verteilte domänenübergreifende Anwendungen. Technologiegetriebene Veränderungen der Arbeitswelt, S. 155-169.

Wahlster, W. (11. Mai 2012). CLOUDZONE Messe Karlsruhe. Abgerufen am 3. Juli 2014 von Industrie 4.0: Mit dem semantischen Web der Dinge in die vierte industrielle Revolution: http://www.cloudzone-karlsruhe.de/messe-karlsruhe-cloudzone/2012/media/Keynote-Wahlster-Trendkongress-Mai-2012~1.pdf

Wrede, I. (8. April 2014). DW Deutsche Welle. Abgerufen am 4. Juli 2014 von Die Industrie der Zukunft wird smart: http://dw.de/p/1Bd8r

Der Einfluss von Cyber-Physical Systems auf die Gestaltung von Produktionssystemen

Norbert Gronau

1 Abstract

Der Beitrag beschreibt die Wirkung von Cyber-Physical Systems auf Produktionssysteme. Ein Produktionssystem ist ein komplexes sozio-technisches System von Leistungseinheiten (Neumann et al. 2011), das Input in wertschöpfenden und assoziierten Prozessen zu Output transformiert (Heinen et al. 2010; Billaut et al. 2008). Dabei wirken Organisation, Ressourcen, Menschen und Methoden mit der Aufgabe der Outputgenerierung zusammen (Habicht et al. 2002). Der Aufbau und die Steuerung der Prozesse stellen eine durch Ablauf- und Aufbauorganisation definierte Aufeinanderfolge von Transformationen dar (Eversheim 1996), welche sowohl die Herstellung als auch die Montage von Hilfsstoffen umfasst (Bellgran und Säfsten 2010, S. 45). Dabei enthalten Produktionssysteme technische, organisatorische und personelle Elementen (in Anlehnung an Kreimeier 2013, S. 18-22).

Der Einsatz von Cyber-Physical Systems in Produktionssystemen kann zu einer deutlich höheren Anpassungsfähigkeit führen. Fertigungsanlagen können nun selbst auf Veränderungen im Markt und in der Lieferkette reagieren, Produkte nach kundenindividuellen Vorgaben können rascher hergestellt und angepasst werden; auch auf Anlagen, die nicht speziell für die kundenindividuelle Produktion ausgelegt sind.

Der Ablauf kann über ein Netzwerk kooperierender adaptiver Produktionseinheiten optimiert werden, um dem Zielpolylemma der Produktion aus Durchlaufzeit, Beständen, Auslastung und Kosten besser gerecht zu werden. Schließlich kann das Arbeitssystem an den Wandel der menschlichen Arbeitskraft, etwa aufgrund demographischer Faktoren, angepasst werden.

Der Beitrag beschreibt insgesamt sieben Wirkungen von Cyber-Physical Systems auf Produktionssysteme, darunter den Einfluss auf die Wandlungsfä-

higkeit, die Nutzung der dann deutlich umfangreicheren verfügbaren Fertigungsdaten sowie die Dehierarchisierung von Planung und Steuerung.

Abschließend wird ein Forschungsansatz vorgestellt, mit dem die Wirkung von Cyber-Physical Systems auf Produktionssysteme anhand einer Laborsituation erforscht werden kann.

Der Beitrag endet mit einer Beschreibung des weiteren Forschungsbedarfs.

2 Produktionssysteme und Cyber-Physical Systems

Produktionssysteme bestehen aus technischen, menschlichen und organisationalen Komponenten (Abb. 1).

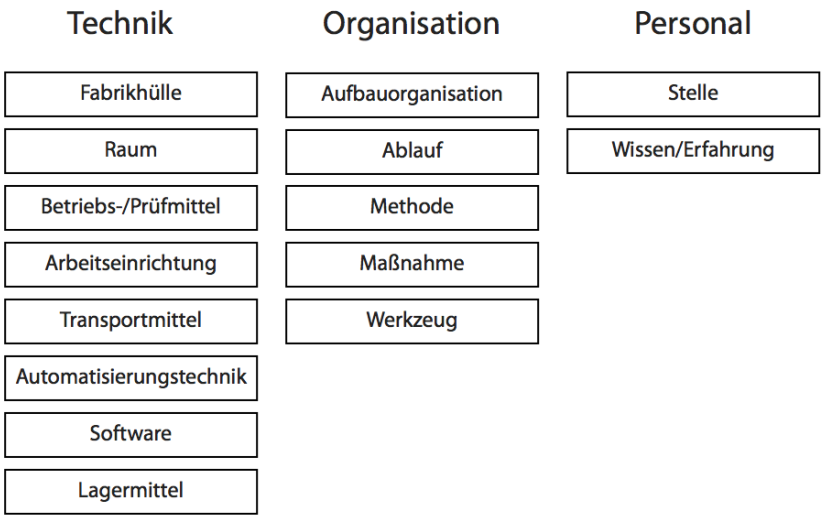


Abb. 1: Komponenten von Produktionssystemen (i.A.a. Kreimeier 2013, S. 18)

Zu den technischen Elementen gehört nicht nur die Fabrikhülle und der Raum, den das Produktionssystem einnimmt, sondern auch die Betriebsmittel und die eingesetzten Informations- und Automatisierungssysteme. Organisationale Komponenten sind neben Methoden, Maßnahmen und Werkzeugen vor allem die Aufbauorganisation (Hierarchie) und die Organisation

des Ablaufs (Prozesse). Zu den menschlichen Elementen gehören die dessen Einsatz beschreibende Stelle sowie das Wissen und die Erfahrung des Stelleninhabers.

Daher sind bei der Betrachtung der Wirkung von Cyber-physischen Systemen stets alle drei Dimensionen von Elementen zu berücksichtigen. Eine rein technisch orientierte Betrachtung wird der Problemlage nicht vollständig gerecht und kann u.U. zu Fehlschlüssen führen, weil Nebeneffekte auf Organisation und Mensch nicht betrachtet und beachtet wurden.

Cyber-Physical Systems (CPS) als eingebettete softwareintensive Systeme in Produkten und Komponenten der Hochtechnologie sind mittels digitaler Netze verbunden. Damit wird es möglich, weltweit verfügbare Daten und Dienste global zu nutzen. Cyber-physische Systeme verfügen über multimodale Mensch-Maschine-Schnittstellen. RFID wird z.B. genutzt, um Transportvorgänge zu überwachen. Ehemals geschlossene Systeme öffnen sich und sind mit anderen Systemen zu vernetzten Anwendungen verbunden. Die physikalische reale Welt wird durch diese Systeme nahtlos mit der Welt der IT zu einem Internet der Dinge, Dienste und Daten verknüpft. Dabei erfassen Sensoren physikalische Daten und wirken mittels Aktoren auf physikalische Vorgänge ein (vgl. ten Hompel 2005, S. 16; Veigt 2013, S. 16). Auf der Basis der gespeicherten und ausgewerteten Daten agieren die Cyber-Physical Systems mit der physikalischen Welt.

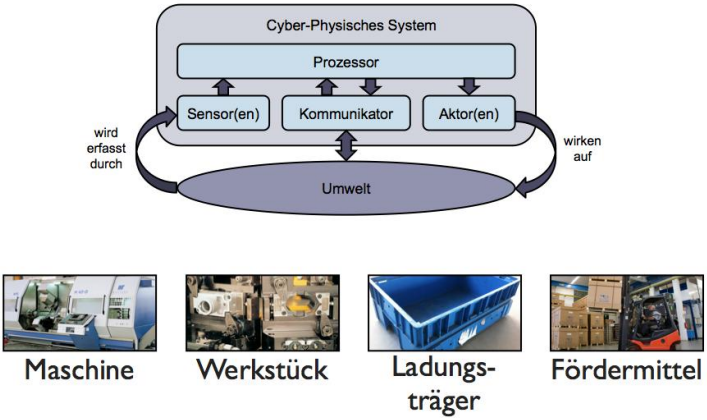


Abb. 2: Aufbau eines cyber-physischen Systems und beispielhafte Träger (vgl. ten Hompel 2005, S. 16; Veigt 2013, S. 16)

Wesentliche Wirkungen des Einsatzes von CPS liegen in der globalen Vernetzung von Anlagen und Werken unterschiedlicher Betreiber, in neuen Formen der Ablaufoptimierung sowie in einer gesteigerten Anpassungsfähigkeit an Veränderungen im Markt und in der Lieferkette (vgl. acatech 2011, S. 14).

Globale Vernetzung

CPS machen Objekte weltweit lokalisierbar und ermöglichen eine nahezu durchgängige Positionserfassung und Zustandsabfrage in Echtzeit. Mit Hilfe dieser Technologien kann z.B. wirkungsvoll das Einschleusen von Plagiaten und Duplikaten in die Medikamente-, Rohstoff- oder Ersatzteilversorgung verhindert werden. Die durch die globale Vernetzung mögliche Anlagenkoordination kann z.B. für ein übergreifendes Produktionsmanagement oder eine übergreifende Lagerplanung genutzt werden (etwa durch Umrouten von Fertigungs- oder Nachfüllaufträgen zur Laufzeit) oder zur besseren Ausnutzung von unterschiedlichen Energiepreisen durch Einplanung von Aufträgen oder Teilmengen dort, wo gerade die niedrigsten Energiekosten zu finden sind. Anzustrebende Zielkriterien der globalen Vernetzung können neben der Energiekostenoptimierung auch die Schaffung einer

gleichmäßigen Auslastung oder die Schaffung höherer mengenmäßigen Flexibilität weltweiter Produktionsverbunde.

Ablaufoptimierung

Die mit CPS ausgestatteten Elemente des Produktionssystems kennen ihre Einsatzgebiete, Konfigurationsmöglichkeiten und Rahmenbedingungen und kommunizieren eigenständig und drahtlos miteinander (vgl. acatech 2011, S. 23). Diese Fähigkeiten können dazu führen, dass die Montageaufträge selbständig fehlendes Material melden können und den Nachschub auch selbst organisieren können. In Wartung befindliche Anlagenelemente teilen selbst mit, wann sie neue Aufträge annehmen können. Neue Aufträge können sich durch Kombination von virtuellen und realen Komponenten selbst am Produktionssystem anmelden, ihre benötigten Ressourcen disponieren, Fertigungsaufträge einsteuern und Störungen teilweise selbst beheben, etwa durch Fortsetzung des Arbeitsplans an einer nicht von der Störung betroffenen Ressource.

Anpassungsfähigkeit

Bereits im Abschnitt Ablaufoptimierung wurde deutlich, dass die mit CPS ausgestatteten Elemente des Produktionssystems mit Fähigkeiten zur zumindest partiellen Selbstorganisation ausgestattet sind. Diese Fähigkeiten helfen Fertigungsanlagen, auf Veränderungen im Markt (z.B. der Nachfrage) und der Lieferkette (bei drohendem Abriss des Nachschubs) zu reagieren.

Eine weitere Fähigkeit liegt in der beschleunigten Herstellbarkeit von Produkten nach kundenindividuellen Vorgaben, da die individuellen Produkteigenschaften dem Produkt und seinen Baugruppen mitgegeben werden können, ohne dass die Komplexität zentraler Entwurfs- und Planungsverfahren weiter steigt. Produkteigenschaften, Kosten, Logistik, Sicherheit, Zuverlässigkeit, Zeitbedarf und Nachhaltigkeit des Produktes können nunmehr, unabhängig von Restriktionen zur Entwurfszeit, auch noch zur Laufzeit an kundenindividuelle Bedarfe angepasst werden.

Damit ist jetzt greifbar nahe gerückt, was die Anbieter von Lösungen zur Produktionsplanung und -steuerung immer versprochen haben: Diese Fä-

higkeiten können auch werksübergreifend zur Koordination eines Netzwerks von mit adaptiven Eigenschaften ausgerüsteten Produktionseinheiten ausgenutzt werden.

Schließlich ist es möglich, das Arbeitssystem individuell an die menschliche Arbeitskraft anzupassen, sei es durch Veränderung der Kräfte, Zeiten, Bedienungsoberflächen oder Kommunikation mit dem Bediener.

3 Wirkungen von CPS auf Produktionssysteme

Aufgrund der oben beschriebenen Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten für CPS zeichnen sich die in Abb. 3 aufgeführten Wirkungen von CPS auf Produktionssysteme ab. Diese Wirkungen umfassen alle drei Dimensionen von Produktionssystemen und können sich teilweise gegenseitig verstärken.

Wandlungsfähigkeit wird insbesondere durch Selbstkonfiguration, Selbstwartung und Selbstorganisation erreicht; da CPS die Elemente von Produktionssystemen zu Self-X-Funktionen befähigen, tragen sie unzweifelhaft zu einer höheren Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen bei.

Die globale Vernetzung und die Möglichkeit der Kommunikation auch zwischen Produkten und Fertigungseinrichtungen erhöht die Möglichkeit von Rückkopplungen und deren Auswertung bzw. Nutzung für die zukünftige Gestaltung von Produkten und Fertigungseinrichtungen (Abb. 3).

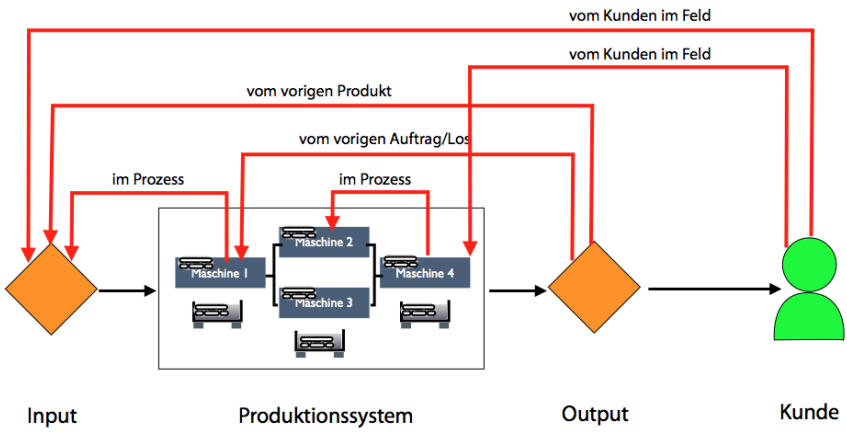


Abb. 3: Mögliche Rückkopplungen durch CPS

So können z.B. Lebensdauerinformationen aus dem Feld zur Neujustierung von Eingriffsgrenzen an Produktionseinrichtungen genutzt werden. Ebenso kann eine Veränderung von Kundenpräferenzen für eine äußerst schnelle Umstellung von Variantenkonfigurationen genutzt werden. Bereits jetzt nutzen amerikanische Automobilhersteller Auswertungen von Social Media-Plattformen, um die meist nachgefragten Farbkombinationen zu ermitteln und übertragen diese Information direkt in die Auslastungsplanung der Lackiererei. All diese Rückkopplungen sind auf direktem Wege möglich, ohne über Hierarchien von Informationssystemen zu gehen. Gegenwärtig existieren oberhalb der SPS-Ebene keine Möglichkeiten zur Verarbeitung dieser Informationen. Um die Trennung von Build-Time und Run-Time aufheben zu können und damit die Fertigung zu entdiskretisieren und zu entserialisieren (durch stärkere Individualisierung) werden Fähigkeiten zum Umgang mit diesen Informationen benötigt, die auch zeitverzögert eintreffen können.

Das oben angeführte Beispiel kann auch zur Illustration einer anderen Wirkung von CPS in Produktionssystemen dienen: Erstmals stehen schnell ausreichend granulare Ist-Informationen über den Zustand und Aufenthaltsort jedes einzelnen Elements eines Produktionssystems zur Verfügung. Daten, die bisher nur gespeichert wurden, um die Anforderung der Traceability zu

erfüllen, können jetzt, kombiniert mit anderen internen und externen Daten, ausgewertet werden (Abb. 4).

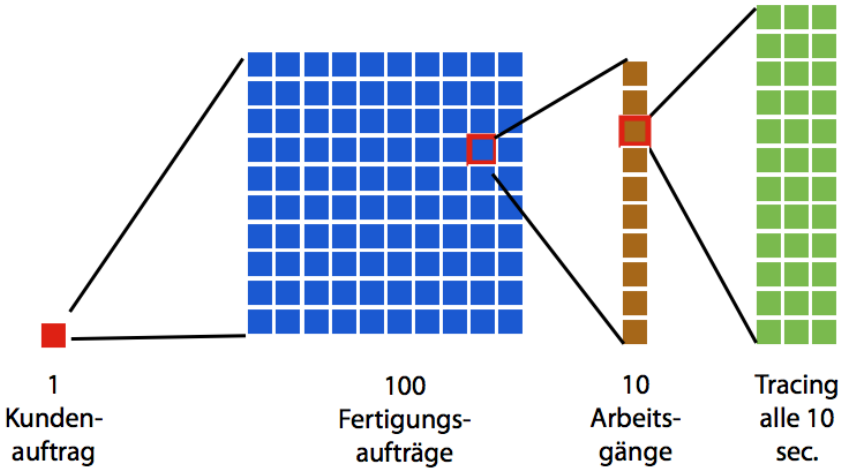


Abb. 4: Wachstum der Datenmengen durch CPS

Abb. 4 zeigt, wie aus einem Kundenauftrag im Umfang von ca. 50kByte durch Auflösung in Fertigungsaufträge, deren Arbeitsgänge und ein Tracing der Arbeitsgänge bereits ca. 1 GB Daten erzeugt werden - darin ist die Kommunikation zwischen CPS noch nicht enthalten! In diesen Daten stecken wertvolle Informationen, deren Auswertung nun möglich wird.

Diese neuen Möglichkeiten der Auswertung von Fertigungsdaten zum Zweck der Simulation, Optimierung, Vorhersage werden als Manufacturing Analytics bezeichnet.

Die Individualisierung der Produkte lässt sich auf die Individualisierung der Fertigungsabläufe übertragen. Keineswegs mehr ist es selbstverständlich, dass zwei gleiche Produkte auch den gleichen Weg durch die Fertigung nehmen.

Der zunehmende Grad an Selbstorganisation führt dazu, dass klassische zentrale und hierarchische Ansätze der Planung und Steuerung des Produktionssystems stark an Bedeutung verlieren (Abb. 5).

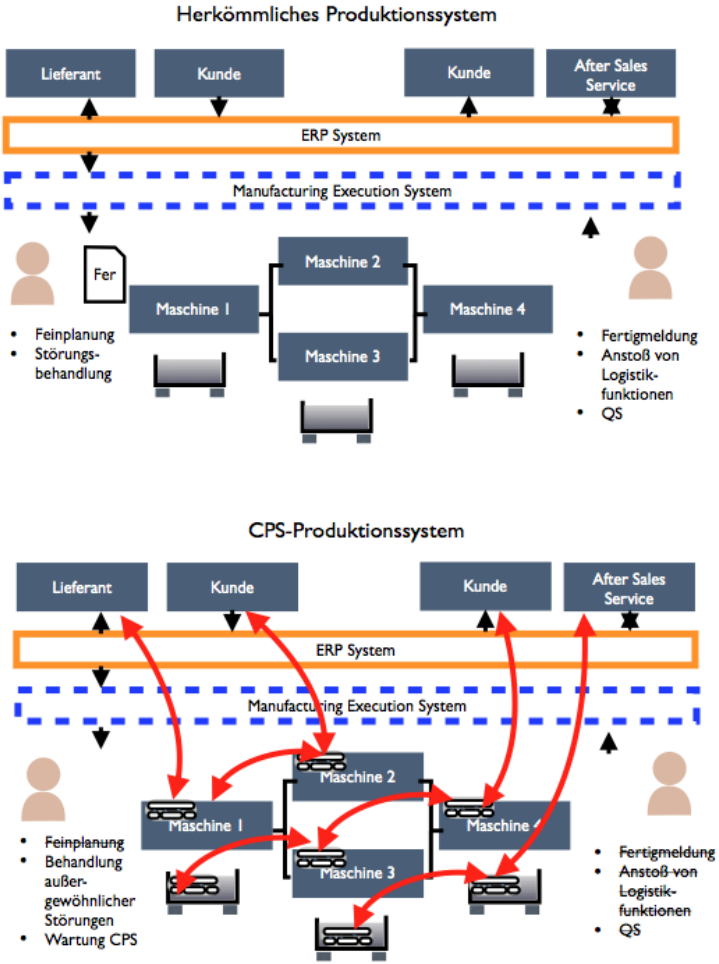


Abb. 5: Hierarchische Produktionsplanung und CPS

Viele Unternehmen nutzen nur ein ERP-System zur Planung und ansatzweisen Steuerung der Fertigung. Jeder Fertigungsauftrag durchläuft papierbasiert die Fabrik; die Aufgaben der Feinplanung und Störungsbehebung werden durch Menschen erledigt. Durch Einsatz von CPS ändert sich das Bild. Die Aufgaben der in der Produktion tätigen Menschen ändert sich umfassend in Richtung auf Wartung der CPS und Behebung außerordentlicher Störungen. Für die Einführung von CPS sind existierende Informationssysteme eine echte Barriere, da sie mit der Individualität und Mobilität des neuen Produktionssystems nicht mithalten können. So ist es in einigen Systemen nicht einmal möglich, den Standort der Maschine zu speichern. Das System würde daher auch eine Verlagerung einer Maschine nicht bemerken.

Nach Ansicht des Autors liegt hier einer der tatsächlich revolutionären Auswirkungen der Einführung von CPS in Produktionssystemen. Wenn wesentlich bessere Reaktionsmöglichkeiten zur Laufzeit bestehen, verliert die vorherige Planung des Fertigungsdurchlaufs stark an Bedeutung. Wenn mehr Elemente sich untereinander autonom koordinieren, verlieren zentrale Planungssysteme ebenfalls erheblich an Bedeutung. Die Konsequenzen dieser Entwicklung können jetzt noch gar nicht in vollem Umfang eingeschätzt werden. Grundsätzlich erscheint es jedoch denkbar, dass einige bisher als zentral und wesentlich geltende Prinzipien der Gestaltung von Produktionssystemen nicht mehr gelten oder sogar in ihr Gegenteil verkehrt werden.

Der Einsatz von CPS erhöht die Komplexität von Produktionssystemen erheblich. Sowohl Beschreibung von Zustandsräumen als auch von Steuerungsmechanismen werden erheblich aufwendiger, wenn nicht gar unmöglich. Störungen durch Ausfall einzelner Komponenten zeigen zwar weniger Wirkung als der Ausfall zentraler Komponenten, jedoch die Suche nach Fehlern und deren Behebung wird aufwendiger und erheblich besser geschultes Personal ist zu dieser Störungsbehebung erforderlich, da im wahrsten Sinne des Wortes alles mit allem auf der mechanischen, elektronischen oder Software-Ebene zusammenhängt.

Schließlich birgt der umfassendere IT-Einsatz global vernetzter Komponenten erheblich höhere Sicherheitsrisiken mit sich. Bisherige Lösungen für Sicherheitsprobleme, die im wesentlichen in einer Kanalisierung von Zugriffsrouten bestehen, sind für CPS ungeeignet. Vielmehr muss der Mensch in seiner ambivalenten Rolle als von der Technik Bedrohter und als Sicherheitsrisiko stärker betrachtet werden.

Wie können diese Herausforderungen zielführend und effizient erforscht werden?

Um Handlungsempfehlungen für die Praxis geben zu können, ist der Wandel von klassischen Produktionssystemen hin zu cyber-physischen Produktionssystemen (CPPS) sorgfältig und effizient zu erforschen. Eine Erprobung am realen Objekt, also der laufenden Produktion scheidet wegen der Nebenwirkungen vollständig aus. An eine Laborumgebung zur Erforschung cyber-physischer Produktionssysteme sind daher mindestens folgende Anforderungen zu stellen:

- Es muss der Vielfalt existierender Ausprägungen von Produktionssystemen angemessen gegenübergetreten werden. Daher scheiden Ansätze, die von vielen herkömmlichen Modellfabriken vertreten werden, aber nur ein Produkt herstellen können oder nur einen Leistungs- oder Organisationstyp der Fertigung abbilden können, aus. Sie sind zur Erforschung der im vorigen Kapitel dargestellten Wechselwirkungen zwischen technischen, organisatorischen und humanen Elementen des Produktionssystems durch Einsatz cyber-physischer Systeme ungeeignet.

- Um praxisrelevante Antworten auf Fragen wie den „richtigen“ Grad an Autonomie finden zu können, ist eine schnelle Anpassbarkeit an neue Entwicklungen bei den Komponenten cyber-physischer Systeme notwendig, also ein modularer Aufbau.

- Schließlich muss die in vielen Unternehmen bereits vorhandene Landschaft an Informationssystemen (z.B. ERP, PPS, CAQ, BDE, MES...) als reale Rahmenbedingung integriert werden können, denn kein Unternehmen wird CPS einführen und dabei gleichzeitig eine komplette Neuentwicklung

der IT-Landschaft vornehmen. Der Autor geht vielmehr davon aus, dass die bestmögliche Integration von CPS in vorhandene Informationssysteme eine wesentliche Forschungsfrage darstellt.

- Insbesondere um die Rolle des Menschen in der cyber-physischen Produktion zu erforschen, ist eine Laborumgebung erforderlich, die einem realen Produktionssystem ähnelt.

4 Forschungsansatz

Um die oben skizzierten Anforderungen an ein Forschungslabor für die Erforschung der Auswirkungen cyber-physischer Systeme auf Produktionssysteme zu bewältigen, wurde ein systemorientierter Ansatz gewählt. Dabei sollten reale und virtuelle Elemente vertreten sein. Maßgebend für die Entscheidung, ob es sich um ein reales oder ein virtuelles Element handeln soll, war die Erfüllbarkeit der oben skizzierten Anforderungen. In einer ersten Annäherung wurde festgelegt, als reale Element des CPPS die CPS-Komponenten selbst, die IT-Infrastruktur wie Steuerungen und Informationssysteme sowie die Logistikausrüstung, mit der verschiedene Arbeitsstationen verbunden werden, zu realisieren.

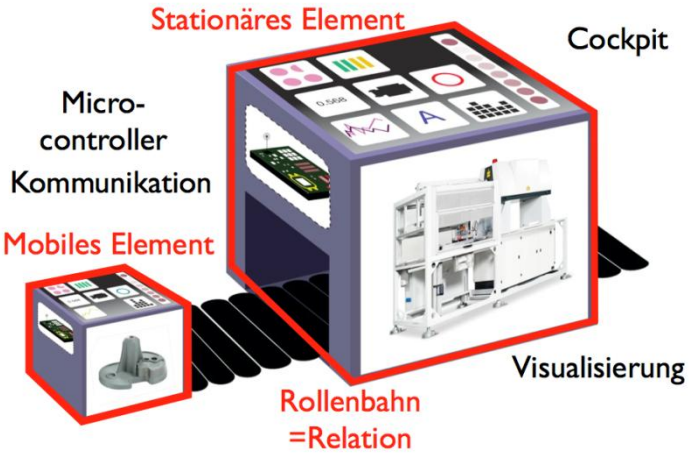
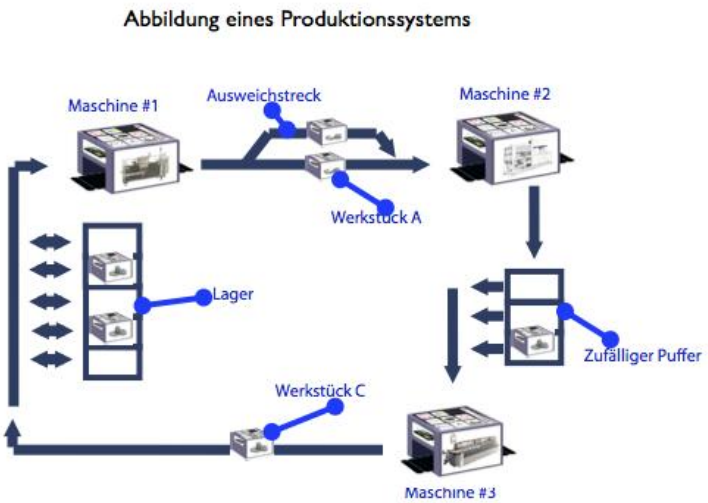


Abb. 6: Relationen, stationäre und mobile Elemente des Labors für CPPS

Als virtuelle Elemente hingegen wurden Maschinen und Werkstücke („Cubes“), Aufträge und Störungen realisiert (Abb. 6).

Um reale und virtuelle Elemente miteinander zu verbinden, war die Entwicklung einer Simulationsbetriebsumgebung erforderlich. Diese Eigenentwicklung differenziert in eine Modellierungsumgebung, die das jeweilige Modell des Produktionssystems administriert („rote Ebene“) und die eigentliche Betriebsumgebung, in der das simulierte Produktionssystem unter Einbeziehung von Störungen seiner bestimmungsgemäßen Aufgabe nachgeht („grüne Ebene“). Dieses Konzept ermöglicht einen sehr schnellen Wechsel zwischen verschiedenen Szenarien, Fertigungsabläufen und Autonomiegraden, um dann durch Vergleich verschiedener Varianten hinsichtlich Kennzahlen die Reaktionsgeschwindigkeit oder Durchlaufzeit Vorteilhaftigkeitsüberlegungen anstellen zu können.

Die Abbildung unterschiedlicher Abläufe gelingt durch Vorhaltung von logistischen Elementen zur Repräsentation wie Puffer, Verzweigung und Synchronisation oder Schleifen. Abb. 7 zeigt, wie die selbe Infrastruktur sowohl für innerbetriebliche Untersuchungen (oben) als auch für zwischenbetriebliche Fragestellungen (unten) eingesetzt werden kann.



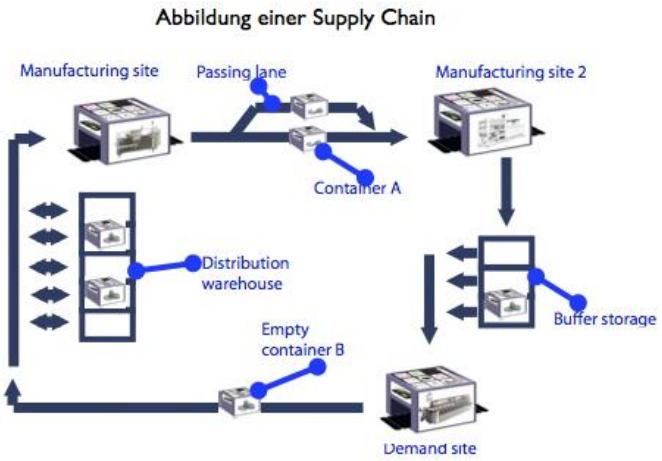


Abb. 7: Untersuchung inner- und zwischenbetrieblicher Fragestellungen

Da ein Realisierungskriterium des Labors die Wandlungsfähigkeit war, sind die einzelnen Elemente mobil und interoperabel und können schnell zu neuen Layouts zusammengesetzt werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Labor für CPPS wurde eine Infrastruktur geschaffen, mit der u.a. folgende Forschungsfragen gegenwärtig bearbeitet werden:

- Durch welche cyber-physischen Komponenten werden reale Prozessketten wandlungsfähig?
- Wie können existierende Produktionssysteme effizient zu CPPS?
- Wie kann die Koordination des Produktionssystems mit den während der Produktion entstehenden Daten(mengen) optimiert werden?
- Wie müssen sozio-mechatronische Systeme gestaltet werden, um u.a. einer Überforderung des Menschen in der Fabrik zu begegnen?
- Welcher Grad an Autonomie der Elemente von Produktionssystemen eignet sich für welche Anforderungen durch Prozesse und Produkte?
- Wie kann ein Notbetrieb von CPS-Komponenten bzw. ein Wiederanlauf nach Ausfall kritischer Komponenten erfolgen?
- Wie werden bioanaloge Produktionssysteme adäquat abgebildet?

Insbesondere die letzte Forschungsfrage führt zu weiteren spannenden Implikationen. Da Selbstreplikation ein biologisches Konzept darstellt, liegt es nahe, CPPS mit generativen Fertigungsverfahren zu koppeln. Die sich daraus ergebenden Möglichkeiten zur Veränderung der Produktion sind erheblich.

Literatur

acatech (Hrsg.): Cyber-Physical Systems. Innovationsmotor für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion (acatech POSITION) Heidelberg u.a. Springer Verlag 2011

Bartle, R.: Designing Virtual Worlds. New Riders, Indianapolis 2004, S. 154–158

Bellgran, M. / Säfsten, K. (2010): Production Development: Design and Operations of Production Systems. Springer London.

Billaut, J.-C. / Moukrim, A. / Sanlaville, E. (2008): Introduction to Flexibility and Robustness in Scheduling. In: Billaut, J.-C.; Moukrim, A.; Sanlaville, E. (Hrsg.): Flexibility and Robustness in Scheduling. ISTE Ltd. London. S. 15-34.

Eversheim, W. (1996): Produktionstechnik und -verfahren. In: Kern, W. et al. (Hrsg): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft (HWProd). 2. Auflage Stuttgart, Schäffer-Poeschel.

Gram, M. / Gugg, C.: Einsatzmöglichkeiten von Cyber-Physical Systems im Lebenszyklusmanagement von Anlagen. Industrie Management 29 (2013) 1, S. 39-43

Gronau, N. / Theuer, H. / Lass, S.: Evaluation of Production Processes using Hybrid Simulation. In: K. Windt (ed.), Robust Manufacturing Control, Lecture Notes in Production Engineering, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

Gronau, N.: Wandlungsfähigkeit in Produktion und Logistik. Productivity Management 19 (2014), Heft 2, S. 23-26

Habicht, C. / Neise, P. / Cisek, R. (2002): Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme. ZWF, 97:441–445.

Heinen, T. / Rimpau, C. / Wörn, A. (2010): Wandlungsfähigkeit als Ziel der Produktionssystemgestaltung. In: Nyhuis et al. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme: Heute die Industrie von morgen gestalten. GITO-Verlag. Berlin.

Kreimeier, D. et al.: Konfiguration modularer Produktionssysteme. Industrie Management 29. Jg. 2013, Ausgabe 4, S. 18-22

Lass, S. / Gronau, N.: Efficient Analysis of Production Processes with a Hybrid Simulation Environment. In: Proceeding of the 22nd International Conference of Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM 2012), Helsinki, Finnland.

Lass, S. / Theuer, H. / Gronau, N.: A New Approach for Simulation and Modeling of Autonomous Production Processes. In: Proceedings of the 45th Hawaii International Conference on System Sciences (HICCS 2012), Maui, Hawaii, pp. 1247-1256.

Meißner, J. et al.: Cyberphysische Produktionssysteme. Productivity Management 18 (2013) 1, S. 21-24

Neumann, M. / Constantinescu, C. / Westkämper, E. (2011): A Method for Multi-Scale Modeling of Production Systems. In: ElMaraghy, H.A. (Hrsg): Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability. Proceedings of th 4th

International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual production (CARV2011), Montreal, Canada 2-5 October 2011. Springer. S. 471-475.

Veigt, M. et al.: Entwicklung eines Cyber-Physischen Logistiksystems. Industrie Management 29 (2013) 1, S. 15-18

ten Hompel, M. / Liekenbrock, D.: Autonome Objekte und selbst organisierende Systeme. Anwendung neuer Steuerungsmethoden in der Intralogistik, Industrie Management 4/2005, S. 15-18

Augmented Reality zur kundenintegrierten Variantenplanung

Fedor Titov, Axel Friedewald, Hermann Lödding

1 Einleitung

Die Fortschritte in den Informationstechnologien ermöglichen es, den Kunden in die Wertschöpfungsprozesse der Industrie zu integrieren und hochwertige Dienstleistungen zu entwickeln, die an die Produktion gekoppelt sind. Die Anstrengungen im Industrie 4.0-Programm sollen u. a. diese Verschmelzung vorantreiben und eine weitgehende Individualisierung der Produkte ermöglichen. Die deutsche maritime Industrie entwickelt und konstruiert im Wesentlichen kundenspezifische Produkte und kann daher besonders von den Zielen dieses Zukunftsprojekts profitieren.

Die internationale Schifffahrt muss im Zuge neuer Umweltvorschriften strengere Emissionsrichtlinien erfüllen, die von einem Großteil der bestehenden Schiffe nicht eingehalten werden können. Die Industrie bietet daher Abgasreinigungstechniken an, die auf bestehenden Schiffen nachgerüstet werden können. Die verfügbaren Technologien unterscheiden sich in der Funktionsweise und in der Größe der Komponenten. Diese können häufig nicht in der vorhandenen Struktur untergebracht werden, sondern erfordern zusätzlichen Raum und damit einen Umbau des Schiffs. Dies beeinträchtigt die Eigenschaften des Schiffs: Gewichtszunahme, Reduzierung der Ladekapazität oder markante Aufbauten sind typische Probleme. Zudem erfordert der Einbau häufig umfangreiche Nachrüst- oder Umbauarbeiten. Die Planung solcher Maßnahmen übernimmt meist ein Generalauftragnehmer, der mit dem Reeder häufig anhand von 2D-Zeichnungen kommuniziert. Durch den Umfang der Arbeiten, die Größe der Komponenten und die Anzahl der verschiedenen Möglichkeiten sind solche Zeichnungen für die Variantenplanung nur wenig geeignet. Um Kundenwünsche in der Entwicklung berücksichtigen zu können, ist die Variantenplanung bereits in einer frühen Prozessphase erforderlich. Es wird daher

eine Lösung benötigt, die es erlaubt, den Reeder möglichst früh in den Entscheidungsprozess einzubinden und die Varianten mit ihren Vor- und Nachteilen am Produkt darstellen und diskutieren zu können.

Eine direkte Darstellung von Veränderungen an einem Objekt ermöglicht die Augmented-Reality-Technologie. Auf einem Schiff können damit digitale Informationen, wie bspw. das 3D-Modell einer Abgasnachbehandlungsanlage, dem Benutzer vor Ort visualisiert werden.

Dieser Beitrag stellt ein Augmented-Reality-System zur kundenintegrierten Variantenplanung von großvolumigen Produkten vor. Das entwickelte System visualisiert die nachzurüstenden Komponenten einer Abgasnachbehandlungsanlage am realen Schiff. Um eine taugliche Konfiguration zu entwickeln, kann der Anwender mit dem System interagieren und z. B. Komponenten hinzufügen und verschieben. Dabei wird die Zulässigkeit der Lösung automatisch überprüft. Der Reeder kann dadurch bereits in einem frühen Projektstadium die Varianten mitbestimmen und mitgestalten. Die ausgewählten Varianten fließen in den weiteren Konstruktions- und Planungsprozess ein. Mit steigendem Informationsgehalt im Projekt verbessert sich die Genauigkeit des Systems und liefert dadurch eine immer genauere Basis für die anschließende Feinplanung. Der Einsatz kostengünstiger Hardware und eine benutzerfreundliche Gestaltung des Systems erhöhen seine Akzeptanz beim Kunden und dessen Verständnis für die technische Problemstellung. Die vorgestellte Lösung erlaubt einen durchgehenden Einsatz im Projekt von der Initialisierung bis hin zum Umbau.

2 Nachrüsten von Schiffen

Die Weltschifffahrtsorganisation International Maritime Organization (IMO) regelt in der Richtlinie MARPOL Annex VI die zulässigen Emissionen der weltweiten Schifffahrt (IMO, 2005). Die stufenweise Absenkung über mehrere Jahre soll die Schadstoffbelastung in der Atmosphäre weltweit reduzieren (s. Abbildung 1). Zusätzlich hat die IMO mit den sog. Emission Control Areas (ECA) Bereiche mit verschärften Richtwerten definiert. Die

ECAs umfassen vor allem Küstenregionen und einige viel befahrene Gewässer, wie bspw. die Nord- und Ostsee.

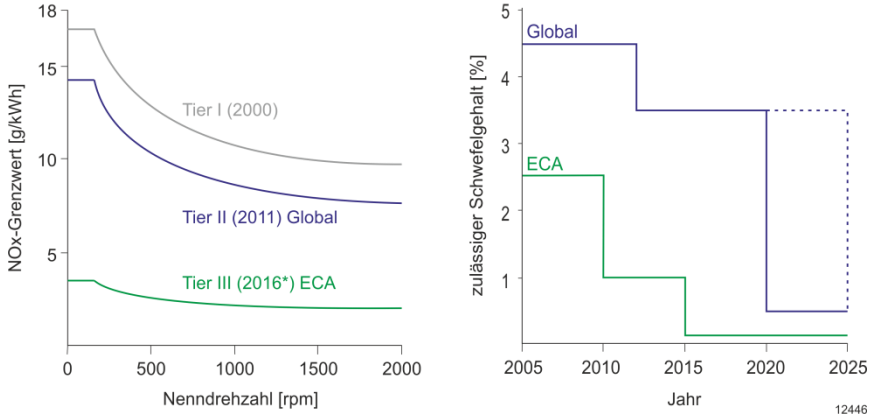


Abbildung 1: Zulässige Emissionen des weltweiten Schiffsverkehrs nach IMO

Die Grenzwerte sind zwar bereits festgelegt, die Reeder diskutieren allerdings mit der IMO über eine Verschiebung der Startzeitpunkte. Die Nichteinhaltung der Richtwerte führt zu hohen Strafen und damit zu hohen Einbußen für die Reeder.

2.1 Abgasreinigung

Es existieren unterschiedliche Technologien, um die vorgegebenen Emissionsrichtwerte einzuhalten:

- Einsatz von schwefelarmen Kraftstoff
- Umbau auf gasbetriebene Antriebe (Liquified Natural Gas – LNG)
- Reduzierung der NOx-Emissionen durch bspw. Selective Catalytic Reduction (SCR)
- Reduzierung der SOx-Emissionen durch Scrubber-Technologie

Der Einsatz von schwefelarmen Kraftstoff ist eine sofort verfügbare, auf Dauer aber unwirtschaftliche Lösung, weil die Tonne Kraftstoff etwa 50%

mehr als normaler Schiffsdiesel kostet. Ein Umbau der Schiffe auf gasbetriebene oder hybride Antriebe setzt häufig einen Wechsel des gesamten Motors voraus. Zusätzlich vergrößert sich das Volumen des Kraftstoffs um etwa 80%. Dadurch verkürzt sich entweder die Reichweite oder weitere Tanks müssen zur Verfügung gestellt werden.

Die Selective Catalytic Reduction (SCR) verringert den Ausstoß an Schwefeloxiden durch Einspritzen von Harnstoff über Keramikwaben in das Abgas. Die dafür benötigten Umbauten finden hauptsächlich am Abgasschacht statt, erfordern allerdings ebenfalls weitere Tanks, die auf dem Schiff untergebracht werden müssen.

Die Scrubber-Technologie verringert den Ausstoß an Stickoxiden durch Waschen des Abgases. Dabei wird das Abgas durch ein Granulat gefiltert. Neben aufwendigen Umbauten am Abgasstrang benötigt diese Technologie sehr große Tanks für das frische und das gebrauchte Granulat. Sie erfordern häufig einen Umbau des Schiffs und verringern seine Ladekapazität.

Verschiedene Studien haben die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Verfahren untersucht (Walter und Wagner, 2012). Wichtigster Einflussfaktor auf die Wirtschaftlichkeit eines Umbaus ist die Betriebszeit in den ECAs. Viele Feederschiffe und Fähren verkehren ausschließlich in solchen Zonen. Für deren Betreiber ist eine Nachrüstung in den kommenden Jahren erforderlich. Alle verfügbaren Technologien erfordern größere Umbauten der Schiffe, die Ladevolumen, Struktur und Schwimmlage beeinträchtigen können. Die Einschränkungen für kleine Schiffe sind dabei besonders groß.

2.2 Nachrüstprozess

Es ist aus verschiedenen Gründen erforderlich, den Nachrüstprozess detailliert zu planen:

Die Komponenten der Abgasnachbehandlungsanlagen unterscheiden sich von Schiff zu Schiff, ihre Fertigung dauert mehrere Monate und die Nachrüstung ist mit den Dockzeiten des Schiffs zu koordinieren, um die Ausfallzeiten zu minimieren. Dabei ist die Terminierung ein wichtiger Aspekt: die

von der IMO ausgegebenen Grenzwerte sinken in den kommenden Jahren und die durchschnittliche Durchlaufzeit von Nachrüstprozessen beträgt momentan sechs bis zwölf Monate (Loumansuu, 2011). Entsprechend ist eine sorgfältige Planung der Arbeitsschritte erforderlich. Dazu zählt die Vorbereitung des Angebots. Dafür beauftragt der Reeder häufig einen Dienstleister oder den Motoren-Zulieferer, im Weiteren Generalauftragnehmer genannt. Abbildung 2 zeigt die Phasen des Angebotserstellungsprozesses (Friedewald, Titov, Halata und Lödding, 2013).

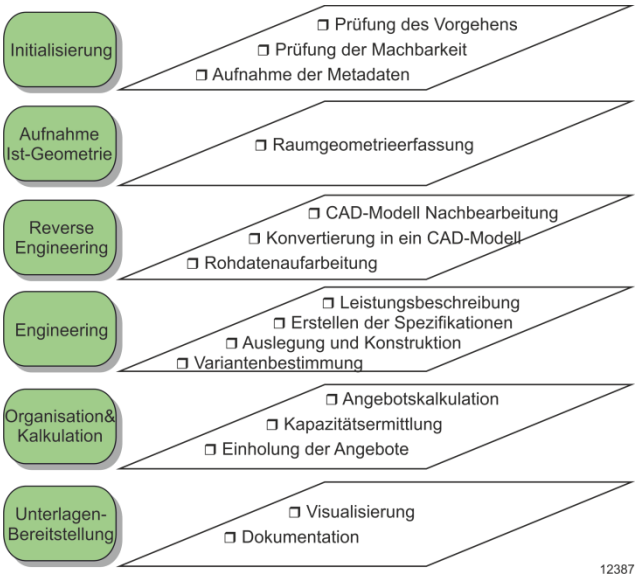


Abbildung 2: Angebotserstellungsprozess für die Nachrüstung von Schiffen

Eine Besonderheit des Schiffbaus sind die unterschiedlichen Produktzustände über den Lebenszyklus. Es wird zwischen den Zuständen as-designed, as-built und as-is unterschieden. Da häufig keine detaillierten Informationen über den As-Is-Zustand vorhanden sind, ist eine Aufnahme der Geometrie erforderlich. Den hier dargestellten Prozess führt der Generalauftragnehmer durch. Der Kunde ist dabei Ansprechpartner, nimmt an dem Prozess jedoch nicht aktiv teil.

2.3 Herausforderungen

Die Nachrüstung von Schiffen zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte ist wie oben beschrieben eine anspruchsvolle Aufgabe. Die Auswirkungen der in der Regel gravierenden Umbaumaßnahmen auf den Betrieb des Schiffs erfordern eine intensive Diskussion mit dem Kunden. Heute wird in der maritimen Industrie die Planung neuer Komponenten häufig mit Hilfe des 2D-Generalplans durchgeführt. Dieser ist aus mehreren Aspekten ungeeignet:

- Die Pläne stellen den As-Designed-Zustand des Schiffs dar und bilden nicht den aktuellen Zustand ab.
- Die angestrebten Umbaumaßnahmen und das Ausmaß der Komponenten in der richtigen Größe zur Umgebung sind im 2D-Plan nicht übersichtlich darstellbar.
- Die Gegenüberstellung alternativer Varianten ist an einem Plan nicht durchführbar.
- Das direkte Visualisieren der Kundenideen ist nicht möglich.

Um diese Probleme zu lösen wird eine 3D-Visualisierung mit intuitiver Bedienung benötigt. Dies zu ermöglichen stellt im Schiffbau eine besondere Herausforderung dar, da zum einen die Datengrundlage zu dieser Zeit nicht ausreichend ist und zum anderen die Prozesse lange vor dem eigentlichen Umbau stattfinden.

3 Kundenintegrierte Variantenplanung

3.1 Zielsetzung

Die vier Hauptziele für die oben beschriebenen Probleme sind:

- Integration des Kunden in den Entscheidungsprozess
- Visualisierung der Maßnahmen
- Planung von Varianten

- Integration der entwickelten Methoden in den Angebotserstellungsprozess (Abbildung 2)

Die Augmented-Reality-Technologie (AR) bietet prinzipiell das Potenzial, diese Ziele zu erfüllen. Besonders vielversprechend erscheint dabei die Darstellung von 3D-Informationen direkt am Objekt (Heinig, Friedewald und Löddding, 2012) die wiederum den Einsatz als Diskussionsplattform ermöglicht (Tönnis, 2008).

3.2 Modellierung des Systems

Augmented Reality ermöglicht es, Zusatzinformationen wie Geometrie- und Metainformationen in eine reale Umgebung einzublenden. Abbildung 3 stellt die Funktionsweise eines AR-Systems dar. Das AR-System generiert eine graphische Ausgabe über ein Anzeige-Medium, bspw. einen Tablet-Computer oder eine AR-Brille. Diese Ausgabe basiert auf verschiedenen Informationen. Das können neben CAD-Modellen einfache Darstellungen (bspw. Fotos) oder Textinhalte sein. Eine korrekte Positionierung dieser Informationen erfolgt über eine Bestimmung der Position und Orientierung des Systems in der Umgebung – dem Tracking. Zusätzlich stehen dem Bediener unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung, um mit dem System zu interagieren.

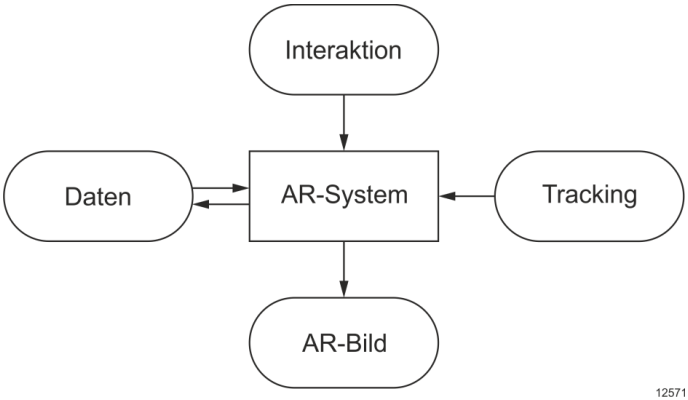


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines AR-Systems

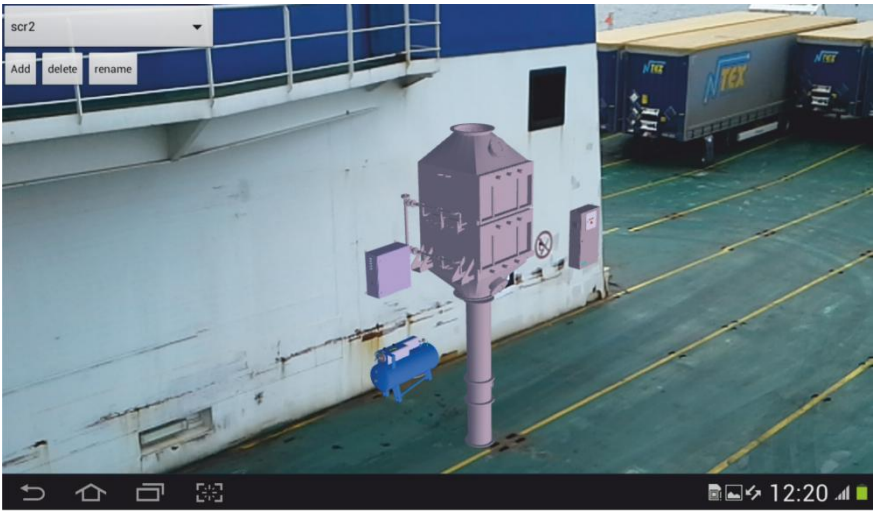
Für den Einsatz in der maritimen Industrie wurde ein Augmented-Reality-System entwickelt, das die in Abschnitt 3.1 beschriebenen Ziele erfüllt. Als Hardware wurden dafür Tablet-Computer ausgewählt. Diese ermöglichen eine gleichzeitige Nutzung durch mehrere Personen und erlauben eine ausreichend genaue Interaktion. Bauernhansl beschreibt weitere Vorteile wie vielfältige Schnittstellen, hohe Rechenleistung, geringes Gewicht von Tablet-Computern für einen industriellen Einsatz als AR-Hardware (Bauernhansl, ten Hompel und Vogel-Heuser, 2014).

Als Software wurde für das AR-System eine Applikation entwickelt. Diese kombiniert die in Abbildung 3 dargestellten Komponenten. Die Applikation besteht aus zwei aufeinander aufbauenden Teilen: der Angebotsvisualisierung und der Variantenplanung.

Angebotsvisualisierung

Die Angebotsvisualisierung dient der Darstellung von Komponenten am Objekt. Bereits in einer frühen Phase des Prozesses kann der Generalauftragnehmer dem Kunden die benötigten Systeme direkt am Schiff visualisieren. Ist bspw. eine Selective Catalytic Reduction (SCR) angefragt, stellt die Applikation die Komponenten im Abgasschacht dar und liefert dem Kunden einen ersten Eindruck. Abbildung 4 stellt ein Visualisierungsbeispiel dar.

Das Tracking erfolgt dabei über die eingebaute Kamera des Tablet-Computers. Das System kann unterschiedliche Arten des Trackings verarbeiten. Für die Angebotsvisualisierung wurde markerbasiertes Tracking gewählt (Färber, 2006). Der Generalauftragnehmer stellt die Modelle der Komponenten zur Verfügung. Der Benutzer vor Ort kann den Marker verschieben, um die Position der Bauteile zu ändern. Zusätzlich kann er weitere Geometriedaten in die Szene laden oder Komponenten ersetzen. Um unterschiedliche Trackingkonfigurationen, unterschiedliche Marker und Markergrößen, an Bord nutzen zu können wurde ein Trackingbaukasten erstellt. Dieser erlaubt es, Marker in Abhängigkeit von der benötigten Entfernung und den Platzverhältnissen in der Anwendung zu definieren. Die Verwendung mehrerer



12573

Abbildung 4: Angebotsvisualisierung mit AR

Marker erlaubt es, die Bauteile flexibel anzuordnen. Dadurch können einzelne Bauteile vom System an einem anderen Ort visualisiert werden, wie bspw. der elektrische Schaltschrank (im Bild rechts).

Die eingeblendeten Objekte in dem Beispiel sind geometrisch korrekt dargestellt (Position, Orientierung, Dimension), allerdings scheinbar nicht richtig platziert, da keine 3D-Umgebungsinformationen vorliegen. Dadurch entsteht der Eindruck, dass die Komponenten aus Abbildung 4 außen an der Stahlstruktur befestigt sind und nicht wie vorgesehen im Abgasschacht verlaufen. Zudem scheint das Rohr auf dem Deck zu stehen. Dieser Einschränkung steht der Vorteil der sofortigen Verfügbarkeit der Visualisierung gegenüber, was für die fachliche Diskussion mit dem Kunden meistens ausreicht.

Variantenplanung

Für die Variantenplanung besteht die Möglichkeit, mit den Komponenten zu interagieren und unterschiedliche Szenarien darzustellen und vor Ort zu verändern. Abbildung 5 stellt die Erweiterungen für das Tracking, die Daten

und die Interaktion schematisch dar. Diese sind im Folgenden näher erläutert.

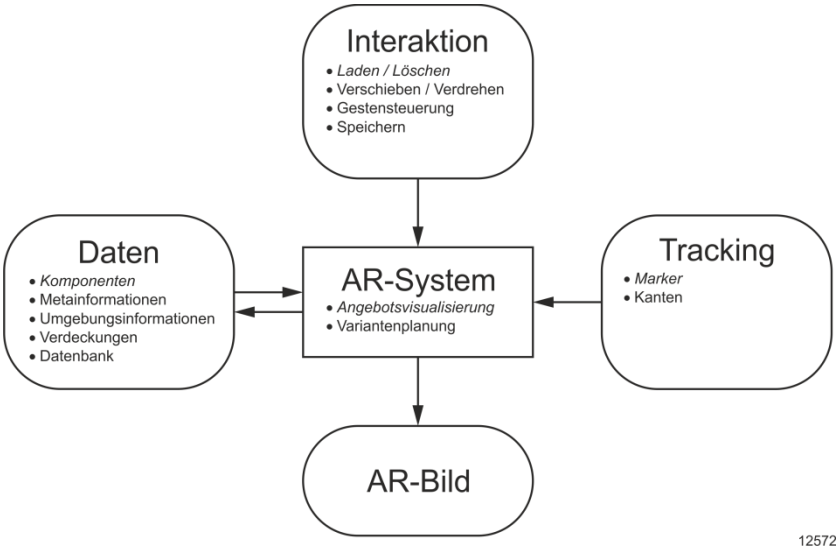


Abbildung 5: Erweiterung der Angebotsvisualisierung zur Variantenplanung

Das *Tracking* erfolgt markerbasiert oder markerlos über Kantentracking (Choi und Christensen, 2010). Das System orientiert sich beim Kantentracking an der Struktur des Objektes (Abbildung 6a und Abbildung 6c). Dafür muss ein Modell der Umgebung dem System vorliegen. Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben ist dafür in der maritimen Industrie häufig eine Aufnahme der Geometrie notwendig. Diese Informationen nutzt das System für zwei Funktionen: um die Komponenten an der Umgebung korrekt auszurichten und um die Komponenten ggf. durch vorhandene Störgeometrien zu verdecken. Besonders letzteres ist für das intuitive Verständnis des Kunden sehr entscheidend. Es entsteht der Eindruck, das Objekt würde an dem Rohr entlang unter die Plattform verlaufen (vgl. Abbildung 6b und Abbildung 6d).

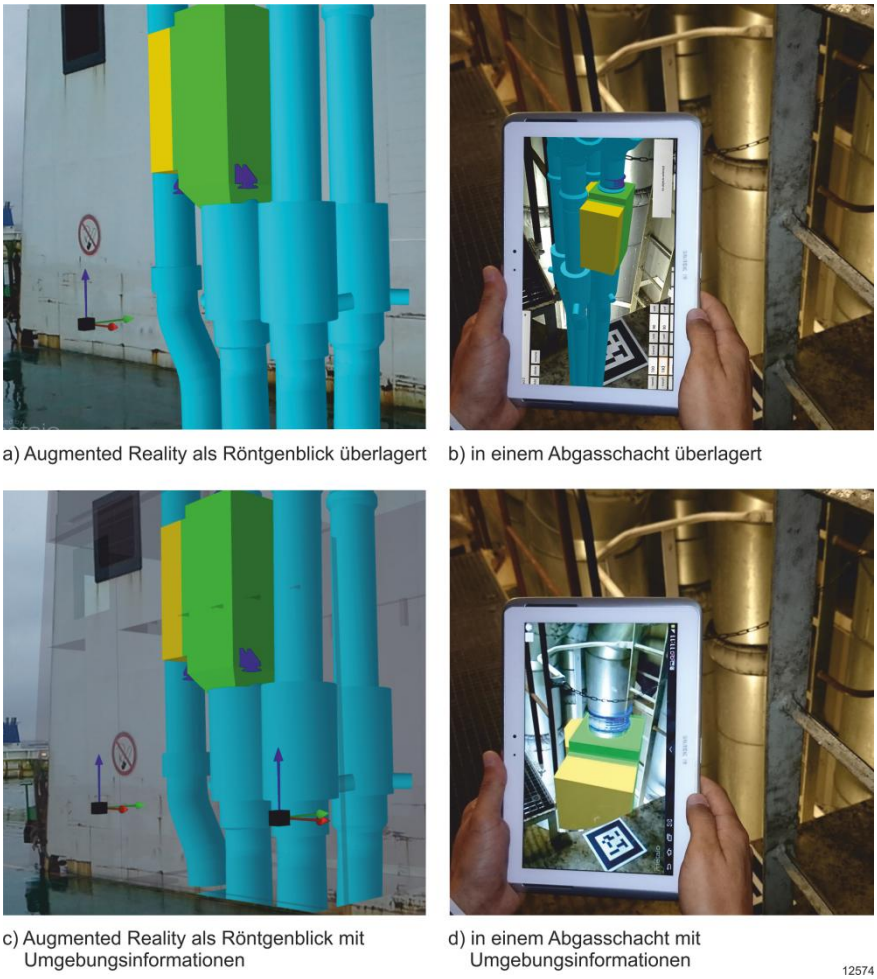


Abbildung 6: Variantenplanung mit AR

Die *Daten* liefern die Grundlage für die Besprechung. Die Darstellung der Szenen erfordert eine sorgfältige Vorbereitung, so muss der Bediener z. B. für das Kantentracking die Modelle der bestehenden und neuen Geometrien vorher korrekt anordnen. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zur reinen Angebotsvisualisierung. Die Darstellungen sind wesentlich präziser,

können allerdings erst ab einem bestimmten Projektstatus eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 3.4).

Zusätzlich zur Geometrie stellt das System dem Nutzer Metainformation zur Verfügung. Neben der Flussrichtung von Fluiden oder den Abmaßen können das benötigte Einbau- und Wartungsräume sein. Wie erste Praxisuntersuchungen gezeigt haben, sind besonders letztere bei der Diskussion mit dem Kunden hilfreich.

Interaktionsfunktionen dienen der Unterstützung der Planung und Modifizierung. Neben einfachem Laden und Löschen von Bauteilen stellt die Applikation dem Benutzer Möglichkeiten zur Verfügung, die Komponenten zu manipulieren. Dafür wurde eine Gestensteuerung implementiert, die ein Verschieben und Verdrehen der Bauteile erlaubt. Diese wurde nach einem Ansatz von Liu angepasst und erweitert (Liu, Au, Fu und Tai, 2012). Zunächst wählt der Benutzer die Bauteile aus einer Liste aus. Er kann hierbei ein Bauteil oder ein Verbund mehrerer Bauteile gleichzeitig manipulieren. Es stehen alle drei Achsen zur Verfügung. Die Manipulation erfolgt jeweils über eine ausgewählte Achse (s. Abbildung 7), um die unbeabsichtigte Translation oder Rotation zu vermeiden. Die Translation wird durch Wischen mit zwei Fingern in die gleiche Richtung aktiviert, die Rotation durch Wischen im Uhrzeiger- oder gegen den Uhrzeigersinn.

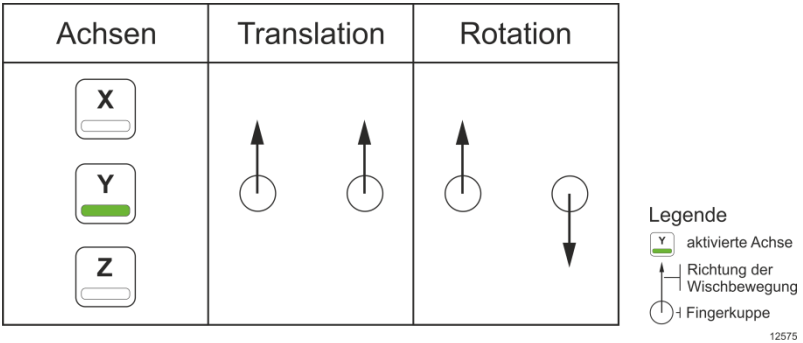


Abbildung 7: Gestensteuerung der Variantenplanung

Der Nutzer kann die Schrittweite für die Translation und für die Rotation in einem Menü frei wählen. Für schiffbauliche Fragestellungen haben sich dabei Werte von 100mm für die Translation und 45° für die Rotation bewährt. Um ein zufälliges Skalieren von Bauteilen zu verhindern, wurden Gesten für die Skalierung bewusst nicht implementiert.

Um Varianten zu speichern und wieder zu laden stehen im System zwei Möglichkeiten zur Verfügung.

1. Bauteilanordnung: Die Applikation speichert die Objektkoordinaten und die Ausrichtung aller Teile einer Szene mit ihren Eigenschaften (bspw. Sichtbarkeit) – die Layoutvarianten.

2. Konfiguration: Eine Konfiguration kann mehrere Layouts enthalten. Zusätzlich sind die Trackinginformationen gespeichert, das entsprechende Kantenmodell oder der verwendete Marker. Mit verschiedenen Konfigurationen lassen sich einem Kunden unterschiedliche Varianten einer Abgasnachbehandlungsanlage und unterschiedliche Abgasnachbehandlungsanlagen am Schiff darstellen. Bei der Komplexität der Anlagen ist das ein wichtiges Kriterium. Die Varianten werden standardisiert in einem neutralen Format gespeichert und sind nachträglich vom Generalauftragnehmer weiter bearbeitbar, bspw. direkt im CAD-Programm oder in Excel.

Die Erweiterungen der Variantenplanung gegenüber der Angebotsvisualisierung sind nur mit einer besseren Datengrundlage nutzbar. Neben der vorhandenen Ist-Geometrie ist eine erste Planung der Komponenten auf dem Schiff notwendig. Die Manipulation durch Gesten ist zwar in einem sehr frühen Angebotsstadium einsetzbar, hat sich in der Praxis allerdings als nicht notwendig erwiesen: Das Verschieben des Markers ist häufig die einfachere Änderungsmöglichkeit.

3.3 Kundenintegration

Abschnitt 2.3 zeigt die Notwendigkeit auf, den Kunden mit in die Planung einzubeziehen. Weil Abgasnachbehandlungsanlagen häufig einen Umbau des Schiffs erfordern, sollte der Kunde den geplanten Umbau und die damit

verbundenen Probleme (bspw. Nutzlastreduzierung) verstehen. Das hier entwickelte System stellt eine Plattform dar, die es erlaubt, mögliche Systeme bereits in einer frühen Planungsphase zu visualisieren und den Kunden so in die Variantenplanung zu integrieren.

Das System wurde für eine Benutzung durch mehrere Personen entwickelt. Dabei bedient eine Person die Software, die für eine intuitive Handhabung ausgelegt ist. Die Erfahrungen im Praxistest zeigen, dass auch Nutzer mit geringen Vorkenntnissen das System handhaben können.

Der Einsatz von Augmented Reality erlaubt die Betrachtung der Situation aus mehreren Blickwinkeln. Die Betrachter haben die Möglichkeit, um die Komponenten herumzugehen oder diese aus näherer oder weiterer Perspektive zu betrachten. Neben der reinen Darstellung der Komponenten an dem richtigen Platz ist die Visualisierung als sog. Röntgenblick möglich (s. Abbildung 6a). Der Kunde kann dabei die Auswirkungen ganzheitlich betrachten. Dies steigert das Verständnis für die Problemstellung.

Für den Schiffsumbau sind die Interessen unterschiedlicher Kunden zu berücksichtigen. Besonders wichtig sind der Reeder (als Auftraggeber), der Kapitän (als Verantwortlicher für das Schiff) und der erste Offizier (als technischer Verantwortlicher). Diese Personengruppen haben häufig unterschiedliche Anforderungen an die Systeme und können diese mit der hier entwickelten Applikation einfließen lassen.

Bei der eigentlichen Variantenplanung kann der Generalauftragnehmer auf die unterschiedlichen Personengruppen individuell eingehen. Bspw. kann er Wartungsräume des SCR oder die Zugänglichkeit zu den Granulattanks eines Scrubbers dem ersten Offizier darstellen. Daran lassen sich benötigte Freiflächen direkt planen.

3.4 Prozessintegration

Ein Ziel der hier vorliegenden Arbeit ist es, den Kunden in die Entscheidungsprozesse zu integrieren. Üblicherweise ist der Kunde hauptsächlich in der Initialisierungsphase eingebunden und legt nur seine Anforderungen an

die Lösung offen. Mit dem vorgestellten AR-System ist es nun möglich, den Kunden in mehreren Phasen einzubinden. Dafür wurde der in Abschnitt 2.2 vorgestellte Prozess erweitert. Abbildung 8 stellt den modifizierten Prozess dar.

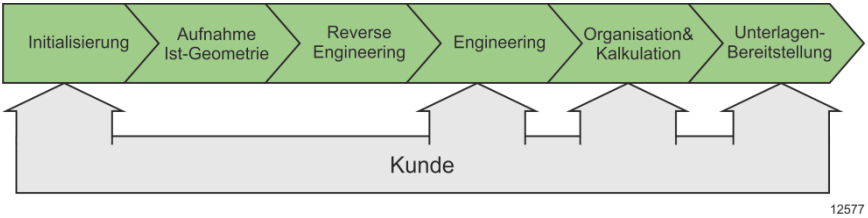


Abbildung 8: Angebotserstellung mit Kundenintegration

1) Initialisierung:

Der Generalauftragnehmer stellt dem Kunden mögliche Abgasreinigungssysteme direkt am Schiff dar. Die technologischen Vor- und Nachteile der Systeme sind in der Regel bekannt und daher liegt der Fokus für eine Entscheidung vor allem beim Platz- bzw. Umbaubedarf. Die an dieser Stelle eingesetzten Modelle stammen aus Katalogen des Zulieferers und erfordern keine weiteren Aufbereitungen.

2) Engineering:

Nach der genauen Analyse des Schiffs und der Aufnahme der vorhandenen Geometrie entstehen im eigentlichen Engineering verschiedene Layoutvarianten, die der Generalauftragnehmer mit Hilfe des entwickelten AR-Systems gemeinsam mit dem Kunden besprechen. Dabei ermöglicht das System ein direktes Modifizieren der Varianten und das Erstellen neuer Varianten. Noch bevor der Kunde einen Vertrag unterschreibt bekommt er die Möglichkeit den Umbau mitzugestalten. Für den Zulieferer sind das sehr wertvolle Informationen. Sie können spätere Probleme, wie bspw. eine eingeschränkte Zugänglichkeit oder hinderliche Strukturen, reduzieren oder sogar vermeiden.

3) Visualisierung:

Am Ende des Prozesses erlaubt das AR-System eine visuelle Aufbereitung des Angebots. Der Kunde sieht, was er kauft. Die gewonnene Transparenz trägt zur Akzeptanz der Beteiligten bei.

Die hier dargestellte Integration des Kunden in den Gesamtprozess erhöht nach Einschätzung des an der Entwicklung beteiligten Zulieferers die Wahrscheinlichkeit, den Nachrüstungsauftrag zu erhalten. Tabelle 1 stellt zusammengefasst die Änderungen durch den Einsatz des hier vorgestellten AR-Systems im Angebotsprozess für eine Nachrüstung von Schiffen dar.

Tabelle 1: Einfluss des AR-Systems

Prozessphase	**AR-System**	**Integration des Kunden**
Initialisierung	Angebots-visualisierung	• Darstellung für den Kunden • Diskussion verschiedener Lösungssysteme
Engineering, Kalkulation	Varianten-planung	• Korrekte Darstellung verschiedener Varianten • Machbarkeitsstudien direkt am Objekt • Sofortige Umsetzung der Kundenwünsche
Unterlagen-bereitstellung	Angebots-visualisierung	• Visualisieren des Angebots • Einbinden weiterer Personengruppen

4 Fallstudie

Das AR-System wurde dafür zunächst bereits während der Entwicklung getestet (1), anschließend in Workshops mit Verantwortlichen erweitert (2) und zum Schluss an einem Fallbeispiel aus der Praxis evaluiert (3).

1. Das System wurde parallel zur Entwicklung auf seine generelle Funktionalität getestet. Dazu wurde das Tracking in verschiedenen Dimensionen validiert und für einen Einsatz an einem realen Schiff vorbereitet. So muss das System in der Lage sein, Marker z. T. aus weiter Entfernung zuverlässig zu erkennen. Dafür sind Markergrößen bis DIN A0 notwendig. Das System wurde parallel zur Entwicklung mit Komponenten eines großen maritimen Zulieferers auf Funktionalität getestet.

2. Im zweiten Evaluationsschritt wurde das System dem Zulieferer vorgestellt und in Workshops für einen Praxiseinsatz erweitert. Der Fokus lag dabei auf der Bedienung der Applikation. Eine Gestensteuerung (vgl. Abschnitt 3.2) erleichtert dem Benutzer das Modifizieren der Komponenten. Mehrere Testpersonen mit unterschiedlichen Vorkenntnissen haben diese getestet und deren Gesamteindruck abgegeben. Das Testszenario bestand aus der Positionierung einer SCR-Anlage an den korrekten Platz. Die wichtigsten identifizierten Verbesserungen waren:

- Invertierte Z-Achsenverschiebung zum intuitiven Verschieben der Bauteile in der Tiefe
- Entfernen der Skalierung durch eine Zoom-Geste, um ein zufälliges Skalieren von Bauteilen zu vermeiden
- Darstellung der Tiefe durch eine Anzeige der relativen Position vom Bauteil zum Marker
- Bessere Darstellung des Koordinatensystems zur Manipulation

Weiterhin wurden die im Szenario erzeugten Untersuchungsergebnisse kritisch betrachtet. Die Auswertungen haben gezeigt, dass ein Abspeichern der gefundenen Varianten in einem neutralen Format notwendig ist, um eine Weiterbearbeitung der Resultate zu gewährleisten. Diese Erkenntnisse des Workshops wurden aufgenommen und in die Applikation integriert. Abbildung 9 zeigt die überarbeitete Oberfläche.

3. Als letzten Schritt hat eine Fallstudie die Praxistauglichkeit des entwickelten Systems untersucht. Ein internationaler Reeder, dessen Schiff ausschließlich in einer Emission Control Area verkehrt, hatte einen SCR beim Zulieferer in Auftrag gegeben. Das Ziel der hier vorliegenden Arbeit war, das AR-System und seinen Einsatz im Prozess an einem Praxisobjekt zu evaluieren.

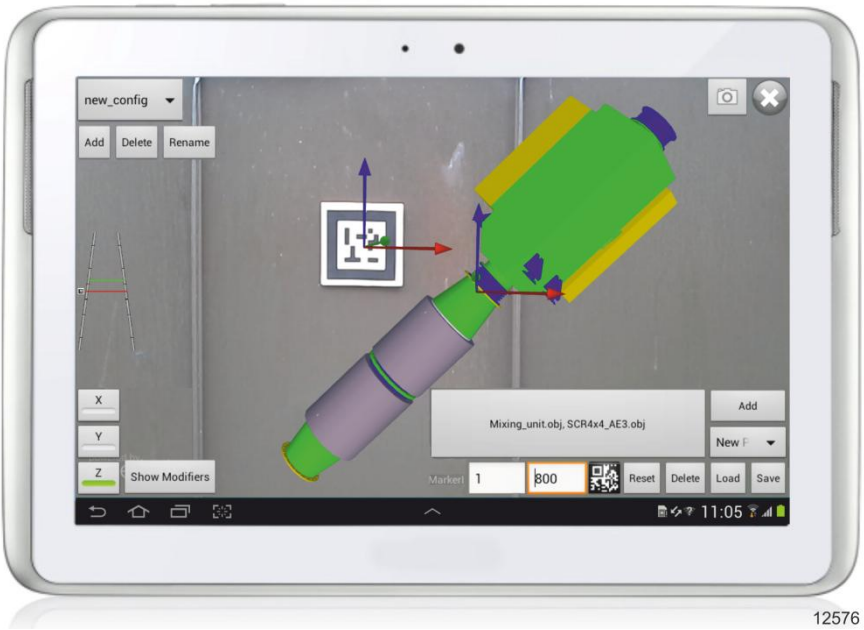


Abbildung 9: AR-Oberfläche

Initialisierung: Als Eingangsinformationen lagen Motordaten und ein Generalplan des Schiffs vor. Aus dem Katalog wurde das passende System ausgewählt und über einen Marker am Schiff dargestellt (vgl. Abbildung 4). Bereits an dieser Stelle sind erste Fragen und Anregungen zu den Komponenten und dem Layout von dem Kunden aufgenommen worden. Neben der Darstellung des Gesamtsystems wurde eine Visualisierung einer Einzelkomponente direkt im Abgasstrang benötigt. Über den Katalog und einen Marker konnte diese mit sehr wenig Aufwand dargestellt und Fotos zur Dokumentation gemacht werden.

Engineering: In der Engineeringphase wurde die Variantenplanung getestet. Nach dem Erfassen der Geometrie und einer ersten Planung in CAD wurden die erarbeiteten Layoutvarianten dem Kunden zunächst am 3D-CAD-System und dann vor Ort mit AR präsentiert. Diese Form der Darstellung fand sofort die Akzeptanz des Kunden: Im Unterschied zur CAD-Darstellung fiel ihm zum

einen unmittelbar die Zugänglichkeit für Wartungsoperationen auf. Zum anderen hatten der Reeder und ausgewählte Besatzungsmitglieder durch die AR-Anwendung die Möglichkeit, die Komponenten vor Ort umzuplanen und mit dem Zulieferer zu diskutieren. Daraus sind neue Layoutvarianten entstanden. Erst bei der Betrachtung der Situation vor Ort und der korrekten Darstellung der zukünftigen Komponenten sind neue Ideen entstanden bzw. Schwachstellen der vorhandenen aufgedeckt worden. Bei der vorangehenden Darstellung in CAD ist dies nicht der Fall gewesen.

5 Zusammenfassung

Es wurde ein AR-System zur kundenintegrierten Variantenplanung entwickelt und getestet. Das System ist modular aufgebaut und erlaubt eine Visualisierung bereits in einer sehr frühen Prozessphase. Es stellt mit geringem Aufwand, Komponenten vor Ort dar und ermöglicht diese zu manipulieren. Es fand hohe Akzeptanz und bietet eine einfache Möglichkeit, um den Kunden stärker in die Planung einzubinden und Layoutvarianten zu erarbeiten. Dabei zeigte sich, dass der Kunde möglichst einfache und intuitive Lösungen bevorzugt, wie bspw. Manipulation durch Gestensteuerung oder Hinzufügen weiterer Komponenten aus Katalogen.

Der Einsatz des entwickelten AR-Systems an einem Praxisbeispiel hat die Vorteile gegenüber anderen Plattform aufgezeigt. Dem Kunde wurden die geplanten Veränderungen direkt visualisiert und er konnte eigene Ideen einbringen. Damit wurde eine durchgehende Integration des Kunden in den Prozess und damit ein Teilziel von Industrie 4.0 erreicht.

Danksagung

Das Forschungsprojekt PROSPER wurde gefördert vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Literatur

Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B. (2014). Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Choi, C., Christensen, H. I. (2010). Real-time 3D model-based tracking using edge and keypoint features for robotic manipulation. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), (S. 4048-4055).

Friedewald, A.; Titov, F.; Halata, P. S.; Lödding, H. (2013). An Efficient Retrofit Planning Workflow. In: RINA (Hrsg.): 16th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding (ICCAS 2013), (Papers Volume I, S. 7-15).

Färber, M. (2006). Markerbasiertes Tracking für Augmented Reality Applikationen. Technical report, ETH Zurich, Ausgabe 3.

Heinig, M., Friedewald, A., Lödding, H. (2012). Improving the benefit of Virtual Reality session decomentation through Augmented Reality. In: 12th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality (CONVR), S. 271-281.

International Maritime Organization (2005). MARPOL ANNEX VI, Regulations for the prevention of air pollution from ships.

Liu, J., Au, O. K.-C., Fu, H., Tai, C.-L. (2012). Two-Finger Gestures for 6DOF Manipulation of 3D Objects. Computer Graphics Forum, (Volume 31, Issue 7), S. 2047-2055.

Loumansuu, S. (2011). First order for Wartsila SOx Scrubber, Twentyfour7 Wartsila Stakeholder Magazine, (Issue 03).

Tönnis, M. (2008). Towards Automotive Augmented Reality. München.

Walter, J., Wagner, J. (2012). Choosing Exhaust Scrubber Systems. On behalf of Maritimes Cluster Northern Germany.

Ansätze für eine Online-Optimierung der Losgrößen in der Serienfertigung

Wilhelm Dangelmaier

1 Das Problem

Wir betrachten ein Produktionssystem, in dem eine bestimmte Menge von Produkten hergestellt wird. Diese Produkte sind a priori bekannt und können daher einer Bestellung vorauseilend auf Lager gelegt werden. Bestellungen liegen nur für einen bestimmten Zeitraum vor. Im Laufe der Zeit werden neue Bestellungen bekannt. Eine Planung kann daher niemals auf alle Bestellungen zugreifen – zum Planungszeitpunkt bekannt ist nur ein bestimmter Ausschnitt aus der Zukunft, der Planungshorizont. Wenn damit eine Planung zukünftige Bestellungen schon nicht vollständig kennt und daher die Produktion auch nicht optimal darauf ausrichten kann, so sollten doch keine Sachverhalte geschaffen werden, die für eine zukünftige Produktion oder Planung als zusätzliche Erschwernisse oder Nachteile angesehen werden müssen. Handlungsmaxime muss daher sein: Unabhängig davon, wie die Zukunft aussieht und was in ihr passieren wird, wird die Güte der Produktion bzw. der Planung eine gewissen Grenze nicht unterschreiten. Naturgemäß ist diese Grenze in Abhängigkeit von der bestmöglichen Lösung bestimmt. Und dieses Optimum kann nur bestimmt werden, wenn man alle Bestellungen kennt - also erst im Nachhinein. Die hier zu stellende Frage ist aber: Was und wieviel produziert ein Unternehmen jetzt, auch wenn die Bestellungen nur für die nächste Zukunft vorliegen oder im Extrem nur eine einzige, die nächste Bestellung bekannt ist? Derartige Fragestellungen behandelt die Online-Optimierung, die im Gegensatz zur Offline-Optimierung eben dieses Optimum nicht kennt, dafür aber das Einhalten gewisser Schranken unabhängig vom zukünftigen Geschehen garantiert.

2 Das Optimalkonzept (Offline-Planung)

Das betrachtete Produktionssystem soll nach den Annahmen des *Discrete Lotsizing and Scheduling Problems (DLSP)* arbeiten:

I^{PF} Menge der Produkte bzw. der Produktindizes, $i = \{1,..., n_{PF}\}$

T_P Zeitmodell mit der Menge der Zeitabschnitte bzw. deren Indizes, $t = \{1,..., n^t\}$ und der Menge der Zeitpunkte ; $T = \{0,..., n^t\}$; $t = T$ für das Ende eines Zeitabschnitts (Planungshorizont)

b_{it} Bedarf für Produkt i in Zeitabschnitt t

a_t verfügbare Kapazität in Zeitabschnitt t

b_i Produktionskoeffizient für Produkt i

$k_i^{rüs}$ Rüstkosten für Produkt i

k_{it}^{stk} Stückkosten für Produkt i in Zeitabschnitt t

k_i^{lag} Lagerkostensatz für Produkt i je Zeitabschnitt t

B_{i0} Anfangsbestand für Produkt i

B_{iT}^{sht} Sicherheitsbestand für Produkt i am Ende von Zeitabschnitt t

x_{it} Produktionsmenge für Produkt i in Zeitabschnitt t

B_{iT} Bestand für Produkt i am Ende von Zeitabschnitt t

$\delta_{it}^{rüs}$ Rüstindikator für Produkt i im Zeitabschnitt t

δ_{it}^{pdn} Produktionsindikator für Produkt i im Zeitabschnitt t

w_i Höchstmenge von Produkt i pro Zeitabschnitt

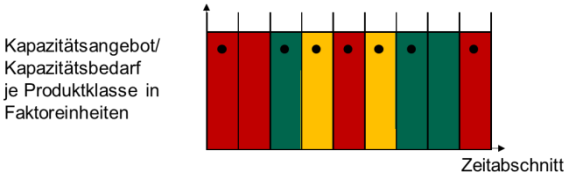


Bild 1: Produktion bei DLSP

Das DLSP reduziert die Entscheidung für einen Zeitabschnitt auf die Frage, ob produziert werden soll oder nicht. Damit hängen die Produktionsmengen direkt von den Indikatorvariablen ab und es gilt $x_{it} = w_i \cdot \delta_{it}$. Da beim DLSP grundsätzlich von Zeitabschnitten mit einheitlichem Kapazitätsangebot ausgegangen wird, ergibt sich w_i als zeitinvarianter Quotient aus der Zeitabschnittskapazität a_t und dem Produktionskoeffizienten b_i. Dies führt zu folgender DLSP-Formulierung:

Minimiere $$\sum_{i,t}(k_i^{rüs} \cdot \max\{0, \delta_{it}^{rüs} - \delta_{i,t-1}^{rüs}\} + k_{it}^{stk} \cdot w_i \cdot \delta_{it}^{rüs} + k_i^{lag} \cdot B_{iT})$$

unter den Restriktionen

$$\forall i \in I^{PF}, \forall t, T \in T_P : B_{iT} = B_{i,T-1} + w_i \cdot \delta_{it}^{rüs} - b_{it} \qquad \text{(DLSP, 1)}$$

$$\forall t, T \in T_P : \sum_i \delta_{it}^{rüs} \leq 1 \qquad \text{(DLSP, 2)}$$

$$\forall i \in I^{PF}, \forall t, T \in T_P : B_{iT} \geq B_{iT}^{sht} : \qquad \text{(DLSP, 3)}$$

$$\forall i \in I^{PF}, \forall t, T \in T_P : \delta_{it}^{rüs} \in \{0,1\} : \qquad \text{(DLSP, 4)}$$

Das Optimalkonzept, der „Offline-Algorithmus“, kennt den Gesamthorizont und kann damit die bestmögliche Lösung, den „optimalen Plan“ erstellen.

3 Das Vorgehen bei rollierendem Horizont (Online-Planung)

Bei rollierendem Horizont erstreckt sich ein Plan über mehrere Perioden mit jeweils mehreren Zeitabschnitten (bspw. Horizont mit 4 Wochen und Woche mit 10 Schichten). Er wird periodisch fortgeschrieben. Jeweils die erste Periode wird als zu realisierender Plan vorgegeben. Die Realisierung einer Planung ergibt sich damit als fortgesetzte Umsetzung jeweils der 1. Periode. Veränderungen am Plan erfolgen nur zu den Planungszeitpunkten. Diese liegen außerhalb des Kalenders (also bspw. nicht während der Woche bei wöchentlichem Planungszyklus). Die im Plan eingetragenen Bedarfe (Bestandsabgänge) sind bereits „Heute“ bekannt und können bis zum Zeitpunkt ihrer endgültigen Fixierung (spätestens, wenn sie in der 1. Planungsperiode liegen) noch verschoben oder in ihrer Höhe verändert werden.

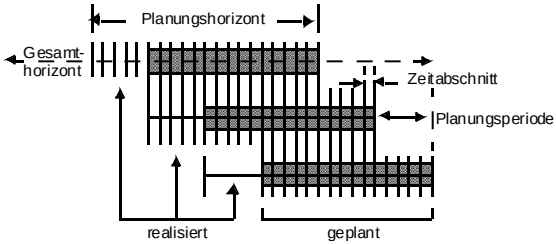


Bild 2: Gesamthorizont, Planungshorizont, realisierter Horizont

Die (online-) Planung über dem jeweiligen Planungshorizont hat daher den Sachverhalt zu berücksichtigen, dass zu jedem späteren Planungszeitpunkt durch das Anfügen einer weiteren Periode Änderungen in den bisher geplanten Perioden erforderlich werden können (und einem Offline-Optimierer alle diese Perioden für seine Planungsentscheidungen bekannt sind). Unabhängig von der formalen Beschreibung der Produktion (DLSP, CLSP, PLSP) wählen wir den folgenden Ansatz:

- Optimierung der jeweils 1. Periode + getrennte Optimierung der jeweils restlichen Perioden des

Planungshorizonts unter Beachtung eines gemeinsamen Bestands am Ende der ersten Periode

- Gewichtung der beiden (Teil-) Lösungen
- Abhängig von der gewählten Gewichtung Auswahl der kostenminimalen Lösung für den zu realisierenden Planungshorizont

Zum Zeitpunkt T_0 werden die Pläne $DLSP_1$ und $DLSP_1$ erstellt. Ausgewählt wird der Plan mit $\alpha \cdot DLSP_1 + (1-\alpha) \cdot DLSP_1 = \min$ (Kosten) bzw. max (Erlös), wobei $\alpha + \beta = 1$. Damit wird

- am Ende der ersten Periode ein Verlust vermieden bzw. ein (Mindest-)Gewinn realisiert.
- über dem Planungshorizont ein zulässiger Plan erzeugt
- über das DLSP eine mathematische Formulierung des Problems ermöglicht.

Die Lösung des DLSP über einem (Gesamt-)Horizont und die beiden über den Bestand gekoppelten DLSP-Teilprobleme müssen selbstverständlich nicht identisch sein, da jedes Teilproblem für sich eine positive Lösung garantieren muss.

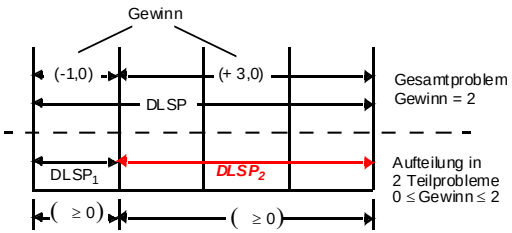
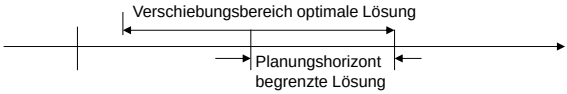


Bild 3: Aufteilung in zwei Teilprobleme

4 Die Kosten eines rollierenden Horizonts

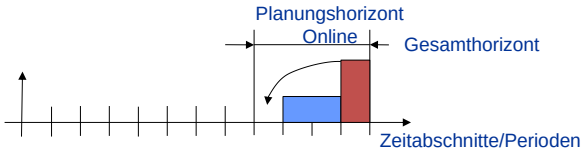
Eine Lösung des Zuordnungsproblems kann aus Gründen der Verfügbarkeit Bedarfe nur in Richtung Gegenwart verschieben (Fortschrittszahl Zugang zu jeden Zeitpunkt ≥ Fortschrittszahl Abgang). Die optimale Lösung hat dazu den Gesamthorizont, die fortschreibende „rollierende“ Lösung nur die Zeitabschnitte des Planungshorizonts zur Verfügung. Wenn die optimale Lösung Bedarfe nicht über den (jeweiligen) Planungshorizont hinaus verschiebt, dann kann die begrenzte Lösung genauso gut sein. Das Vorziehen von Bedarfen erfolgt in der optimalen Lösung aber nicht beliebig bis zu einer vollständigen Ausnutzung des Kapazitätsangebots ab Beginn des Gesamthorizonts. Die Begrenzung für eine Verschiebung aus Kostengründen ist da gegeben, wo die aus der Verschiebung resultierenden Bestandskosten den Gewinn an Rüst- und Fertigungskosten – also der Vermeidung an „teuren“ Zeitabschnitten - überschreiten. Wenn der Optimal-Algorithmus eine Bedarfsverschiebung im Bereich (Planungshorizont → maximale Verschiebungsgrenze) verwendet, hat er eine günstigere Lösung als der begrenzte Algorithmus - der dann noch mindestens einen teuren Zeitabschnitt mehr verwendet - gefunden. Also ist die Frage, um wieviel der begrenzte Algorithmus schlechter ist, über diese nicht genutzte Ersparnis zu beantworten.



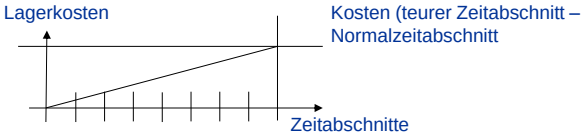
Es gelten folgende Überlegungen:

Wenn *alle* Zeitabschnitte gleich teuer sind, heißt die Lösung (wenn man von den Rüstkosten absieht): „So spät wie möglich.“ Hier sollen aber bestimmte *Kategorien von Zeitabschnitten* bspw. die Samstage oder die dritte Schicht *teurer* als die Normalschicht (bspw. 1. und 2. Schicht) sein. In einer Differenzierung in der Art „Montag ist teurer als Dienstag“ wird kein Sinn gesehen.

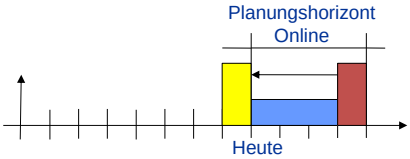
Solange ein Ausgleich eines teuren Zeitabschnitts in einen günstigeren Zeitabschnitt innerhalb des Planungshorizonts des begrenzten Algorithmus möglich ist, ergibt sich hier keine Unterscheidung mit dem Optimal-Algorithmus.



Unterschiede treten auf, sobald der Optimal-Algorithmus einen günstigen Zeitabschnitt außerhalb des Planungshorizonts nutzen kann. Das wird der Offline Algorithmus aber nur tun, wenn die Kosten für das Verschieben, also (zusätzliche) Kapitalbindungskosten für den dann erhöhten Bestand die Ersparnis für den dann vermiedenen teuren Zeitabschnitt nicht übersteigen.



In diesem Beispiel gilt: Eine Verschiebung um 9 Zeitabschnitte ist teurer als die Ersparnis beim Vermeiden eines teuren Zeitabschnitts. Also wird der Optimal-Algorithmus nicht um 9 Zeitabschnitte (oder mehr) verschieben („Verschiebungsgrenze“ = 8 Zeitabschnitte). Am meisten gewinnt der Optimal-Algorithmus gegenüber einem begrenzten Algorithmus, wenn er den teuren Zeitabschnitt mit minimalen Kosten vermeidet (und der begrenzte Algorithmus das nicht kann!). Dies zeigt die folgende Skizze:

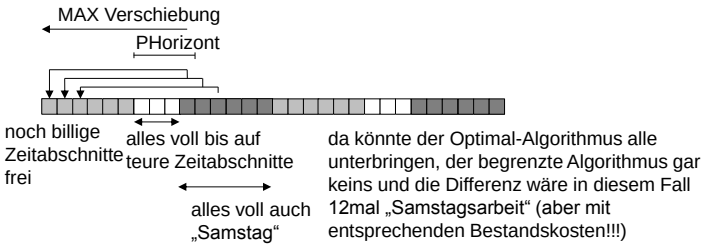


Damit wird ein teurer Zeitabschnitt vermieden. Für die Bestandskosten gilt hier: Eine Verschiebung um 8 Zeitabschnitte kostet die Differenz zwischen normalem und teurem Zeitabschnitt. Damit sind die Kapitalbindungskosten und die Kosten für normale / teure Zeitabschnitte vergleichbar. Dann kostet die Verschiebung um 4 Zeitabschnitte die Hälfte davon: 0,5 · (Differenz teurer - normaler Zeitabschnitt). Damit ist die Ersparnis des Optimal-Algorithmus, die der begrenzte Algorithmus nicht realisieren kann: (1 - 0,5) · (Differenz teurer - normaler Zeitabschnitt).

Dieses „Spiel“ kann der Optimal-Algorithmus machen, bis die durch die Bestandskosten gesetzte Obergrenze erreicht ist. Und dieses Spiel kann (Gesamthorizont : (Verschiebungsgrenze + (Verschiebungsgrenze - Planungshorizont)) mal wiederholt werden. Dann wäre die maximale Menge verschobener „Samstage“ (mit 1 „Samstag“ je Periode und alles in Perioden):

(Gesamthorizont : (Verschiebungsgrenze + (Verschiebungsgrenze - Planungshorizont) · (Verschiebungsgrenze - Planungshorizont (in Wochen))

Dann liegt aber ein Plan vor, der bis zu einer Grenze geht, ab der auch ein Optimal-Algorithmus nichts mehr gewinnt. Die folgende Skizze zeigt die Obergrenze der Verschiebung.



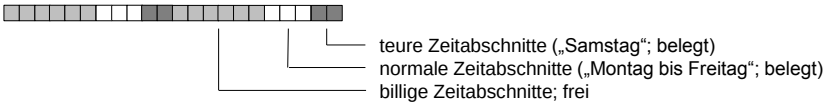
In dem hier gezeigten Fall werden lediglich Wochenperioden angezeigt. Bei einem Planungshorizont von 4 Wochen können aus Perioden mit „Samstagsarbeit“ keine Bedarfe in Perioden mit noch freien, „billigen“ Zeitabschnitten mittels eines begrenzten Algorithmus geschoben werden.

Der Optimal-Algorithmus dagegen kann dies sehr wohl (im Horizont zweimal je 6 Perioden).

Wenn man keinen freien „billigen“ Zeitabschnitt mehr findet, sind diese alle belegt. Also sind im gezeigten Fall mit 30 Perioden (Wochen) in der Optimal-Lösung - kostenmäßig in „billige“ Perioden umgerechnet - maximal (6 „billige“ Perioden) * 2 „frei“ (damit ist die Verschiebung der Samstag-Abschnitte bis zur Obergrenze nach vorne (um jeweils 9 Perioden = Verschiebungsobergrenze) und das Verursachen von Lagerbeständen in den Kosten mit berücksichtigt!). Die restlichen Zeitabschnitte verursachen entsprechende Fertigungskosten. Der begrenzte Algorithmus hätte ohne Verschiebung (in diesem Fall) 12 „billige“ Zeitabschnitte ungenutzt frei.

Im folgenden Plan wären Samstage frei, die Zeitabschnitte ▩ verursachen zusätzlich für 2 Zeitabschnitte Bestandskosten, die Zeitabschnitte ▣ sind Zeitabschnitte mit „ganz normalen“ Fertigungskosten. Das wäre in diesem Fall für Optimal- und begrenztem Algorithmus gleich.

In diesem Fall ist auch der begrenzte Algorithmus erfolgreich. Der Optimal-Algorithmus „gewinnt“ in folgendem Fall:



optimal ≤ begrenzt

(10 normale Zeitabschnitte + Anteil Bestand (2) (2 · 5 ZA)) ≤ (6 normale Zeitabschnitte) + (4 teure Zeitabschnitte)

Wenn wir die erste Skizze als Maßstab wählen, dann gilt als Grenze

9 Zeitabschnitte Bestandskosten = Δ (teurer Zeitabschnitt - normaler Zeitabschnitt) · Produktionskosten

Dann gilt hier

(10 normale Zeitabschnitte + $\frac{2 \cdot 2 \cdot 5}{9}$ (teuer - normal)) < (10 normal + 4 (teuer - normal))

und für das Verhältnis $\frac{\text{optimal}}{\text{begrenzt}}$ gilt

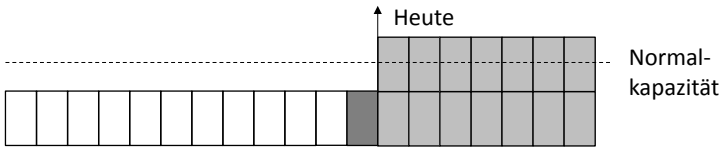
$$\frac{\text{optimal}}{\text{begrenzt}} > \frac{10 + \frac{20}{9}\Delta}{10 + 4\Delta}.$$

wenn die Samstagsschicht - wie angenommen - doppelt so teuer ist, gilt

$$\frac{\text{optimal}}{\text{begrenzt}} > \frac{12\frac{2}{9}}{14} \text{ oder } \frac{\text{begrenzt}}{\text{optimal}} < \frac{14 \cdot 9}{110} = 1{,}15.$$

Das ist natürlich keine generelle Abschätzung begrenzt / optimal, sondern lediglich eine Berechnung anhand einer konkreten Belegungssituation. Wir wollen daher zwei systematisierende Beispiele einführen.

Beispiel 1: Bestandskosten bei Abgleich an der Heute-Linie



Hier kann der Optimal-Algorithmus abgleichen, während der begrenzte Algorithmus auf seinen teuren Zeitabschnitten sitzen bleibt. Der optimale gleicht aber nur bis zu einer Grenze ab, ab der die Bestandskosten höher als die Ersparnisse werden.

Es gilt für das Vorziehen von x Zeitabschnitten

Ersparnis

$$= x \cdot \Delta \text{ teurer Zeitabschnitt} - \sum_{s=1}^{x} (2(s-1)+1) \cdot \frac{\text{Bestandskosten}}{\text{Zeitabschnitt}}$$

$$= x \cdot \Delta \text{ teurer Zeitabschnitt} - x^2 \cdot \frac{\text{Bestandskosten}}{\text{Zeitabschnitt}}$$

Die 1. Ableitung nach x ist

$$d/dx \text{ (Ersparnis)} = \Delta \text{ teurer Zeitabschnitt} - 2x \cdot \frac{\text{Bestandskosten}}{\text{Zeitabschnitt}}$$

Daraus folgt: Die Ersparnis ist maximal bei

$$x^* = \frac{\Delta \text{ teurer Zeitabschnitt}}{2 \cdot \text{Bestandskosten/Zeitabschnitt}}$$

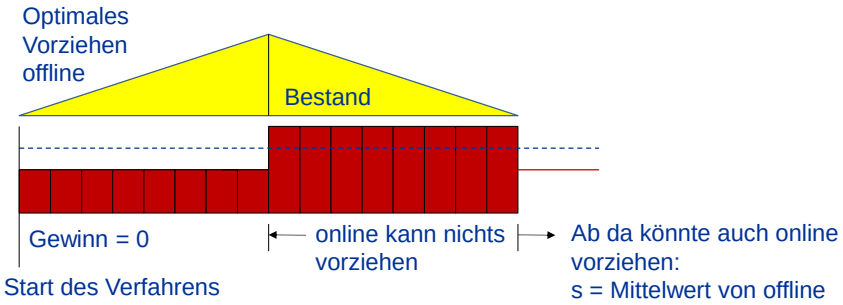
x^* ist das für den Optimal-Algorithmus bestmögliche Vorziehen, also der anzuwendende Vorschiebehorizont. Hier ergibt sich die maximale Ersparnis „Ersparnis*“.

Dagegen produziert der begrenzte Algorithmus in teuren Zeitabschnitten:

$\text{Kosten}_{\text{begr}} = \quad x \cdot \text{normal} + x \cdot \text{teuer}$

$\text{Kosten}_{\text{opt}} = \quad \text{Kosten}_{\text{begr}} - \text{Ersparnis}^*$

Damit kann man den Quotienten $\frac{\text{Kosten}_{\text{begr}}}{\text{Kosten}_{\text{opt}}}$ bilden



Allgemein gilt für den „worst case“ (kein Vorziehen im begrenzten Fall) mit

k_p^t Produktionskosten in teurem Zeitabschnitt

k_p^n Produktionskosten in normalem Zeitabschnitt

k_B Bestandskosten für einen Zeitabschnitt

x Anzahl der Zeitabschnitte, um die vorgezogen wird

- bestmögliche Verschiebung $x^* = \dfrac{(k_p^t - k_p^n)}{2 \cdot k_B}$

- maximale Ersparnis

Ersparnis* = $x^* \cdot (k_p^t - k_p^n) - (x^*) \cdot k_B$

Verhältnis begr./optimal

$$\frac{k_{begr}}{k_{optimal}} = \frac{x^* \cdot (k_p^n) + x^* \cdot (k_p^t)}{x^* \cdot k_p^n + x^* \cdot k_p^t - x^* (k_p^t - k_p^n) + (x^*)^2 \cdot k_B} =$$

$$\frac{x^* (k_p^t + k_p^n)}{2 \cdot k_p^n x^* + (x^*)^2 \cdot k_B}$$

- Beispiel Zahlenwerte

$$k_p^t = 1;\ k_p^n = 0{,}5;\ k_B = 0{,}1;\ x^* = 2{,}5$$

Ersparnis* = $1{,}25 - 0{,}625 = 0{,}625$

$$\frac{k_{begr.}}{k_{opt.}} = \frac{2{,}5 \cdot 1{,}5}{2 \cdot 0{,}5 \cdot 2{,}5 + 6{,}25 \cdot 0{,}1} = \frac{3{,}75}{3{,}125} = 1{,}2$$

	Bestands-kosten	Ersparnis Fertigungs-kosten	Ersparnis Σ	$x^* \frac{\Delta \text{ teurer Zeitabschnitt}}{2 * \text{Bestandskosten/Zeitabschnitt}} = 2{,}5$
x = 1	1/10	1 · 0,5	0,4	
x = 2	3/10	2 · 0,5	0,6	
x = 3	5/10	3 · 0,5	0,6	Ersparnis= $2{,}5 \cdot 0{,}5 - 6{,}25 \cdot 0{,}1 =$
x = 4	7/10	4 · 0,5	0,4	$0{,}625$
x = 5	9/10	5 · 0,5	0	$\text{Kosten}_{onl} = 2{,}5 \text{ normal} +$
x = 6	11/10	6 · 0,5	- 0,6	$2{,}5 \text{ teuer} = 3{,}75$
x = 7	13/10	7 · 0,5	- 1,4	$\text{Kosten}_{off} = 3{,}75 - 0{,}625 = 3{,}125$
x = 8	15/10	8 · 0,5	- 2,4	$\text{Kosten}_{onl} / \text{Kosten}_{off} = 3{,}75 / 3{,}125$
x = 9	17/10	9 · 0,5		$= 1{,}2$

Wir gehen jetzt in einem „best case“ davon aus, dass der begrenzte Algorithmus innerhalb des Planungshorizont „billige“ Zeitabschnitte findet, also verschieben kann. Allerdings führt die Forderung „Mindestgewinn“ dazu, dass wir nur in (Planungs-)Perioden verschieben können, in denen ein Erlös erzielt und damit auch abgesetzt und produziert wird. Also verschieben wir in eine (Planungs-)Periode, in der zumindest einige der „billigen“ Zeitabschnitte bereits belegt sind. Die jetzt noch freien billigen Zeitabschnitte dürfen wir nur bis zum Mindestgewinn nutzen.

Allgemein gilt für den „best case“ (Vorziehen mit Mindestgewinn) mit g = Verhältnis (Erlös/Kosten) daher:

Gewinn ohne Vorziehen $G = g \cdot k_p^n - k_p^n = (g-1)k_p^n$

Vorgegebener Mindestgewinn $X \cdot G = X(g-1)k_p^n$

Gewinn nach Vorziehen

$$X \cdot (g-1)k_p^n = (g-1)k_p^n - k_p \cdot v$$

$$v = \frac{(g-1)k_p^n - X(g-1) \cdot k_p^n}{k_p^n}$$

$$v = \frac{(g-1)(1-X)k_p^n}{k_p^n}$$

$$\frac{k_{onl}}{k_{off}} = \frac{x^*(k_p^n) + x^*(k_p^t) - v \cdot \text{Ersparnis}^*}{x^*(k_p^n) + x^*(k_p^t) - \text{Ersparnis}^*}$$

$$= \frac{x^*((1+v)k_p^n + (1-v)k_p^t - v \cdot x^* \cdot k_B}{2 \cdot k_p^n \cdot x^* + (x^*)^2 \cdot k_B}$$

Beispiel Zahlenwerte

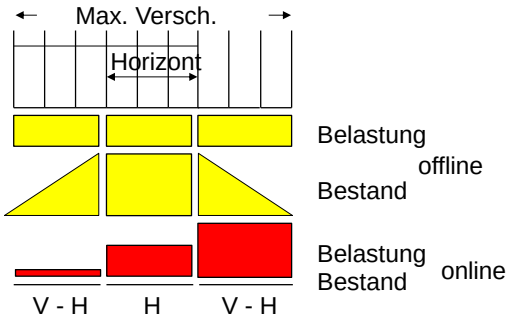
$$k_p^t = 1,\ k_p^n = 0{,}5,\ k_B = 0{,}1,\ x^* = 2{,}5,\ g = 1{,}5,\ X = 0{,}5$$

$$v = \frac{(1{,}5-1)(1-0{,}5) \cdot 0{,}5}{0{,}5} = \frac{0{,}125}{0{,}5} = 0{,}25$$

$$\frac{k_{onl}}{k_{off}} = \frac{2{,}5((1+0{,}25) \cdot 0{,}5 + (1-0{,}25) \cdot 1 - 0{,}25 \cdot 2{,}5 \cdot 0{,}1)}{3{,}125}$$

$$= \frac{2{,}5(0{,}625 + 0{,}75 - 0{,}0625)}{3{,}125} = \frac{3{,}59}{3{,}125} = 1{,}15$$

Beispiel 2: Bestandskosten bei Abgleich über einen fixierten Bereich



Es ist ein Zeitraum 2 $(V-H)+H$ zu betrachten.

Es gilt für die Ersparnis durch das Vorziehen von x Zeitabschnitten:

Ersparnis

$$= x \cdot \Delta \text{ teurer Zeitabschnitte} - \sum_{s=1}^{x} (H + 2(s-1) + 1) \cdot \frac{\text{Bestandskosten}}{\text{Zeitabschnitt}}$$

$$= x \cdot \Delta \text{ teurer Zeitabschnitte} - (x \cdot H + x^2) \cdot \frac{\text{Bestandskosten}}{\text{Zeitabschnitt}}$$

Die 1. Ableitung nach x ist

$$d/dx \text{ (Ersparnis)} = \Delta \text{ teurer Zeitabschnitt} - (H + 2x) \cdot \frac{\text{Bestandskosten}}{\text{Zeitabschnitt}}$$

Daraus folgt: Die Ersparnis ist maximal bei

$$x^* = \frac{\Delta \text{ teurer Zeitabschnitt} - H \cdot \text{Bestandskosten/Zeitabschnitt}}{2 \cdot \text{Bestandskosten/Zeitabschnitt}}$$

x^* ist das für den Optimal-Algorithmus bestmögliche Vorziehen, also der anzuwendende Verschiebehorizont $V = H + x$.

Die maximale Ersparnis ergibt sich, indem wir x^* oben einsetzen. Es ergibt sich Ersparnis*.

Dagegen produziert der begrenzte Algorithmus in teuren Zeitabschnitten:

$$\text{Kosten}_{\text{begr.}} = (H + x) \cdot \text{normal} + x \cdot \text{teuer}$$

$$\text{Kosten}_{\text{opt}} = \text{Kosten}_{\text{begr.}} - \text{Ersparnis*}$$

Damit können wir den Quotienten $\frac{\text{Kosten}_{\text{begr.}}}{\text{Kosten}_{\text{opt.}}}$ bilden.

Allgemein gilt:

- bestmögliche Verschiebung $x^* = \frac{(k_p^t - k_p^n) - d_H \cdot k_B}{2 \cdot k_B}$
- maximale Ersparnis
  Ersparnis* = $x^* \cdot (k_p^t - k_p^n) - (x^* \cdot d_H + (x)^2) \cdot k_B$

Verhältnis begrenzt/optimal

$$\frac{k_{\text{begr.}}}{k_{\text{optimal}}} = \frac{(d_h + x^*) \cdot (k_p^n) + x^* \cdot k_p^t}{(d_h + x^*) \cdot k_p^n + x^* \cdot (k_p^t - k_p^n) + (x^* \cdot d_H + (x^*)^{2)} \cdot k_B} =$$

$$\frac{d_H \cdot k_p^n + x^* (k_p^t + k_p^n)}{d_H \cdot k_p^n + x^* (2 \cdot k_p^n + d_H \cdot k_B + x^* \cdot k_B)}$$

- Beispiel Zahlenwerte

$$k_p^t = 1; k_p^n = 0{,}5; k_B = 0{,}1; d_H = 4, x^* = 0{,}5$$

Ersparnis* = $0{,}25 - (0{,}5 \cdot 4 + 0{,}25) \cdot 0{,}1 = 0{,}25 - 0{,}225 = 0{,}025$

$$\frac{k_{begr.}}{k_{opt.}} = \frac{4 \cdot 0{,}5 + 0{,}5(1{,}5)}{4 \cdot 0{,}5 + 0{,}5(1 + 0{,}4 + 0{,}05)} = \frac{2{,}75}{2{,}725} = 1{,}01$$

	Bestands -kosten	Ersparnis Fertigung s-kosten	Ersparnis Σ	$x * \frac{0{,}5 - 0{,}4}{2 \cdot 0{,}1} = 0{,}5$
x = 1	5/10	$1 \cdot 0{,}5$	0	Ersparnis= $0{,}25 - 0{,}225 = 0{,}025$
x = 2	+ 7/10	$2 \cdot 0{,}5$	- 0,2	$Kosten_{onl} = 4{,}5 \cdot 0{,}5 + 0{,}5 \cdot 1 = 2{,}75$
x = 3	+ 9/10	$3 \cdot 0{,}5$	- 0,6	$Kosten_{off} = 4{,}5 \cdot 0{,}5 + 0{,}5 \cdot 1 - 0{,}025 = 2{,}725$
x = 4	+ 11/10	$4 \cdot 0{,}5$	- 1,2	$\frac{Kosten_{onl}}{Kosten_{off}} = \frac{2{,}75}{2{,}725} = 1{,}01$
x = 5	+ 13/10	$5 \cdot 0{,}5$	- 2,0	
x = 6	+ 15/10	$6 \cdot 0{,}5$	- 3,0	
x = 7	+ 17/10	$7 \cdot 0{,}5$	- 4,2	

5 Losgrößenbildung und Online Optimierung

Über der Vergangenheit liege ein Strom von Abgängen über jeweils eine Einheit vor. Es ist zu klären, wie der Zugang zu gestalten ist. Allerdings ist unser (Planungs-) Horizont (als Konsequenz erfolgreicher Anstrengungen zur Senkung der Lieferzeit) auf genau die vorliegende Bestellung reduziert. Wenn wir von einer festen Losgröße Q ausgehen wollen, reduziert sich unsere Betrachtung auf die Fragestellung, wann aufgrund des tatsächlich erfolgten Abgangs von einer Einheit ein Fertigungslos/eine Bestellung auszulösen ist. Da wir die Fertigung/Beschaffung eines Loses an einen Abgang binden, schaffen wir damit einen Bestand in Höhe von ($Q - 1$), für den es keine Deckung im Sinne geplanter/fixierter Abgänge gibt. Möglicherweise erfolgt dieser Abgang nie. Als Ausgangsdaten verwenden

wir: Losgröße Q, Rüst-/ Bestellkosten $k^{rüs}$, Stückkosten k^{stk}. Unseren Betrachtungen liegen zwei Basissituationen zugrunde, für die wir jeweils eine Vorgehensstrategie und einen *Grausamen Adversary* (siehe Krumke und Rambau, 2005) mit einer Gegenstrategie annehmen.

Basissituation 1: Skifahrerproblem

Eine Sportlerin geht das erste Mal in ihrem Leben zum Skifahren. Sie fragt sich, ob sie Ski leihen oder kaufen soll. Man kann für 50,00 € pro Tag ein Paar Skier leihen, andererseits aber auch für 500,00 € ein Paar kaufen. Es stellt sich die Frage: Wie ist die kostengünstigste Strategie? Die Schwierigkeit aber ist: Die Dame weiß nicht, wie oft sie in der Zukunft zum Skifahren gehen wird.

Als Beispiel für die kompetitive Analyse betrachten wir dieses Problem mit Leihkosten 1 und Kaufkosten B. *Die optimale Offline-Lösung bei* n *Tagen Skilaufen besteht darin, Skier zu leihen, falls* $n < B$ *gilt, und ansonsten Skier für* B *€ zu kaufen. Somit ist*

$$OPT(r_1,\ldots,r_n) = \min\{n,B\}. \qquad (1)$$

Wir betrachten den Online-Algorithmus, der i *mal Skier leiht und dann ein Paar kauft. Wenn wir* $i = B-1$ *wählen, ist der entsprechende Algorithmus* $(2-1/B)$*-kompetitiv: Falls* $n \le B-1$, *dann ist* $ALG(\sigma) = n = OPT(\sigma)$. *Wenn* $n > B-1$, *dann ist*

$$\frac{ALG(\sigma)}{OPT(\sigma)} = \frac{B-1+B}{B} = 2-\frac{1}{B}. \qquad (2)$$

Kann man eine bessere Kompetitivität (durch einen deterministischen Algorithmus) erreichen? Wir zeigen, dass dies nicht der Fall ist.

Sei dazu ALG ein beliebiger deterministischer Online-Algorithmus für das Skifahrerproblem. Der Algorithmus kaufe am iten Tag Skier. Wenn der Algorithmus kompetitiv sein will, dann muss er irgendwann Skier kaufen, d. h. es muss $i < +\infty$ *gelten. Der Adversary wählt* $n = i+1$, *d. h. er wartet, bis*

ALG ein Paar Skier kauft, und beendet dann das Skifahren. Der Online-Algorithmus hat also Kosten i *für das Leihen und* B *für das Kaufen, also insgesamt* $ALG(\sigma) = i + B$. *Der Offline Adversary hat Kosten* $OPT(\sigma) = \min\{i+1, B\}$.

Wenn $i \le B - 1$ *ist, dann gilt:*

$$\frac{ALG(\sigma)}{OPT(\sigma)} = \frac{i+B}{\min\{i+1,B\}} = \frac{i+B}{i+1} = 1 + \frac{B-1}{i+1} \ge 1 + \frac{B-1}{B} = 2 - \frac{1}{B}. \quad (3)$$

Wenn $i \ge B - 1$ *ist, dann haben wir*

$$\frac{ALG(\sigma)}{OPT(\sigma)} = \frac{i+B}{\min\{i+1,B\}} \ge \frac{2B-1}{B} = 2 - \frac{1}{B}. \quad (4)$$

Basissituation 2: Bahncardproblem

Eine Bahncard kann zum Preis von 240,00 € bei der Deutschen Bahn erworben werden. Sie bleibt 12 Monate gültig und ermöglicht es, in diesem Zeitraum Fahrkarten zum halben Preis zu erhalten.

Frage: Wann kauft man eine Bahncard?

Schwierigkeit: Die Reisen in den nächsten 12 Monaten sind unbekannt.

Wir betrachten das Bahncard-Problem in einer allgemeinen Version. Seien $B > 0$ *(der Kaufpreis einer Bahncard),* $T > 0$ *(die Gültigkeitsdauer einer Bahncard) und* $\beta \in [0,1]$ *(der Discount-Faktor einer Bahncard, wobei* β *nicht den Rabatt angibt, sondern wieviel % des Normalpreises die Bahncard nachher noch kostet) fest. Beim* (B,T,β)*-Bahncard-Problem erhält ein Algorithmus eine Folge* $\sigma = r_1, \ldots, r_n$ *von Fahrtanfragen* $r_i = (t_i, p_i)$*, welche chronologisch geordnet sind* $t_1 \le \ldots \le t_n$. *Die Zahl* p_i *gibt den regulären Preis der Fahrt i an.*

Die Aufgabe des Algorithmus ALG ist es, auf jede Fahrtanfrage durch Kauf einer Fahrkarte zu reagieren (ALG kann also niemals Fahrten ablehnen). Vor

dem Kauf der Fahrkarte, kann ALG noch für Kosten C eine Bahncard kaufen. Eine Bahncard, die zum Zeitpunkt t *gekauft wird, ist im Intervall* $[t, t+T)$ *gültig. Die Kosten von ALG bei Anfrage* r_i *sind*

$$c_A(r_i) = \begin{cases} \beta p_i \text{ wenn ALG eine gültige Bahncard zum Zeitpunkt } t_i \text{ besitzt} \\ p_i \text{ sonst.} \end{cases} \quad (5)$$

Ein Online-Algorithmus für das Bahncard-Problem erhält die Anfrage r_{i+1} *erst, wenn er die Anfrage* r_i *bearbeitet hat. Ein Offline-Algorithmus kennt die komplette Folge* σ *im Voraus.*

Wir nennen

$$\overline{C} := \frac{B}{1-\beta} \quad (6)$$

die kritischen Kosten. Der Wert $\overline{C}$ *bezeichnet den Kostenschwellwert, ab dem es billiger wird, eine Bahncard zu kaufen, wenn aktuelle Fahrkosten von* $\overline{C}$ *anliegen. Wir erhalten das Skifahrerproblem als Spezialfall des Bahncard-Problems, wenn die Gültigkeitsdauer* T *einer Bahncard unendlich und der Discount-Faktor* β *gleich Null ist. Das Deutsche Bahncard-Problem erhält man mit* $B = 240, T = 1$ *Jahr und* $\beta = 1/2$ *(alte (2005!) Bahncard 50!!)*

Algorithmus BCSUM: Wenn bei der Anfrage $r_i = (t_i, p_i)$ *keine gültige Bahncard vorhanden ist, dann kaufe eine Bahncard, falls die regulären Kosten* $p^{(t_i - T, t_i)}(\sigma)$ *für BCSUM im Zeitintervall* $(t_i - T, T_i]$ *mindestens den Wert* $\overline{C}$ *erreichen (bei den Kosten im Intervall* $(t_i - T, T_i]$ *werden die Kosten für* r_i *mitgerechnet.*

Satz: BCSUM ist $(2-\beta)$-kompetitiv.

Strategie 1: Wir bestellen/fertigen bereits anlässlich des ersten Abgangs ein komplettes Los (siehe Skifahrerproblem). Im „worst case“ folgt jetzt kein weiterer Abgang. Damit muss der einzige, erste Abgang die Kosten für das gesamte Los tragen: $k = Q \cdot k^{stk} + k^{rüs}$. Der *Grausame Adversary* weiß, dass es bei diesem einzigen Abgang bleibt und bestellt/fertigt nur diese eine Einheit. Wenn wir unsere Kosten zu den Kosten des *Grausamen Adversary* ins Verhältnis setzen, heißt das:

Kosten der Strategie 1: Kosten des *Grausamen Adversary* =

$$\frac{(Q \cdot k^{stk} + k^{rüs})}{(k^{stk} + k^{rüs})}$$

Um dieses Verhältnis zu verbessern, verändern wir unser Verhalten: Wir bestellen/fertigen zunächst auch nur eine Einheit.

Das setzen wir so fort. Der *Grausame Adversary* macht genau dasselbe. Aber irgendwann bestellen/fertigen wir ein komplettes Los. Dann produziert der *Grausame Adversary* noch eine Einheit (genau diese letzte) und stellt den Abgang ein. Wir haben ($Q - 1$) Einheiten ohne Abgang gefertigt/bestellt, die jetzt einen bleibenden Lagerbestand bilden und kostenseitig auf die bisher gefertigen Einheiten umzulegen sind. Aber: Unser Verhältnis gegenüber dem *Grausame Adversary* wird immer besser. Also sollten wir „die Nerven behalten“ und nie ein Los bestellen/fertigen. Dazu müssen wir aber die zweite Situation untersuchen.

Strategie 2: Wir fertigen/bestellen nie ein Los. Der *Grausame Adversary* weiß aber, dass in Zukunft ständig ein Abgang zu verzeichnen ist; er löst daher bereits beim ersten Abgang ein Fertigungs-/Bestell-Los aus. Er kann daher ausschließlich auf Einheiten mit reduzierten Fertigungs-/Bestellkosten zurückgreifen. Damit gilt:

Kosten der Strategie 2: Kosten des *Grausamen Adversary* =

$$\frac{(k^{stk} + k^{rüs})}{(Q \cdot k^{stk} + k^{rüs}) / Q}$$

Um dieses Verhältnis zu verbessern, ändern wir auch hier unser Verhalten: Wir bestellen/fertigen für i Abgänge jeweils eine Einheit. Irgendwann bestellen/fertigen wir doch ein Los (worauf der *Grausame Adversary* die für uns ungünstigste Entscheidung trifft). Also differenziert der *Grausame Adversary* dank seines Wissens über die Zukunft sein Verhalten in Abhängigkeit von unserem Verhalten immer so, dass wir „denkbar schlecht aussehen". Wir dagegen können nur die beiden Extreme (1 Los für nur einen Abgang einer Einheit), (Einzelfertigung/-bestellung für unendlich viele Abgänge) vermeiden. Also müssten wir eine Schranke i von Abgängen setzen, ab der wir ein Los fertigen/bestellen. Und diese Schranke müssen wir so wählen, dass sie nicht bspw. bei Strategie 1/Situation 1 zu einem großen Verhältniswert und bei Strategie 2/Situation 2 zu einem kleinen Verhältniswert führt. Um das eleganter zu sagen: Wir müssen diese Schranke i so wählen, dass sie für Situation 1 und für Situation 2 zum selben Verhältnis führt; das ist das im Sinne der Online Optimierung optimale, da minimale Verhältnis.

Die Kosten der hier anzuwendenden Fertigungsstrategie sind

$$[(i-1)(k^{stk}+k^{rüs})+(Q\cdot k^{stk}+k^{rüs})]:(Q+i-1)$$

Diese Kosten sind einmal gegen $(k^{stk}+k^{rüs})$, im anderen Fall gegen $(Q\cdot k^{stk}+k^{rüs})/Q$ zu vergleichen.

Wir wählen als Beispiel: $Q=10, k^{stk}=3\cdot k^{rüs}$. Dann wählt der *Grausame Adversary* ohne Losgröße konstante Kosten von $k=4$, mit Losgröße von $k=3{,}1$. Zusätzlich legen wir jetzt $i=8$ fest.

Wenn wir jetzt den Fall: „Wir machen irgendwann ein Los, der *Grausame Adversary* macht kein Los" anschauen, dann haben wir mit den gewählten Zahlen ein Verhältnis von $59:32$ (für $i=8$), im Fall „Wir machen erst nach i Abgängen ein Los, der *Grausame Adversary* sofort", ein Verhältnis

von $(59:17)/(31:10)$ also $\frac{59 \cdot 10}{17 \cdot 31}$ = 1,1195. Also müssen wir das erste Verhältnis verkleinern (1,843) und das zweite erhöhen.

Wir verwenden versuchsweise $i = 20$ Stück bei sonst unveränderten Werten ($Q = 10$, $k^{stk} = 3 \cdot k^{rüs}$), Das ergibt in der einen Situation $80 \cdot k^{rüs}$ für den *Grausamen Adversary* und $(80 \cdot k^{rüs} + 27 \cdot k^{rüs})$ für die *Fertigungsstrategie*. Also ist hier das Verhältnis $(107:80) = 1{,}3375$. Auf der anderen Seite erhalten wir: $(31:10)$ für den *Grausamen Adversary*, $(20 \cdot 4 + 10 \cdot 3{,}1)/30$ für die *Fertigungsstrategie*. Also wird das Verhältnis in der zweiten Situation $(3{,}7/3{,}1) = 1{,}1935$. Also sind die Verhältnisse schon vergleichbar.

Unser Ansatz sieht nicht mehr so elegant wie in Krumke und Rambau (2005) aus, wenn wir die beiden Situationen gleich setzen:

$$[([i-1] \cdot (k^{stk} + k^{rüs}) + (Q \cdot k^{stk} + k^{rüs}))/(Q + i - 1)]/[(Q \cdot k^{stk} + k^{rüs})/Q] =$$
$$[([i-1] \cdot (k^{stk} + k^{rüs}) + (Q \cdot k^{stk} + k^{rüs}))/i]/(i \cdot (k^{stk} + k^{rüs})/i]$$

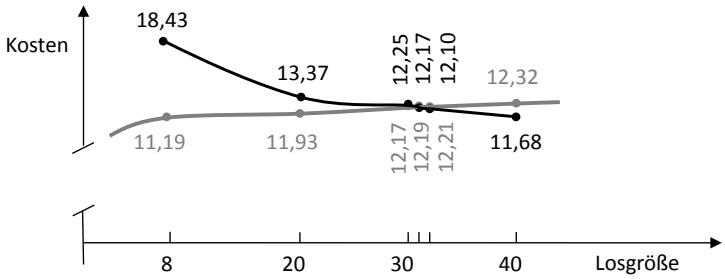
Wir berechnen diesen Ausdruck und lösen nach der Anzahl i der abzuwartenden Bestellungen auf:

$$i = \frac{Q \cdot k^{stk} + k^{rüs}}{k^{rüs}}$$

Allerdings bedeutet $(i \cdot (k^{stk} + k^{rüs})/i) = (k^{stk} + k^{rüs})$ im Nenner der rechten Seite, dass der *Grausame Adversary* auch bei einer Anzahl von Abgängen, die weit größer als die Anzahl Einheiten eines Loses ist, immer noch keine Losbildung macht. Also stellen wir mögliche Beispiele zusammen:

i	Situation 1	Situation 2
8	1,843	1,1195

i	Situation 1	Situation 2
20	1,3375	1,1935
30	1,225	1,217
31	1,217 (151/124)	1,219 (155 : 41)/3,1
32	1,2109 (155/128)	1,221 (159 : 42)/3,1
40	1,168	1,232



Wir verwenden unsere Gleichung von oben und vergleichen:

$$((i-1)\cdot 4+31)/(9+i)/(3{,}1) = (((i-1)\cdot 4+31)/i)/4$$

$$i = \frac{6{,}975}{0{,}225} = 31$$

Das war mit den gemachten Anmerkungen zu zeigen: Wir sind in diesem Fall besser als 1,25, wenn wir ca. 3 Lose abwarten.

Die folgende Tabelle zeigt für unterschiedliche Verhältnisse $k^{stk}/k^{rüs}$ und unterschiedliche Losgrößen die sich ergebenden i-Werte.

i	n	1/100	1/10	1/5	1/4	1/2	1	2	3	4	5
Q	5	1,05	1,5	2	2,25	3,5	6	11	16	21	26
	10	1,1	2	3	3,5	6	11	21	31	41	51

	15	1,15	2,5	4	4,75	8,5	16	31	46	61	76
	20	1,2	3	5	6	11	21	41	61	81	101
	50	1,5	6	11	13,5	26	51	101	151	201	251

$$k^{stk} = n \cdot k^{rüs}, Q = \{5,10,15,20,50\}, i \ldots \text{Stückzahl}$$

Wir erhalten allgemein für das Verhältnis (online Kosten)/(offline Kosten):

$$\frac{Q \cdot k^{stk}(k^{stk} + 2k^{rüs}) + (k^{rüs})^2}{k^{stk}(Q \cdot k^{stk} + (Q+1) \cdot k^{rüs}) + (k^{rüs})^2}$$

Wir verweisen auf das Bahncardproblem, in dem ja auch davon ausgegangen wird, dass nach der einen Bahncard noch weitere Bahncards bzw. Entscheidungsprobleme folgen. Auch hier gehen wir davon aus, dass nach Aufbrauchen des Loses weitere Abgänge und irgendwann die Entscheidung für ein weiteres Los folgen. Natürlich kann die dauernde Fertigung in Losen dann im Nachhinein/für den Offline-Optimierer die bestmögliche Lösung sein. Das fragen wir hier ja nicht. Die Antwort ist vielmehr: Mit unserem Vorschlag sind wir in keinem Fall schlechter als bspw. 1,25 × das Optimum.

Wir verweisen ein zweites Mal auf das Bahncardproblem: Dort wird von Bahnfahrten mit unterschiedlichen Preisen ausgegangen. Diese Betrachtung können wir auch auf unseren Fall übertragen: Wir gehen von Abgängen mit einer Stückzahl von > 0 aus. Dann gilt - da wir keine zeitlichen Abstände und keine Lagerhaltungskosten berücksichtigen - das bisher Gesagte genauso: Wir kumulieren dann nicht die Abgangsereignisse, sondern die Abgangsstückzahlen.

Literatur

Dangelmaier, W. Online-Optimierungsansätze zur Steuerung der Produktion in der Serienfertigung. In: Schenk, M. (Hrsg.): Logistik – Effiziente und sichere Warenketten in Industrie und Handel. 11. IFF-Wissenschaftstage 25./26. Juni 2008. Tagungsband S. 145-154. Magdeburg: Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung 2008.

Danne, Ch. / Blecken, A. / Dangelmaier, W. Complexity-Induced uncertainty in Supply chains – A Framework and Case Studies. In: Pfohl, H.-Ch.; Wimmer, Th. (Hrsg.): Wissenschaft und Praxis im Dialog. Robuste und sichere Logistiksysteme. S. 71-88. 4. Wissenschaftssymposium Logistik. Hamburg: Deutscher Verkehrsverlag 2008.

Krumke, S. O. / Rambau, J. Online Optimierung. Vorlesungsskript. Berlin: Technische Universität 2005.

Intelligenter Störungsassistent im Serienanlauf als Industrie 4.0-Anwendungsfall

Dieter Spath, Bastian Pokorni, Oliver Ganschar, Sebastian Schlund

1 Einleitung

Der Serienanlauf stellt die kritischste Phase innerhalb des Produktentstehungsprozesses dar. Erstmalig wird ein neues Produkt unter Serienbedingungen produziert. Im Mittelpunkt steht die Erreichung der Qualitäts-, Zeit- und Kostenziele. Der Erreichung der Ziele stehen eine geringe Prozessreife, ein geringer Standardisierungsgrad, unerfahrene Mitarbeiter sowie eine multidisziplinäre Zusammenarbeit mit ungeklärten, wechselnden Verantwortlichkeiten und komplexen Informationsflüssen im Unternehmen entgegen. Dies bedingt eine Vielzahl unterschiedlicher Störungen, deren effiziente Handhabung zum großen Teil den Erfolg eines Serienanlaufs determiniert.

Eine zentrale Aufgabe innerhalb des Anlaufmanagements ist somit das Störungsmanagement. Störungen sind unvorhersehbare Ereignisse wie mangelnde Prozessreifen, Zulieferteile mit Qualitätsmängeln sowie Konstruktionsmängel. Der hiermit verbundene ablauforganisatorische Umgang stellt Unternehmen vor große Herausforderungen, da im Serienanlauf knappe Expertenressourcen und nicht standardisierte Abläufe die Durchlaufzeit zur Störungsbehebung verlängern.

Heutige Bemühungen ein effektives und effizientes Störungsmanagement innerhalb des Serienanlaufs zu betreiben, scheitern heute an den geeigneten Hilfsmitteln und systemtechnischer Unterstützung zur Beschleunigung des gesamten Störungsmanagement-Prozesses. Hierbei bietet Industrie 4.0 neue Möglichkeiten hinsichtlich der Prozessgestaltung innerhalb der Produktion und Kommunikation/Interaktion zwischen Menschen sowie zwischen Menschen und Maschinen. Es ermöglicht die

dezentrale Nutzung von aktuellen Produktionsdaten und die Ad-hoc-Vernetzung zwischen Menschen innerhalb einer Fabrik.

In diesem Beitrag werden die Potenziale eines ganzheitlichen reaktiven Störungsmanagement-Systems, in dem der Mensch als „universeller Sensor“ agiert, als Industrie 4.0-Anwendungsfall für den Serienanlauf innerhalb der Produktion und speziell in der manuellen Montage aufgezeigt und adressiert folgende Hypothese:

Die Vernetzung der Mitarbeiter und Maschinen in der Produktion unter Einsatz von Mobilgeräten, führt zu einer effektiveren und effizienteren Reaktionsmöglichkeit bei Eintritt unvorhersehbarer Ereignisse.

2 Störungsmanagement

Als Störungen lassen sich alle Abweichungen von geplanten Prozessabläufen und -ergebnissen bezeichnen (Fischäder, 2007). Je nach Auswirkungen der Störungen können sie dementsprechend zu einer Minderung der beabsichtigten Leistung. In der manuellen Montage können alle Beeinträchtigungen des Arbeitsablaufs als Störung bezeichnet werden, wie bspw. fehlendes Material, nicht montierbare Bauteile oder fehlendes Werkzeug.

Für den vorliegenden Beitrag wird das Verständnis von Störungen wie folgt definiert: Störungen sind unvorhersehbare Ereignisse, die den geplanten Betriebsablauf stören und dementsprechenden Handlungsbedarf erfordern. Das Störungsmanagement beschreibt den Umgang mit auftretenden unvorhersehbaren Ereignissen.

2.1 Strategien im Störungsmanagement

Das Störungsmanagement lässt sich in drei Ebenen einteilen:

- Präventives Störungsmanagement (strategisch-taktische Aufgabe)
- Abwehr von Störungen (taktisch-operative Aufgabe)

- Reaktives Störungsmanagement (operative Aufgabe) (Fischäder, 2007)

Präventive Maßnahmen im Störungsmanagement werden heute in den meisten Unternehmen eingesetzt. Hierzu zählen Risikomanagementstrategien wie FMEA-Maßnahmen, ausgiebige Planungsmethoden wie Design for X-Ansätze und Simulationen der späteren Abläufe und Prozesse. Auch die mittelfristige Abwehr von Störungen wird heute adressiert, indem Ressourcen für Störungen bereitgestellt werden. Dies führt dazu, dass die Anzahl an Störungen stark vermindert werden kann. Bedingt durch die bereits geschilderten Herausforderungen die steigende Komplexität in Produkten und Prozessen zu beherrschen, mit einer Vielzahl an Änderungen umzugehen, einem stetig wachsenden Qualitätsanspruch sowie einer hohen Marktvolatilität gerecht zu werden, kann nach wie vor eine Vielzahl an Störungen nicht durch präventive Maßnahmen verhindert werden. Der Umgang mit Störungen verursacht hohe Kosten und Zeitverzüge, da knappe Expertenressourcen im Serienanlauf durch sogenannte Feuerwehr-Einsätze gebunden werden. Gerade auf reaktive Störungs-Maßnahmen fällt heute ein wesentlicher Anteil der Steuerungstätigkeiten innerhalb des Anlaufmanagements und beinhaltet drei Phasen:

- Störungserkennung (Abweichung wird erkannt)
- Lösungsmanagement (Lösung wird identifiziert)
- Störungsbehandlung (Störung wird mit identifizierter Lösung behoben) (Pulter et al., 2010)

Die Abbildung dieser Phasen innerhalb des Serienanlaufs verursacht heute teure Sonderprozesse.

2.2 Serienanlauf und Auswirkungen von Störungen in dieser Phase

Der Serienanlauf beschreibt den Zeitraum zwischen abgeschlossener Produktentwicklung und der vollen Kapazitätserreichung (Wiesinger & Housein, 2002). Zielsetzung im Serienanlauf ist die termingerechte

Erreichung der Zielproduktionsmenge (Kammlinie) unter Einhaltung der Qualitäts- und Kosten- und Terminziele (Romberg & Haas, 2005). Darüber hinaus ist die Phase des Serienanlaufs dadurch gekennzeichnet, dass technische und ablauforganisatorische Prozesse noch nicht die finale Reife besitzen und somit ein hohes Risiko für den Auftritt von Störungen besteht. Diese können die Zielkriterien Kosten, Qualität sowie die Time-to-Market erheblich beeinträchtigen. Die Bedeutung von Störungen nimmt speziell im Serienanlauf kontinuierlich zu (Scholz-Reiter & Krohne, 2010).

2.3 Reaktives Störungsmanagement im Serienanlauf

Das reaktive Störungsmanagement lässt sich in die in Abbildung 1 abgebildeten Anforderungen unterteilen. Reaktionsstrategien werden präventiv festgelegt, um schnell einen Standard-Prozess bei Störungen durchzuführen. Hierdurch können knappe Expertenressourcen effizient genutzt werden. Für die Abarbeitungsreihenfolge wird festgelegt, welche Störung priorisiert behoben wird. Dies kann anhand der Auswirkungen des Ereignisses erfolgen. Werden Störungen nicht behoben, treten Eskalationsroutinen in den Vordergrund, um den Behebungsprozess zu beschleunigen. Während des Störungsmanagementprozesses ist die Transparenz für alle Beteiligten wichtig, um den jeweiligen Abarbeitungsstatus zu kennen und eine redundante Bearbeitung von Störungen zu vermeiden. Die nachhaltige Behebung setzt die Identifikation der Störungsursache, die vollständige Beseitigung sowie eine vollständige Dokumentation voraus.

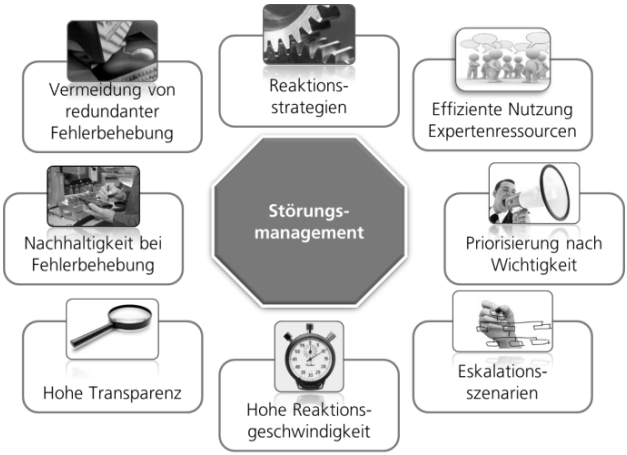


Abbildung 1: Anforderungen an effizientes Störungsmanagement

2.4 Handlungsbedarf im heutigen Störungsmanagement

Heutiges reaktives Störungsmanagement ist in vielen Fällen durch eine nicht standardisierte, manuelle, papierbasierte Aufnahme von Störungen gekennzeichnet. Dabei sind die Inhalte häufig unvollständig und miss- oder unverständlich. Ursächlich sind unter anderem Kommunikationsbarrieren zwischen Experten und den störungserfassenden Mitarbeitern (Meyer et al., 2014). Auf den Ablaufprozess bezogen, kennzeichnet heutige Störungsmanagement-Ansätze lange Durchlaufzeiten zwischen Störungsauftritt und Störungsbehebung. Inhaltlich liegen die Potenziale der Optimierung in der Art der Erfassung, Klassifizierung, Zuweisung, Eskalation und Dokumentation von Störungen.

Wie bereits beschrieben, lässt sich gemäß Abbildung 2 der Störungsmanagement-Prozess in die Segmente Störungserkennung, Lösungsmanagement und Störungsbehandlung einteilen. Nachfolgend wird der Handlungsbedarf je Segment erörtert.

Abbildung 2: Prozessablauf heutiger Störungsmanagement-Strategien

Störungserkennung

Im Serienanlauf können viele Störungen in manuellen Montagesystemen nicht technologisch erkannt werden. Die Verantwortlichen sind auf die Mitarbeiter vor Ort angewiesen. In heutigen Prozessen wird bei Auftritt einer Störung die Information unter Nutzung unterschiedlicher Kommunikationsmedien an den zuständigen Anlaufmanager, nicht standardisiert, weitergeleitet (asynchron: E-Mail, Störzettel; synchron: verbal persönlich, verbal Telefon). Der verantwortliche Anlaufmanager muss anhand der vorliegenden Informationen einen entsprechenden Experten für die Lösung des Problems identifizieren und diesen beauftragen.

Lösungsmanagement

Bedingt durch zahlreiche organisatorische Schnittstellen, unklare Rollen und Verantwortlichkeiten innerhalb der räumlich verteilten interdisziplinären Anlauforganisation, wird die Störung erst mit Zeitverlust an den richtigen Verantwortlichen weitergeleitet. Der Experte ist bei der Lösungsfindung zunächst auf die Informationen des Anlaufmanagers bzw. den Störangaben des Mitarbeiters beschränkt und macht sich vor Ort ein Bild der Störung, um die richtigen Maßnahmen einleiten zu können. Hier kann es zu zusätzlichen Zeitverlusten kommen, da Expertenressourcen gerade in KMU ohne spezielle Anlauforganisation knapp sind.

Störungsbehandlung

Bei der Störungsbehandlung ist der Experte auf sein Know-How limitiert und kann sich nur mittels Telefon synchron mit weiteren Experten im Unternehmen für einen Austausch vernetzen. Eine begleitende Dokumentation der Störungsbehandlung erfolgt heutzutage aufwendig und

ohne systemtechnische Unterstützung. Die nachträgliche standardisierte Dokumentation entfällt aus Gründen der Zeitknappheit in den meisten Fällen.

Von der Störungserkennung über das Lösungsmanagement bis hin zu der Störungsbehandlung nimmt diese Art der Prozessgestaltung viel Zeit in Anspruch. Hinzu kommt die fehlende Transparenz während des Prozesses. Kernproblematik heutiger Störungsmanagement-Prozesse sind somit die unklaren Verantwortlichen/Rollen sowie die fehlende systemtechnische Unterstützung der Akteure innerhalb der jeweiligen Störungsmanagement-Phase im Serienanlauf. Hierbei wird deutlich, dass die Reibungsverluste bei Auftritt von technischen Störungen durch organisatorische Barrieren potenziert werden und die Anlaufziele in allen Dimensionen (Qualität, Time-to-Market, Kosten) erheblich negativ beeinflussen. Die organisatorische Geschwindigkeit ist entscheidend bei dem Umgang mit unvorhersehbaren Ereignissen.

2.5 Heutige Störungsmanagement-Strategien

Außerhalb des Serienanlaufs existieren unterschiedliche IT-Systeme und Workflow-Unterstützungssysteme zur Optimierung des Störungsmanagements, wie z.B. das Issue-Tracking-System.

Issue-Tracking-Systeme

Außerhalb des Serienanlaufs existiert ein systemgestütztes Störungsmanagement in den meisten Unternehmen bereits heute. Im Bereich des IT-Supports können Mitarbeiter Störungen über sogenannte Issue-Tracking-Systeme oder auch Ticketing-Systeme an die IT-Abteilung melden. Diese Systeme bilden i.d.R. die Bearbeitungsstufen Empfang, Bestätigung, Klassifizierung sowie die Bearbeitung von Störungen ab. Auch im Bereich der Produktion werden für zentrale Dienste wie das Qualitätswesen Ticketing-Systeme eingesetzt, welche auf denselben Funktionalitäten basieren (Kurbel, 2008). Standard-Ticketing-Systeme basieren meist auf einer rein textlichen Darstellung wenig komplexer Störungen und sind primär nicht als Kommunikationsplattform ausgelegt

(Informationsfluss ausschließlich zwischen störungsmeldender Person und störungsbehebender Person). Die Dokumentation der Störungsbehebung zur Nutzung durch andere Unternehmensfunktionen ist kein Bestandteil bisheriger Systeme (Hull, Mending & Tai, 2010). Für den Serienanlauf steht besonders Schnelligkeit bei der Behebung von auftretenden Störungen im Mittelpunkt. Der effiziente Zugang zu Expertenwissen bzw. die Archivierung von Lösungswegen für zukünftige Störungsereignisse und die Nutzung dieser Informationen für vor- und nachgelagerte Prozesse sind dabei entscheidend für einen erfolgreichen Serienanlauf. Die spezifischen Anforderungen aus dieser Phase werden von üblichen Ticketing-Systemen nicht umfassend gelöst.

Präventives Störungsmanagement mittels Preventive Maintenance, Big Data und Data Mining

Durch Industrie 4.0 bietet sich durch die Vernetzung von Anlagen und den Einsatz von Sensoren die Möglichkeit, Zustände von Anlagen echtzeitnah zu erfassen (condition monitoring). Dabei wird das Ziel verfolgt aus den Veränderungen von Zustandsdaten der Maschinen, Anlagen und Einrichtungen Schlüsse über Wartungsbedarfe (preventive maintenance) oder drohende Störungsfälle zu ziehen. Big Data bezeichnet in diesem Zusammenhang die Datenmenge, Heterogenität sowie die Frequenz der Daten. Der Umgang mit „Big Data“ erfordert den Einsatz von Data Mining-Techniken, um automatisiert Datenströme (aus verschiedenen Datenquellen) zu überwachen und Abweichungen der Zustände von Zielzuständen sowie Trends zu detektieren (Bitkom, 2012). Voraussetzung für erfolgreiches präventives Störungsmanagement sind die Erfassung und Auswertung relevanter Prozessdaten über längere Zeiträume. Um Prognosen über das Ausfallverhalten von Elementen innerhalb eines Produktionssystems erstellen zu können, muss die Ursache-Wirkungsbeziehung bekannt und beschrieben werden können (Schöning, 2014). Für den Serienanlauf in dem nur eine sehr kurze Zeit zur Reifmachung aller notwendigen Prozesse zur Verfügung steht, können dementsprechend diese Art der Verfahren nur bedingt eingesetzt werden.

Des Weiteren lassen sich nicht vollständig umfänglich alle relevanten Daten in der manuellen Montage technologisch erfassen.

Auch moderne MES-Systeme bieten die Möglichkeit, das Störungsmanagement innerhalb der Produktion zu optimieren. Diese alarmieren automatisch (per Email, SMS etc.) die in einem definierten Workflow hinterlegten Verantwortlichen bei Abweichungen von Zielwerten und beinhalten vordefinierte Eskalationsstufen (Schumacher, 2009). Auch dieses Einsatzszenario setzt voraus, dass die Datenbasis im Sinne von definierten Zielparametern vorhanden ist und der Zusammenhang zwischen Grenzwertverletzungen und der Eintritt von Störungen bekannt ist. Im Serienanlauf sind Prozesse noch nicht ausgereift und unterliegen bis zum Schluss Änderungen, die unvorhersehbare noch nicht systemtechnisch abgebildete Ereignisse verursachen.

Der vorliegende Beitrag fokussiert die reaktiven Maßnahmen im Falle einer Störung während des Serienanlaufs in der manuellen Montage. Auch zukünftig werden aufgrund der steigenden Komplexitäten unvorhersehbare Ereignisse im Serienanlauf technisch nicht vollständig präventiv eliminiert werden können, so dass auch zukünftig Strategien zum reaktiven Störungsmanagement genutzt werden. Vielmehr steht der Mensch im Fokus, Abweichungen oder drohende Störungen zu identifizieren und weiterzuleiten.

3 Der Mensch als universeller Sensor in einer Industrie 4.0

Die vierte industrielle Revolution, definiert in der Hightech-Strategie der Bundesregierung, stellt eine Maßnahme zur Sicherung Deutschlands als Produktionsstandort dar. Kernidee ist dabei die intelligente Vernetzung von Maschinen auf Basis Cyberphysischer Systeme zu einer Smart Factory. Hierdurch sollen Flexibilität, Wandlungsfähigkeit, Ressourceneffizienz, Reaktionszeiten sowie die Produktivität erheblich verbessert werden (Böhler, 2012; Jaspernite, 2012;). Auch die Rolle des Menschen hinsichtlich seiner Arbeitsumgebung und -inhalte werden sich verändern (Plattform Industrie 4.0, 2014).

3.1 Geänderte Rolle des Produktionsarbeiters 4.0

Die Rolle des Menschen in Cyberphysischen Produktionssystemen wird sich ändern. Jedoch werden diese Systeme auch zukünftig den Menschen nicht ersetzen können (Spath et al., 2013). Dies gilt sowohl für die kreativen Komponenten wie im planerischen Bereich hinsichtlich des Entwerfens und Gestalten von Produkten und Produktionsanlagen als auch für operative Tätigkeiten innerhalb der Produktion: die Arbeitsinhalte für Mitarbeiter in der Produktion werden sich dabei von der rein operativen Tätigkeit hin zu regulierenden und steuernden Tätigkeiten entwickeln. Dies bedeutet die gleichzeitige Änderung der Anforderungen an die Beschäftigten in zukünftigen Cyberphysischen Produktionssystemen. Der Mensch muss hierin vermehrt die Rolle eines Entscheiders und Initiators von Verbesserungsmaßnahmen einnehmen (Sendler et al., 2013). Durch diesen Wandel werden die Arbeitsinhalte, -prozesse sowie die hierfür benötigten Kompetenzen des Mitarbeiters einem Wandel unterliegen: erhöhte Anforderungen der Fähigkeiten im Bereich Problemlösung, selbststeuerndem Handeln, Kommunikation und Selbstorganisation (Spath et al., 2013).

Der Mensch als Sensor

Der Mensch wird zukünftig technologische/sensorische Lücken schließen. Dies liegt darin begründet, dass trotz Nutzung von Prinzipien künstlicher Intelligenz und selbstlernender Systeme, komplexe Situationen und Bereiche bestehen bleiben, die nur durch den Menschen und dessen Fähigkeiten gelöst werden können (Spath et al., 2012). Speziell im Serienanlauf werden Störungen nicht vollständig mit Hilfe von Sensoren erfasst. Der Mensch schließt diese Lücke mit den notwendigen Informationen.

Der Mensch als Entscheider

Durch Auftreten von unbekannten bzw. in den Systemen nicht berücksichtigten Situationen, wird der Mensch auch zukünftig die Rolle des Entscheiders übernehmen und operativ steuernd eingreifen. Auch zukünftig

werden nur wenig Systeme auf alle Eventualitäten ausgelegt sein (Spath et al., 2012). In Störungsfällen können durch Algorithmen Lösungsvorschläge gemacht werden, die Auswahl der situationsspezifischen Lösung kann jedoch in vielen Fällen, aufgrund der Komplexität hinsichtlich der Betrachtung des Gesamtsystems, nur der Mensch treffen.

Der Mensch als Akteur

Der Mensch wird sich zukünftig noch stärker hohen Anforderungen an die zeitliche, inhaltliche und räumliche Flexibilität stellen. Intelligente Assistenzsysteme unterstützen den Mitarbeiter hierbei. Der Einsatz von Mobilgeräten ermöglicht bspw. die mobile Nutzung aktueller Kundenaufträge und eine auf die Arbeitsaufgabe abgestimmte Auftragsinformation sowie notwendige, kontextbasierte Anleitungen (Spath et al., 2012). Gerade im Serienanlauf sind die auszuführenden Tätigkeiten komplex und erstmalig. Da die Anzahl der Serienanläufe in produzierenden Unternehmen deutlich steigt, wird der Mitarbeiter der Zukunft sich zeitlich, inhaltlich und räumlich flexibel an diese Tätigkeiten anpassen müssen. Die Produktionsarbeit der Zukunft wird vermehrt Anteile von Wissensarbeit beinhalten, vor allem im Serienanlauf. Dabei können bzw. müssen zukünftig die Mitarbeiter echtzeitnahe Informationen mobil nutzen und sich mit verteilten Ressourcen dezentral abstimmen.

Abbildung 3 veranschaulicht die zukünftige Aufgaben-Typologie eines Produktionsarbeiters.

Abbildung 3: Geänderte Rolle des Menschen in der Produktionsarbeit 4.0

Der Mensch benötigt in komplexen Situationen innerhalb der Produktion Unterstützung und eine Zugangsmöglichkeit in die Cyberphysischen Produktionssyteme. Dies erfordert den Einsatz dezentral nutzbarer Endgeräte und neue Arten der Mensch-System-Interaktion. Die flexible und schnelle Reaktion auf geänderte Anforderungen und unvorhersehbare Ereignisse in Cyberphysischen Produktionssystemen erfordern den Einsatz von Web2.0-Ansätzen zur Selbstorganisation der Mitarbeiter.

3.2 Wirkmechanismus und technologische Elemente von Industrie 4.0

Dezentrale Selbstorganisation

Im Umfeld von Industrie 4.0 steht die dezentrale Selbstorganisation mittels Cyberphysicher Systeme im Mittelpunkt der Betrachtung. Die gesteigerten Anforderungen an Unternehmen hinsichtlich der Flexibilität erfordern auch von Mitarbeitern in Cyberphysischen Produktionssystemen flexible Reaktionen. Vorgeplante Planungsprozesse und Produktionssysteme werden durch autonome Ad-hoc-Vernetzungen zwischen Akteuren ersetzt. So zeigt das Forschungsprojekt KapaflexCy wie ein solches Zusammenspiel

zwischen höchster Flexibilität der Produktionseinrichtungen und den operativen Mitarbeitern zukünftig aussehen kann. Bedingt durch immer kürzere Schwankungszyklen, müssen Unternehmen den Personaleinsatz zukünftig schneller steuern, um bei zu wenig Personal nicht in einen Verzug zu geraten sowie bei zu viel Personal Verluste zu vermeiden. Die Kapazitätsanpassung erfolgt in KapaflexcCy mittels Mobilgeräten und kompetenz- sowie arbeitszeitkontoabhängigen Einsatzanfragen von Produktionseinheiten und Vorgesetzten. Die von den Mitarbeitern empfangene Einsatzanfrage bspw. zu einer potenziellen Zusatzschicht kann von den Mitarbeitern untereinander, dezentral und kooperativ organisiert und beantwortet werden (KapaflexCy, 2014).

Dieses Szenario verdeutlicht die neue Arbeitsweise innerhalb von Cyberphysischen Produktionssystemen hin zu mehr Autonomie, Dezentralität und Selbstorganisation zwischen den Mitarbeitern.

Mobilgeräte

Die Vernetzung der Menschen bzw. der Menschen mit Maschinen, kann durch Mobilgeräte oder sogenannte Smart Devices erfolgen. Hierunter werden alle mobilen, internetfähigen Geräte wie Laptop, Tablet-PC, Smartphones, Datenbrillen und Datenuhren zusammengefasst (Hommes, 2012). Diese bieten dem Menschen den Zugang in das Cyberphysische Produktionssystem. Der Einsatz von mobilen Anwendungen zur Vernetzung, führt zu neuen Möglichkeiten, Mitarbeiter einzusetzen und Abläufe zu optimieren (Spath et al., 2013). KapaflexCy zeigt als Beispiel, wie der herkömmliche Ablaufprozess der Kapazitätsplanung durch mobile Anwendungen beschleunigt und durch zusätzliche Funktionen angereichert werden kann.

Der Einsatz von Mobilgeräten innerhalb der Produktion schafft eine Mensch-Maschine-Schnittstelle, welche die dezentrale Nutzung echtzeitorientierter Produktionsdaten sowie die Realisierung von schnellen Ad-hoc-Vernetzungen unabhängig von räumlicher Nähe sowie organisatorischen Grenzen ermöglicht. Unternehmen sehen heute schon

das Potenzial in der Nutzung von Mobilgeräten im Zusammenhang mit aktuellen Produktionsdaten, wie Abbildung 4 zeigt.

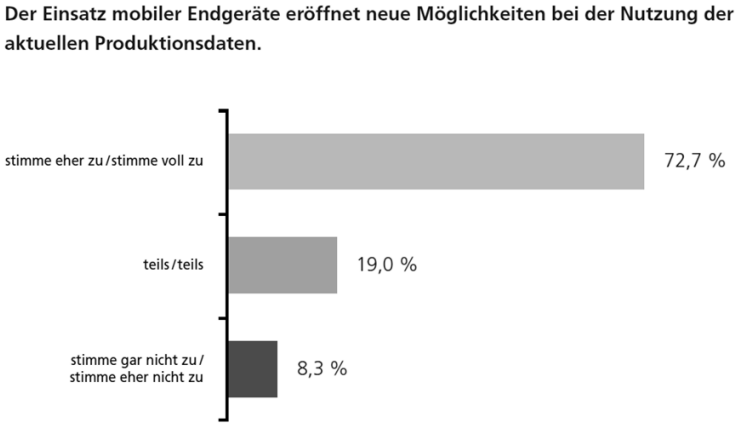


Abbildung 4: Einsatz von Mobilgeräten eröffnet neue Nutzenpotenziale (Spath et al., 2013)

Die erwarteten Potenziale bezüglich der Nutzung mobiler Endgeräte in der Produktion liegen bspw. in heutigen nutzenüberschreitenden Aufwänden begründet. Im Bereich der Dokumentation von Situationen in der Produktion wird durch den Einsatz neuer technischer Möglichkeiten eine erhebliche Beschleunigung des Ablaufs erwartet. Situationen können schneller und in besserer Qualität multimodal aufgenommen werden (Spath et al., 2013).

Web 2.0-Ansätze in der Produktion

Mobilgeräte schaffen die Grundlage der mobilen Interaktion zwischen Menschen und Menschen mit Maschinen in der Produktion. Um mobile Kommunikation im Produktionsablauf zu realisieren, wird auch die Frage nach der Durchdringung von Web 2.0-Ansätzen in der Produktion diskutiert. Web 2.0 drückt die Orientierung des Internets hinsichtlich interaktiver und kollaborativer Elemente aus. Dies bedeutet, dass nicht die Weiterentwicklung der Technologie beschrieben wird, sondern eine

veränderte sozio-technischer Nutzung des Internets (Grahl, 2011). Unter Web 2.0 wird die evolutionäre Weiterentwicklung der zuvor textbasierten Internetnutzung um Video und Audioinhalte erweiterte Nutzung verstanden (Rich-Media-Komponente). Zum anderen wird darunter eine Veränderung der Inhalts-Nutzung und Interaktionsmöglichkeiten verstanden, was sich in der Schaffung von Blogs, Wikis oder Diskussionsforen zeigt (User Generated Content) (Raake & Hilker, 2013). Auch Social Media stellt eine Ausprägung von Web 2.0 dar und verbindet Kommunikations-, Kollaborations-, Multimedia- und Unterhaltungselemente.

Web 2.0 Elemente die heute schon im Unternehmenseinsatz Mehrwerte darstellen, sind Microblog- und Social Enterprise-Lösungen sowie Unternehmens-Wikis (Wolf, 2012). Auch innerhalb der Produktion wird erwartet, dass vermehrt Elemente von Social Media Einzug finden (Spath et al., 2013). Dabei stehen Situationen im Fokus, in denen viele Mitarbeiter mit aktuellen Informationen versorgt werden müssen (Bauernhansl et al., 2014).

3.3 Voraussetzungen für den Technologieeinsatz in der Produktionsarbeit 4.0

Der Aufgabenwandel und damit verbundene Wandel der Technolgienutzung in Cyberphysischen Produktionssystemen stößt auch einen Wandel der Rahmenbedingungen und Anforderungen. Der Zugang des Menschen in das Cyberphysische Produktionssystem wird mittels der Nutzung von mobilen Endgeräten in Verbindung mit echtzeitnahen Informationen, Web2.0-Ansätzen sowie optimierter Usability erfolgen und spezifische Anforderungen an deren Nutzung stellen:

- Hohe Usability (Komplexe Prozesse und Systeme für den Menschen beherrschbar machen)
- Intelligente und vernetzte Systeme (Hoch performante, selbstregulierende und selbstlernende Systeme unter Einbindung des Menschen

- Adaptive Human Machine Interaction (Situations- und bedarfsgerechte Informationsbereitstellung und Interaktion)
- Neue Kommunikation und Kooperation (Partizipative Entscheidungs- und Optimierungsprozesse/Ad-hoc-Vernetzung durch Social Media-Ansätze)

Im Folgenden wird ein Szenario des Störungsmanagements im Serienanlauf unter den Ansätzen von Industrie 4.0 aufgezeigt.

4 Störungsmanagement innerhalb Cyberphysischer Produktionssysteme

4.1 Prozessualer Ablauf des Störungsmanagements innerhalb Cyberphysischer Produktionssysteme

Das Störungsmanagement in einer Smart Factory soll ein Cyberphysisches Werkzeug zur Erfassung, Klassifizierung, Zuweisung und Dokumentation von Störungen in der manuellen Montage durch den Menschen als universeller Sensor während des Serienanlaufs darstellen. Elementarer Bestandteil ist die Entwicklung intelligenter Vernetzungs- und Workflowstrategien. Dies versetzt Unternehmen in die Lage, Ereignisse hochflexibel, dezentral, effizient und koordiniert zu steuern.

Nachfolgend werden die einzelnen Phasen und ihr jeweiliger Inhalt anhand von Abbildung 5 erläutert.

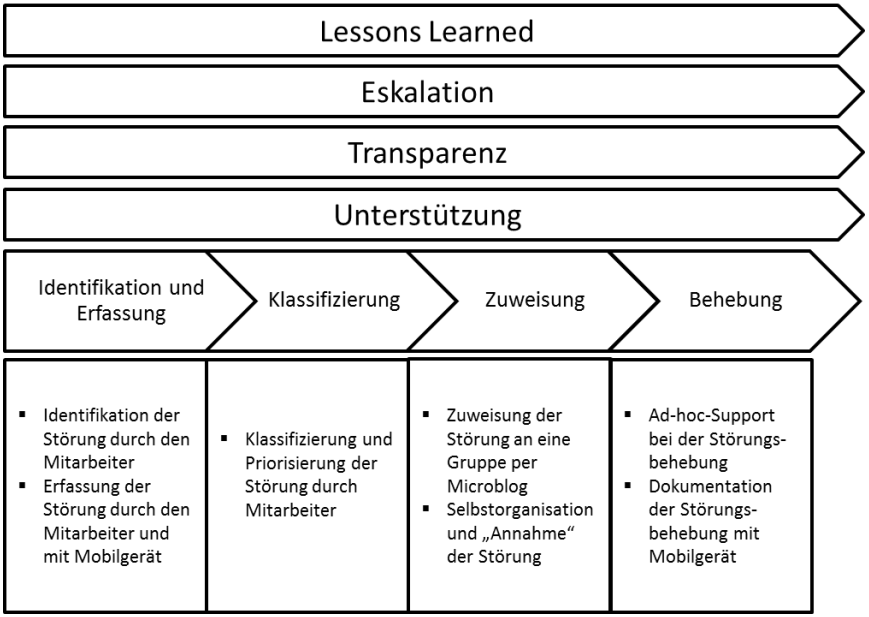


Abbildung 5: Optimierter Prozessablauf im Störungsmanagement

Identifikation und Erfassung von Störungen

Die Erfassung von Störungen erfolgt durch den Mitarbeiter vor Ort. Der Mitarbeiter identifiziert sich in der mobilen Anwendung und erfasst hierbei intuitiv und schnell das Ereignis mit einem Mobilgerät (siehe Abbildung 6). Er fügt der Störungsmeldung Video-, Foto- oder Tonaufnahmen hinzu. Die erfassten Informationen werden in einem virtuellen Problemlösungsblatt hinterlegt. Die Video-, Foto- und Tonaufnahmen werden in einer virtuellen Mediathek zur Nutzung hinterlegt.

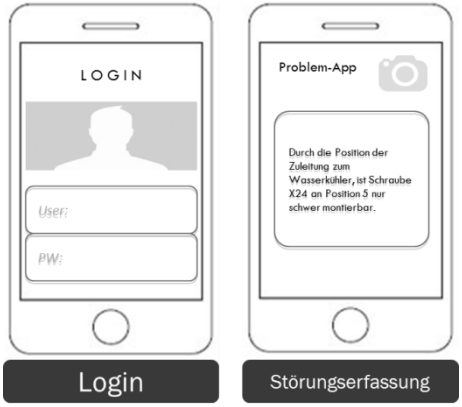


Abbildung 6: Login- und Erfassungsmaske

Klassifizierung

Wie in Abbildung 7 dargestellt, nimmt der Mitarbeiter eine grobe Klassifizierung und Priorisierung der Störung vor (bspw. logistische-, produktbezogene- oder prozessbezogene Störung). Anschließend kann der Mitarbeiter auch die Baugruppe bzw. das Bauteil bspw. durch einen QR-Code identifizieren. Anschließend quittiert der Mitarbeiter die Richtigkeit des identifizierten Bauteils (im vorliegenden Beispiel Wasserpumpe). Durch die Klassifizierung kann die Störungsmeldung einer Verantwortungsgruppe zugewiesen werden.

Abbildung 7: Klassifizierungsmaske

Die im Hintergrund agierende Klassifikation basiert auf zwei Klassifikationsebenen Eine erste Klassifikation erfasst die Zuordnung zwischen Kategorie (Produkt, Prozess, Logistik) und der jeweiligen Abteilung. Siehe hierzu Tabelle 2.

Tabelle 2: Klassifikation in der ersten Ebene

Kategorie	Zugehörige Abteilung
Produkt	Produktentwicklung, Konstruktion
Prozess	Anlaufmanagement, Arbeitsvorbereitung
Logistik	Intralogistik, Arbeitsvorbereitung

In der zweiten Klassifikationsstufe erfolgt die Zuordnung der Störung zu den jeweiligen Mitarbeitern anhand von Themen, wie es in Tabelle 3 ersichtlich ist. Dies ist Grundlage für die Zuweisung der Störungsmeldung zu den Verantwortlichen.

Tabelle 3: Klassifikation in der zweiten Ebene

Mitarbeiter	Abonnierte Themen
1	#Wasserpumpe, #Kühlkreislauf, #Wasserkühlung, #Motorkühlung
2	#Direkteinspritzung, #Einspritzventile, #Benzineinspritzung, #Wasserpumpe, #Kühlkreislauf

Zuweisung

Die Zuweisung erfolgt in Form eines Microblogs an Verantwortliche. Durch die Abonnements die für ihren Aufgabenbereich relevanten Ereignismeldungen, wird jedes Ereignis ortsunabhängig mindestens einem Verantwortlichen gesendet (Abbildung 8). Trifft diese Ereignismeldung bei den Verantwortlichen ein, können sie anhand der beigefügten Informationen dezentral abstimmen, ob das Ereignis in den eigenen Aufgabenbereich fällt, oder ob die Meldung weitergeleitet wird, da momentan keine zeitlichen Kapazitäten verfügbar sind oder das Ereignis nicht in den eigenen Aufgabenbereich fällt. Der Sender der Störungsmeldung erhält analog zu Issue-Tracking-Systemen eine Meldung über den Verlauf der entsandten Meldung.

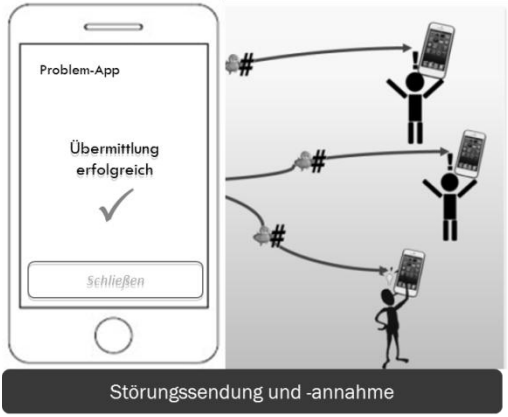


Abbildung 8: Störungssendung- und Störungsannahmemaske

Nimmt ein Verantwortlicher die Bearbeitung des Ereignisses an, bestätigt er dies. Dabei kann er Angaben über den voraussichtlichen Bearbeitungszeitpunkt, die geschätzte Dauer machen und sich mit den Mitarbeitern in den Arbeitssystemen terminlich abstimmen. Die Informationen werden mit dem Projektplan (übergeordnetes Projektmanagement) abgeglichen und eventuell aktualisiert. Für Kleinstörungen kann sich der Experte auch ad-hoc mit dem störungssendenden Mitarbeiter vernetzen und ihm Ratschläge zur sofortigen, kurzfristigen Selbsthilfe geben. In Nutzungsszenarien mit Datenbrillen ist ein dezentrales, direktes Mentoring zwischen störungssendendem Mitarbeiter und Experte durch augmentierte Realität denkbar.

Störungsbehebung

Für die Behebung der Störung werden automatisch (kontextbasierte) Lösungsvorschläge aus ähnlichen Störungen bereitgestellt. Zudem werden die Störungsinformationen in einer Art Anlauf-Wiki-Datenbank querverlinkt.

Wird die Störung behoben, kann der Verantwortliche im Vorfeld, oder vor Ort bei der Behebung, Experten über eine interne Social-Media-Plattform finden (Expertenfinder). Er kann diese bei der Behebung live mittels

Videotelefonie/augmentierter Realität hinzuziehen (Vor-Ort-Unterstützung in Echtzeit). Diese Ad-hoc-Organisation (Anlauf-Social-Network) ermöglicht die Einbeziehung von Expertenwissen auch über die Grenzen der Anlauforganisation hinweg. Analog gilt dies für den Fall von Inbetriebnahmen. Mitarbeiter können sich somit weltweit bei Fragestellungen mit Experten im Unternehmen vernetzen. Während der Behebung erfolgt eine intuitive, schnelle Dokumentation der Arbeitsschritte und Hinterlegung der Informationen in ein „Anlauf-Wiki“.

Eskalation

Wird die Störung nicht von einem Verantwortlichen angenommen, bestätigt und behoben, startet ein Eskalationsszenario. Wie in Abbildung 9 dargestellt, existieren verschiedene Stufen der Eskalation. In der ersten Stufe erhält der Bereichsleiter automatisch alle Störungsmeldungen die länger als 24 Stunden nicht von den vorgeschlagenen Verantwortlichen angenommen wurden. Die zweite Eskalationsstufe versucht mit Hilfe einer interdisziplinären Anlaufrunde, ungelöste Störungen aufzugreifen, die innerhalb 48 Stunden nicht angenommen wurden. Die letzte Eskalationsstufe beschreibt die Werksleiterebene.

Stufe Abonnent	Inhalt des Abonnements
Stufe 1 Bereichsleiter	➢ Alle vom Mitarbeiter geteilten Störungen ➢ Nicht angenommene Störungen älter 24h
Stufe 2 Anlaufrunde	➢ Alle vom Bereichsleiter geteilten Störungen
Stufe 3 Werksleiter	➢ Alle von der Anlaufrunden geteilten Störungen

Abbildung 9: Eskalationsroutinen

Lessons Learned

Die Dokumentationen werden systematisch zur Realisierung von Lessons-Learned verdichtet und nutzbar gemacht. Somit werden die Daten aus dem Serienanlauf auch für die Serie einsetzbar (Wartungen, Instandhaltungen, Störungen, Schulungen zu potenziellen Störursachen/-quellen). Weiterhin können die Daten für erneute Serienanläufe des gleichen Produktionssystems im Falle einer Verlagerung genutzt werden.

Transparenz

Während des gesamten Störungsmanagement-Prozesses können die Störungsquellen, Bearbeitungsfortschritte sowie die Eskalationsroutinen transparent dezentral visualisiert werden (siehe Abbildung 10).

Hiermit wird ein proaktiver Kontrollansatz realisiert und ermöglicht die frühzeitige Erkennung von Engpässen innerhalb des Störungsmanagementprozesses. Vorgesetzte können sich unabhängig des Aufenthaltsortes online über das aktuelle Geschehen der Serienanläufe informieren und Gründe für Störungen oder ein Unterschreiten der Anlaufkurve einsehen. Zudem können Informationen zu aktuellen Störungen und den jeweiligen Bearbeiter angezeigt werden.

Abbildung 10: Störungsmonitor

Erwarteter Mehrwert

Das beschriebene Störungsmanagement-Beispiel zeigt auf, dass durch den Einsatz von Mobilgeräten in Verbindung mit Web 2.0-Ansätzen die reaktiven Störungsmanagementprozesse optimiert werden können. Von einem solchen System werden folgende Vorteile erwartet:

- Aufwandsreduktion/Zeitersparnis bei der Erfassung, Zuweisung, Weiterverarbeitung von Störungen durch einfache, intuitive Nutzung von Mobilgeräten und optimierte Eingabemasken
- Schnellere Reaktionszeiten und weniger Liegezeiten durch dezentrale, selbstorganisierte Abstimmung und Zuweisung von Störungen
- Schnellere Verarbeitung und weniger Rückfragen von Störungen durch höhere Qualität der Informationen zur jeweiligen Störung mittels Bild-, und Videoaufnahmen
- Durchgängiger Informationsfluss durch medienbruchfreien Störungsmanagement-Prozess

- Nutzung von kollektiven Wissen innerhalb der Organisation durch Social-Media-Ansätze bei der Störungszuweisung und -behebung
- Beschleunigung der Störungsbehebung durch kontextbasierte Informationsbereitstellung von multimodalen Störungsinformationen
- Erhöhte Transparenz des gesamten Störungsmanagement-Prozesses inklusive der Transparenz der Entscheidungsketten durch webbasierte Dashboard-Darstellung
- Effiziente Eskalationsszenarien für proaktive Workflows im Störungsmanagement durch Eskalationsautomatismen
- Sicherstellung der Qualität und des Projekterfolgs im Serienanlauf durch standardisierte, phasenübergreifende, historisch saubere Anlaufdokumentation

Im Serienbetrieb können die gesammelten Daten zu Störungen für Instandhaltungs- und Wartungsstrategien sowie zur Schulung von Mitarbeitern genutzt werden. Dies erspart Aufwände zur Produktion von Schulungsmaterial. Für etwaige Verlagerungen des Produktionssystems kann aus dem System das relevante Anlaufwissen zusammengestellt werden und ermöglicht somit einen beschleunigten Serienanlauf desselben Produktionssystems, da hier unter Umständen nicht dieselben Verantwortlichen mitwirken und kein Erfahrungswissen diesbezüglich besitzen.

5 Voraussetzungen für ein Störungsmanagement innerhalb eines Cyberphysischen Produktionssystems

Zur Realisierung eines Systems für den dezentralen und selbstorganisierten Umgang in reaktiven Störungsmanagement-Prozessen werden spezifische Anforderungen an technologische und organisatorische Rahmenbedingungen gestellt. Die technologischen Komponenten sind bereits in Kapitel 3 beschrieben worden. Hinsichtlich der organisatorischen Rahmenbedingungen sind die Qualifikations- und Akzeptanzanforderungen essentiell (Spath, Buck & Kremer 2003).

Besonders für den Einsatz neuer Technologien im Industrie 4.0-Kontext müssen Mitarbeiter qualifiziert werden (Spath et al. 2013). Die Akzeptanz zur Nutzung eines solchen Systems liegt in der Einfachheit und Bedienfreundlichkeit begründet. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Bedienung sich den Fähigkeiten und Gewohnheiten der Mitarbeitern und deren privaten Nutzung von mobilen Anwendungen orientiert. Dies kann auch bedeuten, dass Unterschiede der Akzeptanzkriterien abhängig vom Alter der Mitarbeiter auftreten können. Viele Elemente innerhalb des vorgestellten Anwendungsfalles besitzen ihren Ursprung in dem Privatbereich. Die Akzeptanz wird grundsätzlich durch einen tatsächlichen, spürbaren Mehrwert/Nutzen für den Anwender erreicht. Der Mitarbeiter wird zukünftig besser über Produktionsprozesse Bescheid wissen und zur Optimierung dieser beitragen. Erhält er hierbei ein assistierendes System, dass den heutigen Ablauf in Geschwindigkeit und Aufwand übertreffen, kann davon ausgegangen werden, dass der Mitarbeiter ein solches System nutzt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Störungen werden auch zukünftig reaktive vom Menschen durchgeführte Maßnahmen erfordern, da sie nicht vollständig verhindert und vorhergesagt werden können. Speziell im Serienanlauf als kritischer Prozessabschnitt innerhalb der Produktentstehung werden zukünftig Mechanismen gefordert sein, um bei Störungseintritt schnell und effizient zu reagieren. Zeitliche Verzüge, verursacht durch Störungen, verursachen Konventionalstrafen und Opportunitätskosten. Die heute im Rahmen des Serienanlaufs eingesetzten Strategien und Ansätze bieten keine umfassende, effiziente und nachhaltige Lösung zum reaktiven Störungsmanagement.

Industrie 4.0 bietet hierbei neue Möglichkeiten bezüglich der Nutzung neuer Informations- und Kommunikationstechnik innerhalb einer Fabrik nicht nur in der Kommunikationsdimension „Machine-to-Machine“, sondern auch im Bereich „Human-to-Machine“ und „Human-to-Human“. Die Produktionsarbeit und damit die Rolle der Mitarbeiter werden hierdurch

einem Wandel unterzogen. Der Mitarbeiter wird vermehrt die Rolle eines Sensors, Entscheiders und damit Akteurs einnehmen. Für das reaktive Störungsmanagement bedeutet dies den Einsatz von Mobilgeräten und Web 2.0-Ansätzen zur Realisierung von selbstorganisierten, hochvernetzten und dezentralen Strategien im reaktiven Störungsmanagement.

Der vorgestellte Anwendungsfall zeigt die Möglichkeiten einer schnellen und menschenzentrierten, systemtechnischen Unterstützung der Mitarbeiter im Falle einer Störung. Die multimodale Erfassung erfolgt mit einem Mobilgerät. Die Klassifizierung legt den Verantwortungsbereich fest und ermöglicht eine Zuweisung der Störungsmeldung. Der Experte kann sich synchron oder asynchron mit dem störungsmeldenden Mitarbeiter vernetzen und diesem eine erste Hilfestellung zu Sofortmaßnahmen leisten. Der gesamte Prozess wird dabei transparent sichtbar gemacht und ermöglicht eine proaktive Eskalation, wenn die Störung nicht behoben wird. Die während des Serienanlaufs erhobenen Informationen können für den nachgelagerten Prozess der Serienproduktion im Sinne von Qualifizierungsmaßnahmen, Wartungsstrategien sowie Störungsbehebungsvorgehen nutzbar gemacht werden. Darüber hinaus können die Informationen im Falle einer Verlagerung genutzt werden, um die Durchlaufzeit zu reduzieren und präventiv Fehler zu vermeiden.

Der gezeigte Anwendungsfall bezieht sich primär auf den Einsatz innerhalb der manuellen Montage. Innerhalb von automatisierten Prozessen und bei sehr komplexen Störungen die textuell und multimodal nicht erfassbar sind, werden vielmehr die Prozessparameter im Zentrum der Betrachtung stehen und einen Ansatz des Störungsmanagements bieten.

Im weiteren Verlauf der Erforschung von Strategien im Störungsmanagement, kann die Betrachtung auf eine Kombination der reaktiven Strategie in der der Mensch als universeller Sensor auftritt sowie auf das autonome (präventive) Störungsmanagement durch technische Systeme gerichtet werden. Hierbei stellt sich die Frage, ob Ansätze im Bereich Data Mining und Themen des maschinellen Lernens, auch im Serienanlauf eingesetzt werden können und wie der Mensch ergänzende

Informationen einspeisen kann. Denkbar wäre die autonome Klassifizierung und Situationserkennung durch moderne Informatiktechnologien wie fallbasiertes Schließen, Musterkennung sowie statistische Verfahren. Auch die Zuweisung von Störungen kann autonom mit allen relevanten Prozessparameter und potenziellen Lösungsstrategien an Verantwortliche gesendet werden. Im Zusammenhang mit günstigen Plug & Play-Sensoren kann dies eine wertvolle Ergänzung für ein ganzheitliches Störungsmanagement sein.

Literatur

Bauernhansl, T. / Ten Hompel, M. / Vogel-Heuser, B. (2014). Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer-Verlag.

Bitkom (2012). Big Data im Praxiseinsatz – Szenarien, Beispiele, Effekte.

Böhler, T.M (2012). Industrie 4.0 – Smarte Produkte und Fabriken revolutionieren die Industrie. In: Produktion Magazin, 10. Mai 2012; Abgerufen am 12.06.2014.

Fischäder, H. (2007). Störungsmanagement in netzwerkförmigen Produktionssystemen. Wiesbaden: Deutsche Universitäts-Verlag.

Grahl, A. (2011). Web 2.0 und soziale Netzwerke – Risiko oder strategische Chance?. Köln: Bank-Verlag Medien GmbH.

Hommes, J. (2013). Mobile Device Management Strategien. Wie Unternehmen dem Consumerization-Trend begegnen können. Hamburg: Diplomica Verlag.

Hull, R. / Mendling, J. / Tai, S. (2010). Business Process Management: 8th International Conference, BPM 2010. Berlin: Springer-Verlag.

Jaspernite, J. (2012). Was hinter Begriffen wie Industrie 4.0 steckt. In: Computer & Automation, 19. Dezember 2012; Abgerufen am 15.05.2014.

KapaflexCy (2014). Homepage des Forschungsprojekts KapaflexCy. Internet: www.kapaflexcy.de. Abgerufen am 10.05.2014.

Kurbel, K. (2008). The Making of Information Systems: Software Engineering and Management in a Globalized World. Berlin: Springer-Verlag.

Meyer, G. et al. (2014). Kompetenzorientiertes Störgrößenmanagement. In: Productivity Management 19 (2014), Ausgabe 1, Seite 15-18.

Plattform Industrie 4.0 (2014). Homepage der Plattform Industrie 4.0. Internet: http://www.plattform-i40.de/sites/default/files/140326_Broschuere_Industrie.pdf. Abgerufen am 28.06.2014.

Pulter, N. / Nimis, J. / Lockemann, P. (2010). Störungsmanagement in offenen, getakteten Logistiknetzen. In: Künstliche Intelligenz 24(2), S. 131-136 (2010).

Raake, S. / Hilker, C. (2013). Web 2.0 in der Finanzbranche: Die neue Macht des Kunden. Wiesbaden: Gabler-Verlag.

Romberg, A. / Haas, M. (2005). Der Anlaufmanager. Stuttgart: LOG_X Verlag GmbH.

Sendler, U. (Hrsg.) et. al. (2013). Industrie 4.0. Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM. Berlin: Springer-Verlag.

Scholz-Reiter, B. / Krohne, F. (2010). Ramp-Up Excellence. Ein skalierbares Anlaufmanagementprozessmodell für Elektronik Zulieferer. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben 15072 N. Bremen, 2010.

Schumacher, J. (2009). Effizientes Störungsmanagement in der Produktion. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 104 (2012), Ausgabe 3, Seite 206-209.

Spath, D. et al. (2012). Produktionsprozesse im Jahr 2030. In: IM – Fachzeitschrift für Information Management und Consulting 27 (2012).

Spath, D. (Hrsg.) et al. (2013). Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

Spath, D. / Buck, H. / Kremer, D. (2003). Wandel aktiv gestalten – Wandlungsfähigkeit stärken. Aktivierung der Humanressourcen in Veränderungsprozessen. Ergebnisse der Studie zur Wandlungsfähigkeit produzierender Unternehmen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

Wiesinger,G. / Housein, G. (2002). Schneller Produktionsanlauf von Serienprodukten. In: Werkstatttechnik online Jahrgang 92 (2002), H. 10.

Wolf, F. (2012). Social Intranet. Kommunikation fördern, Wissen teilen, Effizient zusammenarbeiten. München: Carl Hanser Verlag.

Wissensentdeckung in vernetzten, industriellen Datenbeständen

Jochen Deuse, Olga Erohin, Daniel Lieber

Die Verbreitung digitaler Werkzeuge zur Planung, Steuerung und Kontrolle von Produktionsprozessen nimmt permanent zu, was einen kontinuierlichen Anstieg industrieller Datenbestände zur Folge hat. Durch die Etablierung von Cyber Physischen Systemen (CPS) wird dieser Anstieg in Zukunft rasanter erfolgen. Die entstehenden vernetzten Daten repräsentieren zum Teil bisher unbekannte Zusammenhänge und einen Teil des produktionstechnischen Wissens, das zusammen mit dem Planungs- und Produktions-Know-how der Mitarbeiter eine wichtige Entscheidungsgrundlage darstellt. Die effiziente Nutzung dieser Daten ist von entscheidender Bedeutung und durch den Einsatz intelligenter Analyseverfahren im Kontext von Industrie 4.0 zu intensivieren.

Eine intelligente Auswertung großer Datenmengen kann im Rahmen von Vorgehensmodellen zur Wissensentdeckung in den Datenbeständen (Knowledge Discovery in Databases, KDD) mit dem Einsatz von Data Mining Verfahren erfolgen. Die durch die Etablierung von CPS hervorgerufene zunehmende Datenvernetzung und -erfassung erfordert jedoch die Entwicklung von produktionsnahen KDD-Modellen, die die Herausforderungen industrieller Datenbestände berücksichtigen. Daher wird im Beitrag ein erweiterter, standardisierter und systematischer Ablauf zur Wissensentdeckung im Kontext industrieller Produktion (Knowledge Discovery in Industrial Databases, KDID) dargestellt und seine praktische Durchführung anhand von Projektbeispielen exemplarisch erläutert.

1 Einleitung und Ausgangssituation

Die zunehmende Digitalisierung aller Unternehmensprozesse hat einen stetigen Anstieg der Datenvolumina zur Folge. Nach aktuellen Schätzungen werden ca. 90% aller Produktionsprozesse durch Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) unterstützt und tragen somit maßgeblich zu dem Datenwachstum bei (Kagermann, Wahlster & Helbig, 2013, S. 17). Durch die angestrebte „Verschmelzung“ der physikalischen und virtuellen Welt in CPS wird der Umfang industrieller Daten in Zukunft noch rasanter steigen. Die mit hoher Geschwindigkeit entstehenden komplexen und umfangreichen Datenmengen („Big Data“) können mittels intelligenter Algorithmen analysiert und die Ergebnisse für Planungs- und Entscheidungsunterstützung bereitgestellt werden (Schäfer et al., 2012, S. 6). Die Entwicklung geeigneter „Konzepte, Werkzeuge und Algorithmen“ zur Auswertung industrieller, vernetzter Daten wird von der Forschung und Praxis gefordert (Kagermann, Wahlster & Helbig, 2013, S. 94; Cramer, 2011, S. 5). Hierbei kann einerseits auf die erprobten Verfahren der Künstlichen Intelligenz und des Data Mining zurückgegriffen werden, um einen Teil des produktionstechnischen Wissens aus komplexen, vernetzten Datenbeständen zu extrahieren (Lieber, Erohin & Deuse, 2013, S. 388). Andererseits erfordert das komplexe Anwendungsgebiet der industriellen Produktion eine anwendungsfeldspezifische Gestaltung der Knowledge Discovery in Databases (KDD) Projekte, um die Akzeptanz von Data Mining bei den Entscheidungsträgern und ihre Verbreitung in der Praxis zu erzielen. Somit ist zur Sicherstellung eines nachhaltigen Mehrwertes des Data Mining Einsatzes die Wissensentdeckung im Rahmen eines interdisziplinären, auf die Anforderungen der industriellen Daten angepassten Prozesses, zu realisieren.

2 Modelle und Herausforderungen der Wissensentdeckung

2.1 Domänenneutrale Modelle der Wissensentdeckung

Eine Differenzierung zwischen den Begriffen Data Mining und KDD wurde von Frawley, Piatetsky-Shapiro und Matheus vorgenommen (1992, S. 58),

um Wissen als Endprodukt der Anwendung statistischer Algorithmen in den Vordergrund zu stellen (Fayyad, Piatetsky-Shapiro & Smyth, 1996, S. 39). Dabei bezeichnet KDD den nichttrivialen Prozess der Identifikation valider, neuartiger, potenziell nützlicher und klar verständlicher Muster in Daten (Fayyad, Piatetsky-Shapiro & Smyth, 1996, S. 39; Frawley, Piatetsky-Shapiro & Matheus, 1992, S. 58). Data Mining hingegen wird als ein Teilschritt im KDD aufgefasst, in dem durch die Anwendung spezieller Algorithmen Muster in den Daten erkannt werden (Fayyad, Piatetsky-Shapiro & Smyth, 1996, S. 39). In der Fachliteratur wird der Prozess der Wissensentdeckung zum Teil auch als Data Mining Prozess bezeichnet (Runkler, 2010, S. 2; Chapman et al., 2000, S. 2) und somit eine prozessorientierte Definition von Data Mining vorgenommen. Neben dieser prozessorientierten Sichtweise wird unter Data Mining methodisch die Anwendung geeigneter Verfahren und Algorithmen aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz oder der Statistik zusammengefasst (Gabriel, Gluchowski & Pastwa, 2009, S. 121; Deuse, 1998, S. 12). In den letzten Jahren wird das Verständnis von Data Mining als einen autonomen Prozess der Mustererkennung zunehmend durch das Verständnis als einen Teilschritt im KDD ersetzt (Gabriel, Gluchowski & Pastwa, 2009, S. 121; Säuberlich, 2000, S. 9).

Zur strukturierten Durchführung von KDD-Projekten wurden in den vergangenen Jahren im wissenschaftlichen und industriellen Umfeld einige Vorgehensmodelle entwickelt. Ein in der Wissenschaft verbreitetes KDD-Vorgehensmodell wurde Mitte 1990er Jahre von Fayyad, Piatetsky-Shapiro und Smyth (1996, S. 41) entworfen und beinhaltet die Schritte zur Auswahl der Daten, Vorverarbeitung der Daten, Transformation der Daten, Data Mining Modellierung und Interpretation der Ergebnisse. Im ersten Schritt des Vorgehensmodells werden die relevanten Datenbestände ausgewählt und anschließend in der Datenvorverarbeitung im Hinblick auf die Datenqualitätsmängel untersucht, um unter anderem fehlende sowie fehlerhafte Werte zu entfernen oder zu ersetzen (Fayyad, Piatetsky-Shapiro & Smyth, 1996, S. 42). Im nächsten Schritt, der Datentransformation, wird der Datenbestand in eine für die Anwendung des gewählten Data Mining

Verfahrens erforderliche Form gebracht und beispielsweise eine Diskretisierung numerischer Werte zur Anpassung der Skalenniveaus durchgeführt. Der vorverarbeitete und transformierte Datensatz ist die Basis für die Verwendung geeigneter Data Mining Verfahren (beispielsweise Cluster-, Entscheidungsbaum- oder Regressionsmodellbildung) zur eigentlichen Entdeckung vorhandener, bislang unbekannter Muster in Daten im Rahmen der Data Mining Modellierung. Nach der fachkundigen, gemeinsam mit den Experten aus der Anwendungsdomäne durchgeführten Interpretation gefundener Muster entsteht neues Wissen, das zur Lösung definierter Aufgabenstellungen verwendet werden kann (Fayyad, Piatetsky-Shapiro & Smyth, 1996, S. 44). Insgesamt wird beim KDD-Vorgehensmodell von Fayyad, Piatetsky-Shapiro und Smyth (1996) von einem umfassenden Datenbestand ausgegangen und die Integration von Expertenwissen des Anwendungsgebietes nur bei der Ergebnisinterpretation vorgesehen.

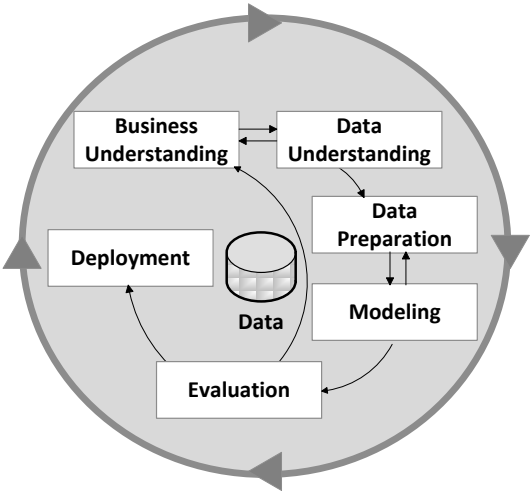


Abbildung 1: KDD-Vorgehensmodell CRISP-DM (Chapman et al., 2000, S. 10)

Im Vergleich zum erläuterten KDD-Vorgehensmodell wurde das Cross Industry Standard Process for Data Mining (CRISP-DM) Modell der Wissens-entdeckung basierend auf den Erfahrungen aus praktisch durchgeführten

Data Mining Projekten entwickelt und hat sich als der industrielle Standard durchgesetzt (Chapman et al., 2000, S. 2; Otte, Otte & Kaiser, 2004, S. 59). Das Vorgehensmodell ist hierarchisch aus vier Ebenen mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden aufgebaut. Auf der ersten Ebene wird der Wissensentdeckungsprozess in sechs iterative Phasen strukturiert: Prozessverständnis, Datenverständnis, Datenaufbereitung, Modellierung, Interpretation sowie Implementierung (siehe Abbildung 1). Auf der zweiten Hierarchieebene werden typische Data Mining Applikationen (beispielsweise Möglichkeiten zur Behandlung fehlender Werte oder zur Ableitung neuer Attribute) erläutert. Eine weitere Spezialisierung der Aufgaben in Abhängigkeit von den im Projekt vorliegenden, spezifischen Problemstellungen (beispielsweise konkrete Algorithmen zur Behandlung fehlender numerischer Daten) findet auf der dritten Ebene statt. Schließlich sind auf der vierten Ebene konkrete Aktionen, Entscheidungen und Resultate der durchzuführenden Aktivitäten zu definieren (Chapman et al., 2000, S. 6; Otte, Otte & Kaiser, 2004, S. 59). Insgesamt beschreibt CRISP-DM somit ein allgemeingültiges Vorgehensmodell für KDD-Projekte, ohne die Anwendungsdomäne zu konkretisieren und die domänenspezifischen Einflüsse (beispielsweise der produktionsnahen Daten) zu berücksichtigen. Gleichwohl wird hier das Prozess- und Datenverständnis explizit fokussiert, der Datenvorverarbeitung vorangestellt und somit der interdisziplinäre Charakter von KDD verdeutlicht.

Neben den beiden erläuterten Modellen existieren weitere KDD-Vorgehensmodelle, beispielsweise das SEMMA-Modell (Sample, Explore, Modify, Model, Assess) von SAS (Jackson, 2002) sowie das 5A-Modell (Assess, Access, Analyze, Act, Automate) von SPSS (Mariscal, Marban & Fernandez, 2010, S. 153), denen meist eine unternehmensspezifische und statistisch geprägte Sichtweise auf die Wissensentdeckung zugrunde liegt. Eine weiterführende Übersicht zu den in Wissenschaft und Praxis entwickelten KDD-Vorgehensmodellen bieten Mariscal, Marban & Fernandez (2010). Die Unterschiede zwischen den entwickelten KDD-Vorgehensmodellen und der praktischen Durchführung von industriellen

KDD-Projekten werden von Menzies, Bird und Kocaganeli (2011) thematisiert. Darauf aufbauend definieren sie sieben Regeln zur erfolgreichen Durchführung von Data Mining Projekten: Anwendungsfälle stehen vor Algorithmenanwendung („Users before algorithms“), Lösungen sind skalierbar zu gestalten („Plan for scale“), frühe Rückmeldungen sind einzubauen („Early feedback“), neue Hypothesen sind immer zu berücksichtigen („Be open-minded“), Ergebnisse sind auf ihre Verlässlichkeit zu prüfen („Do smart learning“), vorhandene Daten sind zu nutzen („Live with the data you have“), mehrere Methoden und Modelle sind zu testen („Broad skill set and big toolkit“) (Menzies, Bird & Kocaganeli, 2011, S. 19). Die definierten Regeln werden nicht in ein KDD-Vorgehensmodell integriert, sondern sollen eine Orientierungshilfe für den praktischen Einsatz von Data Mining anbieten.

Insgesamt sind die etablierten KDD-Vorgehensmodelle in ihrer grundlegenden Zielsetzung sowie inhaltlichen Ausgestaltung ähnlich und haben keinen bereichsspezifischen Anwendungsfokus. Die Herausforderungen der Wissensentdeckung in vernetzten, industriellen Datenbeständen werden in vorhandenen Vorgehensmodellen nur im geringen Maße berücksichtigt. Gleichwohl verspricht die Anwendung der Wissensentdeckung angesichts der wachsenden Menge produktionsnaher Daten Wettbewerbsvorteile für produzierende Unternehmen (beispielsweise im Hinblick auf eine verbesserte Entscheidungs- und Planungsunterstützung) und ist gleichzeitig mit einigen Herausforderungen verbunden.

2.2 Herausforderungen der Wissensentdeckung im industriellen Umfeld

Die Anwendung der erläuterten KDD-Vorgehensmodelle der Wissensentdeckung setzt große zusammengeführte Datenbestände, wie diese beispielsweise im Bank- oder Versicherungswesen vorhanden sind, voraus. Im industriellen Umfeld ist dies oft nicht gegeben und daher eine vorgelagerte Integration relevanter Daten aus heterogenen Quellen, beispielsweise aus Computer Aided Design und Enterprise Resource

Planning Systemen, erforderlich. Die Bestrebungen nach umfangreicher Datenintegration im Produktionsumfeld wurden bereits in Forschungsansätzen zu Computer Integrated Manufacturing fokussiert. Die diskutierten Ansätze konnten jedoch aufgrund „fehlender Vernetzungsmöglichkeiten und fehlender angepasster IKT-Basistechnologien in der Produktion“ nur zum Teil in der Praxis umgesetzt werden (Kagermann, Wahlster & Helbig, 2013, S. 101). Insbesondere im Planungsumfeld sind viele IT-Insellösungen im Einsatz (Petzelt, 2010, S. 13; Westkämper, 2007, S. 434), so dass die Herausforderung der Datenintegration und -durchgängigkeit bei der industriellen Wissensentdeckung in Planungsdaten besonders stark zum Tragen kommt.

Die Herausforderungen bei der Wissensentdeckung auf Basis von Ist-Produktionsdaten (beispielsweise Sensordaten oder Daten der Manufacturing Execution Systeme, MES) konzentrieren sich auf die gewünschte Ergebnisgenerierung in Echtzeit und sind oft mit der Anwendung ressourceneffizienter Algorithmen verbunden (Lieber, Erohin & Deuse, 2013, S. 389). Hinzu kommen die allgegenwärtigen Schwierigkeiten bei der Durchführung von Wissensentdeckungsprozessen, wie beispielsweise unpassend skalierte oder auf eine unpassende Bezugsebene aggregierte Daten (Otte, Otte & Kaiser, 2004, S. 65; Eversheim & Deuse, 1997, S. 98).

Während die exemplarisch erläuterten technischen und datenspezifischen Herausforderungen im Zuge der Etablierung von CPS und der zunehmenden Datenvernetzung im industriellen Umfeld zum Teil behoben werden können, stellen eine ausreichende Integration von Experten der Anwendungsdomäne in KDD und die Akzeptanz von Data Mining in produzierenden Unternehmen insgesamt weitere Herausforderungen dar. Dabei ist Expertenwissen bei der Ergebnisinterpretation und -darstellung (beispielsweise symbolische oder subsymbolische Repräsentation der entdeckten Regeln) in die Wissensentdeckung zu integrieren. Außerdem sind Fachexperten bei der Detaillierung der Aufgabenstellung und Konzeption des Einsatzes eines IT-Prototyps für die Ergebnisnutzung zu

konsultieren. Dies impliziert einerseits die Notwendigkeit einer verständlichen Visualisierung der Ergebnisse sowie der Einsicht in die Prozesse ihres Entstehens, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. Andererseits wird von den Anwendern ein besseres Verständnis für die Themen rund um Data Mining oder KDD erwartet, um eine erfolgreiche Zusammenarbeit im interdisziplinären KDD-Team zu unterstützen.

Zusätzlich zu den genannten Herausforderungen werden aus der Praxis weitere, beispielsweise finanziell begründete, Herausforderungen der Wissensentdeckung in industriellen Daten identifiziert. Die Fragen des Datenschutzes und der Datensicherheit, die begrenzten Budgets sowie die ausbaufähigen Kompetenzen bzw. die fehlende Expertise im Unternehmen werden seitens der Anwender als drei wichtigste Hindernisse für die Nutzung von vorhandenen Daten und die Wissensentdeckung gesehen (Schäfer et al., 2012, S. 48). Um den genannten Herausforderungen entgegenzuwirken, ist eine systematische Methodik zur Durchführung der Wissensentdeckung in industriellen Datenbeständen zu entwickeln. Zudem sind den Herausforderungen entgegenstehende, in den Datenbeständen enthaltene Potenziale zur Planungs- und Entscheidungsoptimierung herauszustellen.

3 Potenziale der Wissensentdeckung in vernetzten, industriellen Datenbeständen

Die Potenziale des Data Mining Einsatzes im Produktionsumfeld werden von mehreren Akteuren (IKT-Anbieter, Anwender aus der produzierenden Industrie und dem Dienstleistungsbereich, Forschungseinrichtungen) erkannt und zum Teil schon genutzt. So wird nach den Ergebnissen einer Studie aus dem Jahr 2013 in jeder fünften MES-Lösung Data Mining eingesetzt (Mussbach-Winter, Wochinger & Kipp, 2013, S. 56). Dabei bieten 13% der Lösungen die Data Mining Funktionen integriert und 7% der Lösungen durch eine Anbindung zum spezialisierten Partnerprodukt (Data Mining Software) an (Mussbach-Winter, Wochinger & Kipp, 2013, S. 56). Eine weitere Studie zeigt, dass die Potenziale von Auswertungen

hochdimensionaler Daten den Großunternehmen und KMUs im Allgemeinen bekannt sind (Schäfer et al., 2012, S. 9). Demnach sehen die Befragten (n=82) die größten Optimierungspotenziale in zusätzlichen strategischen Wettbewerbsvorteilen (69%), in der Steigerung der Umsätze (61%) und in der Einsparung von Kosten (55%) (Schäfer et al., 2012, S. 9). Beispiele erfolgreicher Nutzung von Data Mining Potenzialen sind unter anderem im Bereich des Marketing (Cramer, 2011, S. 3), des Controlling (Otte, Otte & Kaiser, 2004, S. 35), der Prozessleittechnik (Cramer, 2011, S. 6) oder des Qualitätsmanagements zu finden.

Insgesamt ist die Entwicklung der Datenanalyse durch einen kontinuierlichen Anstieg der zur Verfügung stehenden Daten von Terrabytes (10^{12} Bytes) zu Zettabytes (10^{21} Bytes) gekennzeichnet. Hierbei verlagert sich der Analysefokus von einem vergangenheits- und report-orientierten Einsatz zu einer vorausschauenden Prognosebildung, um strategische Planung zu unterstützen. Die damit verbundenen Potenziale und aktuellen Entwicklungstrends in der Datenanalyse können unter den Stichworten „Big Data“ oder hochkomplexe Daten, Echtzeitanalyse und prädiktive Prognose zusammengefasst werden (siehe Abbildung 2). Analog zu der allgemeinen Entwicklung werden auch im produktionsnahen Umfeld zunehmend neue datenbasierte Dienstleistungen gefordert, um beispielsweise durch eine bedarfsgerechte Verbindung von internetbasierten und physischen Diensten intelligente Dienstleistungen, „Smart Services“ (Kagermann et al., 2014, S. 18), zu entwickeln.

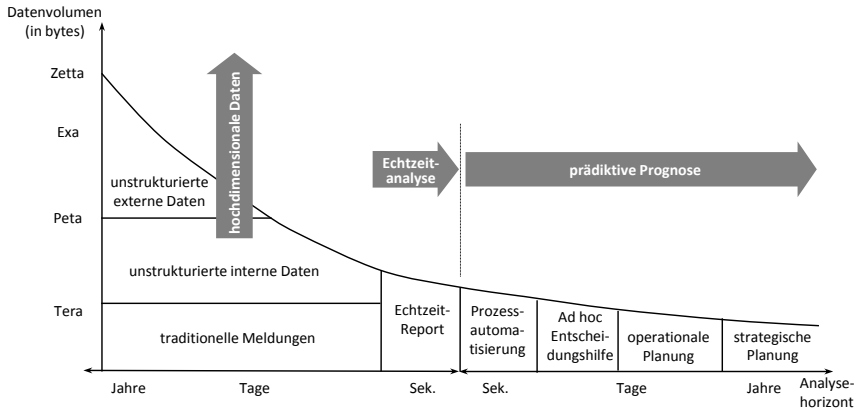


Abbildung 2: Entwicklung der Datenanalyse (Kisker et al., 2011; Schwab & Keil, 2012, S. 5)

4 KDID-Vorgehensmodell und -Projektbeispiele

Zur Berücksichtigung der erläuterten Herausforderungen und zur Nutzung der Potenziale der Wissensentdeckung in industriellen Datenbeständen wird im Folgenden unter dem Begriff Knowledge Discovery in Industrial Databases (KDID) ein standardisiertes und reproduzierbares Vorgehensmodell der Wissensentdeckung in industriellen Daten dargestellt (siehe Abbildung 3). Dieses basiert auf einer Fusionierung und Erweiterung der ursprünglichen KDD-Vorgehensmodelle um zusätzliche, bisher wenig fokussierte Elemente. Ein wesentliches Merkmal des Vorgehensmodells ist die unabdingbar erforderliche interdisziplinäre Durchführung jedes KDID-Schrittes mit den Experten aus den IT-, Data Mining- und künftigen Anwendungsbereichen. Die kurzzyklischen Abstimmungen im Team sollen den erforderlichen Wissensaustausch fördern und die kontinuierliche Berücksichtigung der Kundenwünsche (im Sinne von Anwenderwünschen) sicherstellen. Zudem sind im KDID Meilensteine vorgesehen, die Erfolgskontrollpunkte für den Verlauf des gesamten Projektes darstellen.

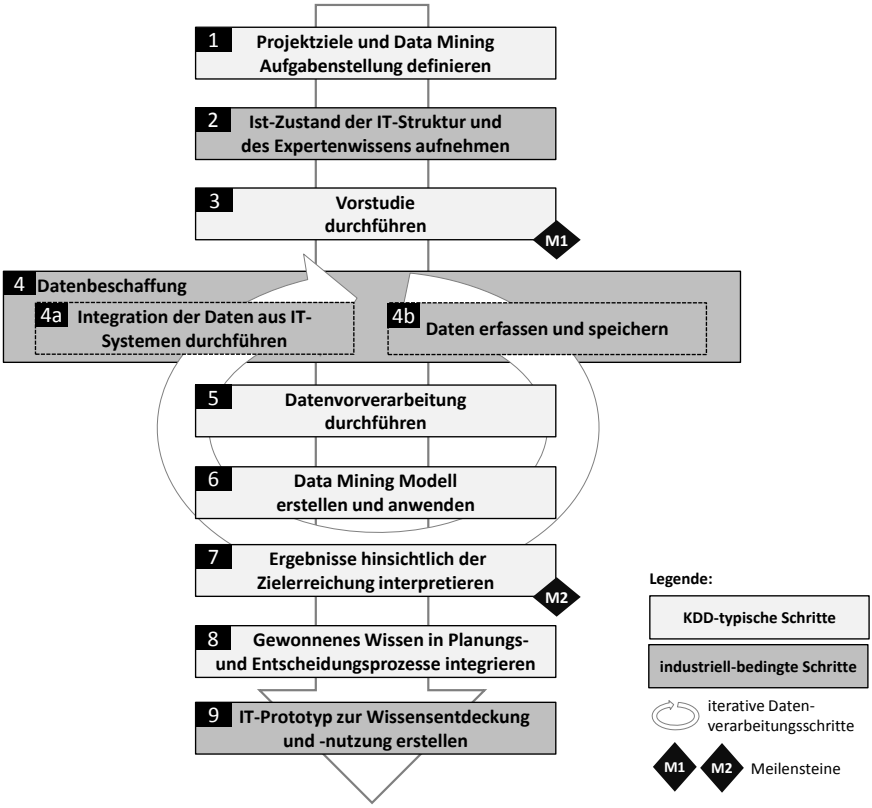


Abbildung 3: Knowledge Discovery in Industrial Databases (Lieber, Erohin & Deuse, 2013, S. 390)

Im Folgenden werden die einzelnen KDID-Schritte erläutert und ihre praktische Durchführung anhand von zwei Projektbeispielen dargestellt. Dabei werden bei dem ersten Projekt Ansätze zur Wissensgenerierung für eine kontinuierliche Qualitätsüberwachung in automatisierten Produktionsprozessen der Stahlindustrie entwickelt (Konrad, Lieber & Deuse, 2013). Hierbei steht insbesondere die Wissensentdeckung in den mit Sensoren erfassten Ist-Daten der Produktion im Vordergrund. Das Ziel im zweiten Projekt ist es, die Prozessplanung im Umfeld der Digitalen Fabrik zu unterstützen und eine Methode zur prospektiven Ermittlung von

Montagearbeitsinhalten zu entwickeln (Wallis et al., 2013). Hier wird insbesondere die Wissensentdeckung in Planungsdaten fokussiert.

4.1 Data Mining Aufgabenstellung und Projektziele

Ähnlich dem CRISP-DM Vorgehensmodell sind im ersten KDID-Schritt gemeinsam mit den Auftraggebern und künftigen Ergebnisnutzern die Wissensentdeckungsziele zu definieren. Ziel ist es, die Data Mining Aufgabenstellung im Sinne des überwachten (beispielsweise Klassifikation oder Regression) oder unüberwachten Lernens (beispielsweise Clustering oder Assoziation) zu konkretisieren sowie relevante Verfahren (beispielsweise Entscheidungsbaumverfahren, k-Means etc.) einzugrenzen. Bereits hier ist eine enge Abstimmung zwischen den Data Mining Experten und den Experten aus dem Anwendungsbereich erforderlich, um die fachliche Zielstellung des KDID-Projektes in die analytische Data Mining Aufgabenstellung zu überführen.

Im Projektbeispiel zur Qualitätsprognose wird untersucht, wie insbesondere überwachte Verfahren des Data Mining für die Analyse von Sensordaten des Produktionsprozesses zur echtzeitlichen Prognose der Produktqualität genutzt und in die betriebliche Praxis eingebunden werden können. Die fachliche Aufgabenstellung bei der Unterstützung der Montageplanung besteht in der einfacheren Erstellung von Montagearbeitsplänen auf Basis von Daten der in Vergangenheit durchgeführten Planungsprojekte. Hierzu werden analytisch insbesondere die Methoden des unüberwachten Lernens eingesetzt, um ähnliche Produkte und Prozesse aus instanziierten Datenmodellen zu Produkt- bzw. Prozessclustern zusammenzufassen. Durch ein datenbasiertes Mapping von Produkt- und Prozessclustern sollen anschließend produktclusterspezifischen Vorlagen für die Montagepläne abgeleitet und somit die Prozessplanung Data Mining-basiert unterstützt werden.

4.2 IT-Landschaft und Expertenwissen

Im zweiten Schritt der Wissensentdeckung ist eine enge Einbindung von Anwendern unabdingbar, um das verfügbare implizite und explizite Hintergrund- und Expertenwissen der Anwendungsdomäne in KDID miteinzubinden. Um einen Einblick in potenzielle Datenquellen zu schaffen, ist auch hier der Ist-Zustand der IT-Infrastruktur zu untersuchen und der zusammenzuführende Datenbestand einzugrenzen.

Die explizite Integration dieses Schrittes in den Wissensgewinnungsprozess soll insbesondere die Herausforderung einer häufig fehlenden Durchgängigkeit in historisch gewachsenen und heterogenen IT-Landschaften im produktionsnahen Umfeld berücksichtigen. Beim Vorliegen umfangreicher Daten aus unterschiedlichen IT-Systemen kann hierbei auf die Erstellung eines relationalen Datenmodells oder auf die vorhandene Data Warehouse Dokumentation zur Abbildung der Datenvernetzungen zurückgegriffen werden (Gabriel, Gluchowski & Pastwa, 2009, S. 131). Durch die aufgezeigten relationalen Strukturen (im Sinne der Beziehungen zwischen Daten) wird zum einen das Datenverständnis insgesamt gefördert und zum anderen die Entdeckung von Redundanzen in Daten zusätzlich unterstützt.

Im Beispiel der Qualitätsprognose in der Stahlproduktion werden in diesem KDID-Schritt unter anderem die an ausgewählten Stellen im Produktionsablauf datentechnisch erfassten und gespeicherten Prozessparameter (Temperatur, Druck, etc.) gesammelt. Darüber hinaus werden hier Anwenderwissen und -erfahrungen im Hinblick auf weitere, potenziell hilfreiche Parameter für die Qualitätsprognose untersucht. Im Beispiel der Montageplanung werden die digitale Abbildung von Produkt-, Prozess- sowie weiteren Planungsparametern (Produktionsstückzahlen, Linienaustaktung, etc.) oder die angewandten Methoden der Zeitermittlung untersucht. Zudem sind die aktuell eingesetzten IT-Lösungen für die Montageplanung und ihre vorhandene datentechnische Verbindung zu weiteren, insbesondere produktdatenbeinhaltenden, IT-Lösungen in der Planung und Produktion zu ermitteln. Hierdurch lassen sich vorliegende

Begrenzungen im Hinblick auf die Integration des relevanten Datenbestandes und das a priori Wissen der Anwender definieren.

4.3 Vorstudie

Aufbauend auf der Zielstellung ist anhand einer Datenstichprobe eine Data Mining Vorstudie durchzuführen, um offenkundige Auffälligkeiten der Datenqualität (beispielsweise Fehler in der Dokumentation oder in Messsystemen) sowie Zusammenhänge und interessante Teilmengen zu identifizieren. Die hierbei verwendeten Daten sollten einen repräsentativen Ausschnitt der gesamten Datenmenge darstellen. Erste deskriptive statistische Auswertungen und Visualisierungen von Verteilungen oder Korrelationen fördern an dieser Stelle das Verständnis der Datenlage und liefern erste Erkenntnisse bezüglich der Erfolgsaussichten des KDID-Projektes. Somit können beispielsweise die im ersten Schritt formulierten Hypothesen bezüglich des in den Daten enthaltenen impliziten Wissens bestätigt oder widerlegt werden. Andererseits können aufgrund der Erkenntnisse aus der Vorstudie neue Hypothesen gebildet werden, die den gesamten Verlauf des Projektes bzw. die Data Mining Modellierung beeinflussen. Sollte nach diesem Schritt ein positives Ergebnis vorliegen, ist der erste Meilenstein erfolgreich erreicht.

Die Ergebnisse der Vorstudie haben im Projekt zur Qualitätssicherung gezeigt, dass die vorhandene Datenerfassung die ganzheitliche Abbildung des Produktzustandes entlang des gesamten Produktionsprozesses nicht ermöglichte und zusätzlicher Initialaufwand in die Implementierung einen echtzeitfähigen Datenerfassungs- und -archivierungssystem investiert werden musste. Anhand der Vorstudie im Projekt zur Montageplanung konnte ein ausreichender Integrationsgrad zwischen den IT-Lösungen mit relevanten Produktdaten und IT-Lösungen mit Fokus auf Prozessdaten sowie ausreichender Detaillierungsgrad der Daten festgestellt werden. Dabei wurden bei beiden Projekten für die Zwecke der Vorstudie gängige Datenformate (.csv, .xls) eingesetzt, um einen einfachen Datenexport aus

den eingesetzten Systemen und anschließenden Datenimport in die Data Mining IT-Lösung zu ermöglichen.

4.4 Datenbeschaffung

Nach der Vorstudie ist die Integration der Daten aus unterschiedlichen IT-Systemen oder bei Bedarf eine zusätzliche Erfassung der Daten durchzuführen. Hierbei werden entweder Daten aus unterschiedlichen Datenquellen in einer Datentabelle vereinigt oder zusätzliche Daten erst erfasst und dann in die Datentabelle integriert. Das stellt einen grundlegenden und oft unterschätzten Schritt zur Bereitstellung der erforderlichen Datenbasis für die Wissensentdeckung in industriellen Daten dar. Dabei geht es nicht um die Einführung einer komplett neuen Datenerfassung, sondern um die KDID-Projektspezifische Anpassung vorhandener Erfassungsmöglichkeiten. Historisch gewachsene IT-Strukturen sowie organisatorische und technologische Restriktionen im Planungs- und Produktionsumfeld führen in der Regel zu stark heterogenen, unvollständigen und inkonsistenten Datenbeständen, die nicht unmittelbar für automatisierte Datenanalysen nutzbar sind und zunächst mit hohem Initialaufwand aufbereitet werden müssen. Dementsprechend gilt es hier, die notwendigen operativen und technischen Voraussetzungen für die Integration, Sammlung, Speicherung, Aufbereitung und/oder Abfrage von Produktions- und Planungsdaten zu schaffen (Lieber, Erohin & Deuse, 2013, S. 391).

Die durchgeführten Projekte zeigen, dass für die Qualitätsprognose in der Stahlproduktion unter anderem zusätzliche Datenerfassungspunkte eingerichtet werden mussten, um weitere Ist-Prozessparameter in die Modellbildung miteinzubeziehen. Zur Wissensentdeckung in montage-relevanten Planungsdaten war eine Zusammenführung der Datenbestände, aus der Produktentwicklung (insbesondere Stücklisten) und Prozessplanung (insbesondere Montagepläne) erforderlich.

4.5 Datenvorverarbeitung

Die integrierten oder neu erfassten Daten werden im nächsten Schritt im Sinne der Datenselektion, -bereinigung und -transformation vorverarbeitet. Nach Expertenschätzung nimmt die Datenvorverarbeitung in der Regel bis zu 80% der zeitlichen, technischen und personellen Ressourcen in Anspruch (Gabriel, Gluchowski & Pastwa, 2009, S. 129). Im Rahmen der Datenselektion können ausgewählte Merkmale oder komplette Datensätze manuell oder maschinell aus dem ursprünglichen Datenbestand entfernt werden. Für die manuelle Entfernung kann auf das Wissen der Anwender zurückgegriffen werden, um die zu entfernenden Merkmale oder Datensätze zu bestimmen. Darüber hinaus kann mit Filter-, Wrapper- oder Embedded-Ansätzen eine maschinelle Merkmalsauswahl erfolgen. Als Ergebnis der Datenbereinigung soll ein fundierter, auswertungsfähiger Datenbestand möglichst hoher Qualität entstehen. Hierfür werden fehlerhafte, irrelevante, redundante oder unvollständige Werte in der ausgewählten Datengrundlage identifiziert und ersetzt, entfernt oder ergänzt (Fayyad, Piatetsky-Shapiro & Smyth, 1996, S. 42; Lieber, Erohin & Deuse, 2013, S. 391). Anschließend werden die bereinigten Daten im Rahmen der Datentransformation umgeformt. Vor dem Hintergrund der Problematik, wie die Merkmalsausprägungen eines Objektes in Zahlen ausgedrückt (gemessen) werden können, werden Attributformate anhand unterschiedlicher Skalenniveaus charakterisiert, welche den Informationsgehalt sowie die Anwendbarkeit von Data Mining Verfahren zum Teil begrenzen. Daher werden im Rahmen der Datentransformation insbesondere die Skalenniveaus der Daten für die Anwendung der ausgewählten Data Mining Verfahren geprüft und angepasst (Lieber, Erohin & Deuse, 2013, S. 391).

Im Beispiel der Prozessdatenanalyse zur Qualitätsprognose erfolgt unter anderem eine Bereinigung und Segmentierung von Zeitreihendaten sowie Merkmalsextraktion, -gewichtung und -selektion zur Dimensionsreduktion der Attributausprägungen. Für die Unterstützung der Montageplanung wurde vor der Durchführung der Clusteranalyse auf Produkt- und

Prozessdaten in der Datenvorverarbeitung unter anderem die Normalisierung der Attribute (Gesamtgewicht, Anzahl Bauteile etc.) sowie ihre Transformation in binäre Ausprägungen in der Grundpopulation durchgeführt. Darüber hinaus ist aufgrund der hierarchisch aufgebauten Produkt- und Prozessstrukturen die Entfernung inhaltlicher Dubletten in den Datenbeständen erforderlich.

4.6 Data Mining Modellierung

Der sechste Schritt stellt den analytischen Kern von KDID und somit im engeren Sinne die methodenorientierte Perspektive von Data Mining dar. Hier werden verschiedene Algorithmen auf vorverarbeitete und transformierte Daten angewandt. Dabei können die Einstellungen der Lernparameter (beispielsweise Clusteranzahl) für die gewählten Algorithmen maschinell im Rahmen evolutionärer Optimierungsstrategien (beispielsweise mit Fitnessfunktionen) oder iterativ durch den Anwender variiert und so das beste Modell gefunden werden. Die getesteten Modellvarianten werden anhand von Kriterien wie z.B. Robustheit, Genauigkeit, Allgemeingültigkeit oder Aussage- und Prognosefähigkeit bewertet.

Im Rahmen der Qualitätsprognose liegt der Fokus auf Klassifikationsverfahren des überwachten Lernens, um historische Qualitäts- und Prozesszeitreihendaten auszuwerten und ein 2-Klassen Klassifikationsmodell zu erstellen. Bei der Montageplanung kommen verstärkt strukturentdeckende Clusterverfahren, wie beispielsweise k-Means oder k-Medoids, zum Einsatz. Die Einstellung des Lernparameters Clusteranzahl wurde hierbei durch die Interpretation der Ergebnisse und Interaktion mit den künftigen Anwendern ermittelt. In Abbildung 4 ist exemplarisch das Dendrogramm der hierarchisch-agglomerativen Clusterbildung für eine Produktbaugruppe dargestellt, auf dessen Basis die Partitionsgröße ermittelt werden kann.

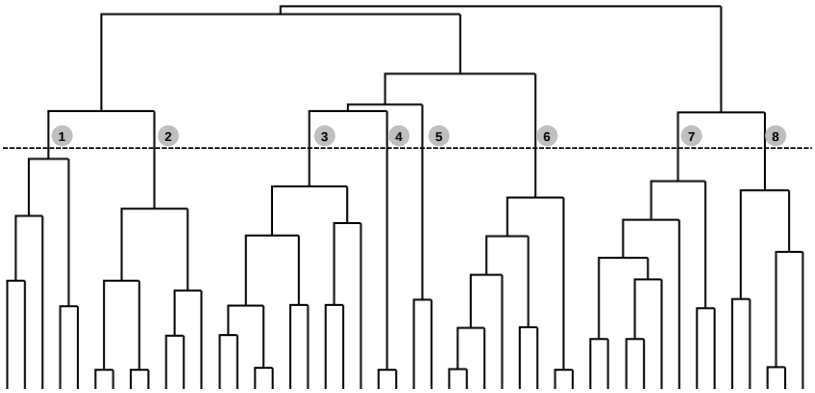


Abbildung 4: Dendrogramm möglicher Produktcluster (Wallis et al., 2013, S. 171)

4.7 Ergebnisinterpretation

Die Resultate der Data Mining Modellierung werden im Rahmen der Ergebnisinterpretation hinsichtlich der Gültigkeit, Plausibilität, Neuartigkeit, Nutzbarkeit sowie Verständlichkeit bewertet (Fayyad, Piatetsky-Shapiro & Smyth, 1996, S. 42). Die Erfahrungen zeigen, dass etwa 70-80% der entdeckten Zusammenhänge bereits bekannt, trivial oder ohne Bedeutung sind (Otte, Otte & Kaiser, 2004, S. 204). Die iterativen Datenverarbeitungsschritte werden nochmals auf ihre Vollständigkeit und Korrektheit geprüft und das endgütige Modell getestet. Abschließend sollen hier die künftigen Anwender die Verwendbarkeit der erzielten Ergebnisse entscheiden. Aufgrund des stark iterativen Charakters können nach diesem Schritt zur Ergebnisverbesserung weiterführende Anpassungen in den Einstellungen der Lernparameter oder eine neue Auswahl an Lernalgorithmen erfolgen.

4.8 Wissensintegration

Sollten die Analyseergebnisse den gewünschten Wissenszuwachs erzielen, ist anschließend im Rahmen der Wissensintegration eine Rückführung der Erkenntnisse zur Entscheidungsunterstützung in der Produktion und Planung durchzuführen. Hierbei sind geeignete Visualisierungs- und Ergebnisdarstellungsmethoden zu definieren und in die technischen Anforderungen an die Erstellung des IT-Prototyps aufzunehmen. Außerdem

sind an dieser Stelle die Möglichkeiten zur Integration der Data Mining-basierten Ergebnisgenerierung in die vorhandene IT-Landschaft der Produktion und Planung zu berücksichtigen. Der Einsatz von Visualisierungstechniken stellt die notwendige Würdigung der Bedeutung für das Daten- und Ergebnisverständnis und somit für die erfolgreiche Wissensrückführung im industriellen Kontext dar (Lieber, Erohin & Deuse, 2013, S. 391). Folglich steht in diesem KDID-Schritt die Konzeption des „wertschöpfenden" Einsatzes der Ergebnisgenerierung im Vordergrund.

Für die Integration des gewonnenen Wissens in die Montageplanung wurde eine Einbindung der erstellten Data Mining Modelle in die bereits eingesetzte IT-Lösung der Digitalen Fabrik favorisiert. Hierdurch wird zum einen sichergestellt, dass die Montageplaner ihre gewohnte Arbeitsumgebung weiterhin nutzen und in dieser die zusätzlichen Funktionalitäten zur ähnlichkeitsbasierten, produktspezifischen Prozessstrukturerstellung abrufen können. Zum anderen wird hierdurch der Montageplanungsablauf nicht unterbrochen, sondern durch die zur Verfügung gestellte Vorlage beschleunigt.

4.9 Prototyperstellung

Im letzten Schritt von KDID ist ein IT-Werkzeug zu entwickeln, das sowohl die Ausführung des Data Mining Modells als auch die Wissensrückführung in den Planungs- oder Produktionsprozess realisieren kann. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass die Modellanwendung von der Erstellung eines einfachen Berichtes bis hin zur Implementierung einer umfassenden automatisierten Datenauswertung erfolgen kann (Chapman et al., 2000, S. 29). Das Ergebnis kann ein Entscheidungstool darstellen, welches modular aus einem Data Mining und spezifischen Endanwender IT-System aufgebaut ist.

Im Beispiel der Qualitätsprognose entsteht eine modulare Systemarchitektur, welche die maschinelle Vorverarbeitung und Analyse von Prozessmerkmalen hinsichtlich qualitätsrelevanter Muster umfasst. Zur Vermeidung von Verschwendung in automatisierten, verketteten

Produktionssystemen stellt dies einen innovativen Ansatz zur realzeitlichen Entscheidungsunterstützung und Optimierung von Produktionsstandards dar (Lieber, Erohin & Deuse, 2013, S. 391). Im Beispiel der Montageplanung wird im Zusammenspiel des Data Mining Werkzeuges (RapidMiner) mit dem IT-System der Digitalen Fabrik (Teamcenter Manufacturing) eine Data Mining-basierte Planungsunterstützung umgesetzt und etabliert (Lieber, Erohin & Deuse, 2013, S. 391).

5 Fazit und Ausblick

Das KDID-Vorgehensmodell präsentiert einen systematischen Ablauf von Datenanalyseprojekten zur Wissensentdeckung in industriellen Daten. Durch die anwendungsdomänenbedingte Integration zusätzlicher Schritte (Datensammlung, Einbindung von Expertenwissen sowie intensiver Einsatz von Visualisierungstechniken bei der Ergebnisinterpretation) werden die Herausforderungen des industriellen Umfeldes berücksichtigt. Das bildet eine wichtige Grundlage für die Etablierung von Data Mining und Wissensentdeckung in der produzierenden Industrie sowie ihrer Anwendung beispielsweise im Rahmen der Smart Data Forschungs-aktivitäten. Die realisierten Projekte zeigen, dass der intensive Austausch und die enge Zusammenarbeit im interdisziplinären Team für den Gesamterfolg des Wissensentdeckungsprojektes entscheidend sind. In Zukunft gilt es, das KDID-Vorgehensmodell weiter zu validieren und hierbei beispielsweise die durch Industrie 4.0 erbrachten Fortschritte in der Datensammlung und -integration oder die Anforderungen bei der Entwicklung von Smart Services zu berücksichtigen.

6 Acknowledgement

Dieser Beitrag entstand im Rahmen der Forschungsprojekte „Prospektive Ermittlung von Montagearbeitsinhalten in der Digitalen Fabrik (Pro Mondi)“ und „Data Mining in Sensordaten automatisierter Prozesse“ (TP B3 SFB 876). Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt Pro Mondi wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ (Förder-

kennzeichen: 02PJ1110) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Das Teilprojekt B3 des SFB 876 „Verfügbarkeit von Information durch Analyse unter Ressourcenbeschränkung“ ist mit Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literatur

Chapman, P. et al. (2000). CRISP-DM 1.0: Step-by-step data mining guide. SPSS Inc.

Cramer, I. M. (2011). Zwei vermeintlich gegenläufige Ansätze: Zur Integration von Geschäftsregeln und Data Mining. Bosch Software Innovations GmbH.

Deuse J. (1998). Fertigungsfamilienbildung mit feature-basierten Produktmodell-daten. Aachen: Shaker Verlag.

Eversheim W, Deuse J. (1997). Formation of Part Families based on Product Model Data. In: Annals of the German Academic Society for Production Engineering, IV/2, 97-100.

Fayyad, U. / Piatetsky-Shapiro, G. / Smyth, P. (1996). From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. In: AI Magazine, 17(3), 37-54.

Frawley, W. J. / Piatetsky-Shapiro, G. / Matheus, C. J. (1992.) Knowledge Discovery in Databases: An Overview. In: AI Magazine, 57-70.

Gabriel, R. / Gluchowski, P. / Pastwa, A. (2009). Data Warehouse und Data Mining. Herdecke, Witten: W3L Verlag.

Jackson, J. (2002). Data Mining: A Conceptual Overview. In: Communications of the Association for Information Systems (8), 267-296.

Kagermann, H. / Wahlster, W. / Helbig, J. (2013). Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Berlin: acatech.

Kagermann, H. et al. (2014). Smart Service Welt: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Internetbasierte Dienste für die Wirtschaft. Berlin: acatech.

Kisker, H. et al. (2011). Understanding The Business Intelligence Growth Opportunity: A BT Futures Report. Forrester.

Konrad, B. / Lieber, D. / Deuse, J. (2013). Striving for Zero Defect Production: Intelligent Manufacturing Control through Data Mining in Continuous Rolling Mill Processes. In: Robust Manufacturing Control, 13, 215-229.

Lieber, D. / Erohin, O. / Deuse, J. (2013). Wissensentdeckung im industriellen Kontext: Herausforderungen und Anwendungsbeispiele. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 108(06), 388-393.

Mariscal, G. / Marban, O. / Fernandez, C. (2010). A survey of data mining and knowledge discovery process models and methodologies. In: The Knowledge Engineering Review, 25(2), 137-166.

Menzies, T. / Bird, C. / Kocaganeli, E. (2011). The Inductive Software Engineering Manifesto: Principles for Industrial Data Mining. MALETS'11, Lawrence, 19-26.

Mussbach-Winter, U. / Wochinger, T. / Kipp, R. (2013). Marktspiegel Business Software: MES-Fertigungssteuerung. Aachen: Trovarit AG.

Otte, R. / Otte, V. / Kaiser, V. (2004). Data Mining für die industrielle Praxis. München: Hanser Verlag.

Petzelt, D. (2010). Konzept zur rechnerunterstützten Bestimmung von Sollzeiten in der Montageplanung. Aachen: Shaker Verlag.

Runkler, T. A. (2010). Data Mining: Methoden und Algorithmen intelligenter Datenanalyse. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

Säuberlich, F. (2000). KDD und Data Mining als Hilfsmittel zur Entscheidungs-unterstützung. Frankfurt am Main: Peter Lang Verlag.

Schäfer, A. et al. (2012). Big Data: Vorsprung durch Wissen Innovationspotenzialanalyse. Sankt Augustin: Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme IAIS.

Schwab, W. / Keil, T. (2012). Big Data & High-Performance Analyticts. SAS Institute.

Wallis, R. et al. (2013). Data Mining Application in Digital Process Planning: RapidMiner in Automotive Industry. In Fischer, S, / Mierswa, I. / Moreira, J. M. / Soares C. (Ed.): Proceedings of the 4th RapidMiner Community Meeting and Conference (pp. 165-174). Aachen: Shaker Verlag.

Westkämper, E. (2007). Digitale Produktion. In: Bullinger, H.-J. (Ed.): Technologieführer: Grundlagen, Anwendungen, Trends (pp.434-439). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

IT-Sicherheit als besondere Herausforderung von Industrie 4.0

Sander Lass, David Kotarski

1 Problemstellung

Die Vision von Industrie 4.0 – die vollständige Vernetzung aller eingesetzten Systeme zur erweiterten Kommunikation inklusive der Shop-Floor-IT – ergeben sich auch neue Bedrohungsszenarien. Zahlreiche Beispiele aus dem aktuellen Geschehen (Stuxnet, Duqu, etc.) zeigen, dass Cyber-Kriminalität nicht mehr nur auf die Standard-IT und -anwendungen beschränkt ist, sondern auch in die bisher vermeintlich sichere Shop-Floor-Ebene und deren IT-Lösungen (SPS, SCADA, etc.) vordringt. Vor allem Stuxnet hat bewiesen, dass auch auf der Ebene der Steuerung von Maschinen operiert wird. Hier ist es Angreifern möglich, direkt in den Produktionsprozess einzugreifen und diesen zu manipulieren.

Bisherige Ansätze und Vorgehensmodelle gehen entweder sehr generell vor, d.h. sie geben allgemeine Empfehlungen für die IT-Infrastruktur, oder sind im Wesentlichen auf Office- bzw. Standard-IT ausgerichtet und nur mit Aufwand und mit Abstrichen auf die Bedarfe der Automatisierungstechnik zu übertragen. Da für die Steuerung und Überwachung der IT im Produktionsbereich von Fabriken besondere Anforderungen an die eingesetzten Informationssysteme und Anwendungen gestellt werden. Der Beitrag befasst sich mit den typischen Komponenten der Automation und den spezifischen Bedingungen innerhalb von Produktionsanlagen, die die Übertragbarkeit bisheriger Modelle einschränken. Zur Illustration dienen die Grundschutz-Methodik des Bundesamtes für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) und die Defense in Depth-Strategie als Adaption eines Militärkonzeptes für die IT-Sicherheit.

Die anstehende vierte industrielle Revolution mit ihrer starken Vernetzung bis in die Automatisierungstechnik in der Fabrikhalle hat Auswirkungen auf die Implementierung von IT-Sicherheit. Gerade durch die verstärkte

Kommunikation der Elemente, auch überbetrieblich, gewinnen die Umsetzung der Schutzziele Verfügbarkeit, Vertraulichkeit und Authentizität sowie Integrität besondere Bedeutung. Auch hier stellt sich die Frage nach einer geeigneten Adaptierung bestehender Konzepte und Methoden, welche die Anforderungen der Automatisierungsebene berücksichtigen als auch die sich neu ergebenden Problemstellungen (z. B. Wegfall des Air Gaps) adäquat adressieren.

Eine Fallstudie die mit Hilfe des Labors des Anwendungszentrums Industrie 4.0, welches eine hybride Simulationsumgebung als Forschungsplattform und Werkzeug zur Analyse von Produktionsanlagen zur Verfügung stellt, zeigt an Hand von verschiedenen Szenarios den Handlungsbedarf.

2 Die Fabrik als Anwendungsdomäne

Die eingesetzte IT-Infrastruktur produzierender Unternehmen – von den Bürosystemen der klassischen IT bis hin zu den Komponenten der Automatisierung auf der Feldebene – ergibt inzwischen ein komplexes und vielschichtiges Bild. Effektiver Betrieb, Wartung und Erweiterung bedürfen zwangsweise profundes Wissen und systematisches Vorgehen.

2.1 Anwendungs- und IT-Systeme in der Fabrik

Mit dem Ziel einer effizienten Fertigung setzen produzierende Unternehmen typischerweise etliche IT-basierte Lösungen ein. Die Anwendungslandschaft und die konstituierende IT-Infrastruktur bestehen aus unterschiedlichen Systemen und Softwarekomponenten zur Durchführung unterschiedlicher Aufgaben: betriebswirtschaftliche und produktionstechnische Planung von Ressourcen und Aufträgen, die Steuerung der Produktionsanlagen und die Verwaltung von Betriebsmitteln und Lagern sowie für die Logistik von Rohmaterial, Betriebs- und Hilfsstoffen, etc. Abbildung 1 zeigt eine Systematisierung der beteiligten Systeme und deren Wirkungsbereiche. Je nach Ausgestaltung im konkreten Unternehmen sind diese mehr oder wenige stark ausgeprägt.

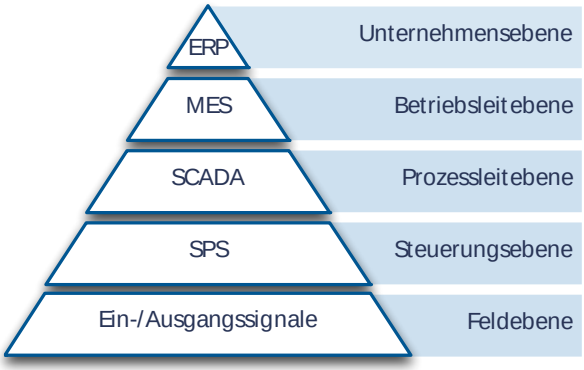


Abbildung 1: Automatisierungspyramide (Langmann,2004, S. 335)

Ausgehend vom Kundenauftrag beginnt an der Spitze der Pyramide mit dessen Erstellung im Enterprise Ressource Planning System (ERP) die betriebswirtschaftliche Planung der Produktion. Die Feinplanung erfolgt anschließend mit Hilfe des Manufacturing Execution System (MES). Als Ergebnis liegen Fertigungsaufträge vor, die mit Hilfe unterschiedlicher Medien – vom Laufzettel an der Gitterbox oder vollständig elektronisch mit geeigneten Terminals, z. B. als Teil der Betriebsdatenerfassung (BDE) – den Werkern oder direkt den Maschinensteuerungen zur Ausführung bereitgestellt werden.

Während der obere Teil der Pyramide (ERP und MES) im Wesentlichen aus Komponenten der Standard-IT aufgebaut ist und von der IT-Abteilung betrieben wird, sind die Systeme des unteren Teils (Prozessleit- bis Feldebene – auch als Shop-Floor bezeichnet) dem Bereich Automatisierung zugeordnet, der die Steuerung, technische Kontrolle und Koordination der Industrieanlagen übernimmt.

Als Bedien- und Beobachtungssystem ermöglicht Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) die erweiterte Überwachung durch die Aggregation und Visualisierung von Daten aus der Steuerungsebene als auch die Fernwartung der Anlagen.

Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) sind für die Verarbeitung von Signalen der Sensorik und das Ansprechen der Aktorik der Anlagen zuständig. Sie sind wesentliche Elemente der Steuer- und Regelkreise der Automatisierung. Weitere Komponenten der Shop-Floor-IT sind neben den SPS die diskrete Verkabelung von Sensorik und Aktorik und Feldbussysteme (z. B. Modbus, PROFIBUS, SERCOS, AS-Interface, etc.) zur Signalkommunikation.

2.2 Besondere Anforderungen der Shop-Floor-Ebene

Aus der Betrachtung der Aufgaben einer SPS als typischen Vertreter eines IT-Systems der Shop-Floor-Ebene, Steuer- oder Regelkreise für physisch agierende Komponenten zu implementieren, ergeben sich erhöhte Anforderungen an das Echtzeitverhalten, sowie an die funktionale und technische Robustheit. Auch auf Grund der rauen Einsatzumgebungen bestehen hinsichtlich Schutzart und -klasse besondere Ansprüche (IEC 60529).

Deshalb werden auf der Shop-Floor-Ebene dedizierte Informationssysteme und Anwendungen mit besonderen Merkmalen eingesetzt. Im Vergleich zu der betrieblichen Standard-IT ergeben sich u.a. folgende zusätzliche Anforderungen und Faktoren (BSI, 2013, S. 27f.):

- Echtzeitfähigkeit der Steuer- und Regelkreise
- Ausführung als Embedded Device
- fehlende Testmöglichkeiten
- lange Betriebs- und Innovationszyklen (> 7 Jahre)
- Sicherstellung von Gefahrlosigkeit für Mensch und Technik

Die dargestellten Punkte haben starken Einfluss auf die Gestaltung der IT-Sicherheit in der Werkhalle. Typische Lösungen aus der Standard-IT sind nur schwer oder mit größerem Aufwand bzw. spezifischen Anpassungen sinnvoll umsetzbar.

Wegen der unumgänglichen Aufrechterhaltung der Echtzeitfähigkeit, d. h. zum großen Teil harte Echtzeit mit Reaktionszeiten < 1ms, sind Aufbau und Segmentierung von Shop-Floor-Netzwerken nach sicherheitstechnisch relevanten Kriterien eine besondere Herausforderung. Komponenten, die Sicherheitsmaßnahmen technisch umsetzen, dürfen den Datenaustausch im System nicht verzögern. Mit diesen zusätzliche Leistungsanforderung gehen erhöhte Kosten einher, so dass in der Praxis auch schon mal das angestrebte Sicherheitsniveau nach untern korrigiert wird.

Unter eingebetteten Systemen (Embedded-Systems) sind spezialisierte Geräte subsummiert, die in Baurat und Hardwareausstattung auf einen bestimmten Aufgabenbereich abgestimmt sind. Embedded-Systems besitzen häufig längere Wartungszyklen. Dies liegt u. a. darin begründet, dass die Ausrollung von Patches mit hohem Aufwand verbunden ist. Updates stellen den Komplettaustausch der auf dem Gerät befindlichen Software (Firmware) dar, spezifische Konfigurationen (Einstellungen und Programme) müssen anschließend neu eingespielt und angepasst werden. Ergänzend gestalten sich die Update-Prozesse häufig sehr komplex, weshalb die Ausführung nicht intern, sondern oftmals durch den Hersteller selbst erfolgt und damit zusätzliche Kosten verursacht (BSI, 2013, S. 27).

Ein effektives Testsystem mit realistischer Umgebung ist aus Kostengründen selten vorhanden. Somit sind zum Beispiel Penetrationstests (Eindringen in die IT-Systeme einer Anlage zur Aufdeckung von Sicherheitslücken) ohne den Produktionsbetrieb zu gefährden bzw. zu beeinflussen nur begrenzt möglich. Dies bezieht sich auch auf die Durchführung von Vorabtests, wie z. B. beim Patch- und Updatemanagement üblich.

Im Vergleich zur Standard-IT ist der Lebenszyklus von Industrieanlagen und deren Komponenten beträchtlich länger. Dies bedeutet, dass in der Werkhalle Geräte unterschiedlichster Generationen zu finden sind und neue Informationstechnologien sich vergleichsweise langsam durchsetzen. In der Praxis existieren dahingehend interessante „Integrationslösungen“, bei deren Implementierung IT-Security, im Gegensatz zur Sicherstellung von Safety, nur unwesentlich oder gar keine Rolle spielten.

Im Kontext von Sicherheit bei Produktionsanlagen müssen die Begriffe Security und Safety differenziert werden. Neben der reinen Sicherheit als Schutz einer Anlage vor dem Menschen, ist die Sicherstellung des Schutzes von Menschen und Umwelt in der Werkhalle unbedingt in die Betrachtungen mit einzubeziehen. Während des Betriebs einer Produktionsanlage müssen die interagierenden Personen vor Schaden an Leib und Leben geschützt werden. Das hieraus entstehende Ziel wird typischerweise unter den Begriffen Safety oder funktionale Sicherheit (vgl. BSI, 2013, S. 12) subsummiert. Safety bezieht sich im Wesentlichen auf den Schutz von Menschen und ihrer Umwelt. Die funktionale Sicherheit bezüglich des gefahren- und störungsfreien Betriebes muss sichergestellt sein.

Im Gegensatz hierzu hat Security in Bezug auf IT einen anderen Fokus. Das zu schützende Objekt sind Informationen. Es gilt, das System vor schädlichen Eingriffen seitens des Menschen oder der Umwelt zu schützen. Schwachstellen sind mögliche Fehlbedienung, vorsätzliche Handlungen oder organisatorische Defizite. Die zu schützenden Hauptziele sind die Integrität, Vertraulichkeit und Verfügbarkeit der Daten sicherzustellen.

Gesetzlich vorgeschrieben (Arbeitsschutz, etc.) oder durch die bisherige Abschottung der produktionsnahen IT bzw. Automatisierungstechnik, welches ein Gefühl der Sicherheit vermittelt, beschränken sich die Sicherheitsaktivitäten häufig auf den Safety-Bereich.

Es bleibt festzuhalten, dass IT-Sicherheit für Industrieanlagen der Generation „Industrie 3.0“ ein relevantes Thema darstellt. Auf der einen Seite besteht durch die speziellen Gegebenheiten der Shop-Floor-Ebene eine nicht ausreichend effektive Anwendbarkeit klassischer IT-Sicherheitskonzepte. Andererseits können eben jene speziellen Gegebenheiten den Sicherheitsbeauftragten helfen, ein gewisses Maß an Sicherheit zu gewährleisten.

Beispielsweise sind zwei Systeme physikalisch getrennt, die jedoch Daten vom jeweilig anderen System benötigen, erfolgt der Datenaustausch unter

Verwendung eines Datenträgers. Es ergibt sich eine erhöhte Zugangssicherheit durch die notwendige physische Interaktion vor Ort. Dieses Prinzip wird als „Air Gap“ bezeichnet.

Werden proprietäre Systeme mit herstellerspezifischen bzw. nicht standardisierten Protokollen eingesetzt, kann sich dies durchaus positiv auf die Security auswirken. Gemäß dem Prinzip „security by obscurity“ sind Informationen zur jeweiligen Implementierung nicht oder kaum öffentlich zugänglich und erschweren das Aufdecken von Schwachstellen und deren Ausnutzung. Da es profundes Spezialwissen und spezielle Entwicklerwerkzeuge auf Seiten des Angreifers bedarf, ist einerseits der Aufwand einer Attacke sehr hoch und anderseits dessen Wirkungskreis beschränkt. Die Zahl potenzieller Angreifer ist demnach gering.

2.3 Der Grundschutz des BSI

Über die letzten zwei Jahrzehnte sind für die Standard-IT verschiedene Familien von Normen und Richtlinien zur Behandlung von IT-spezifischen Risiken entstanden. Sie beinhalten Vorgehensweisen und Konzepte zur systematischen Bearbeitung sowie Möglichkeit entsprechender Zertifizierungen. Beispiele sind die internationale ISO 27000er-Familie (ISO, 2005), die nationale Variante des Bundesamtes für die Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) mit dem „IT-Grundschutz“ (BSI, 2008), aus den USA die NIST Special Publications der 800er-Reihe (NIST, 2010) oder für die Zertifizierung von Produkten die internationalen Common Criteria (CoCri 2012).

Der vom Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik definierte Grundschutz wird in Form von Katalogen umgesetzt und definiert das folgende Begriffsmodell. Eine Bedrohung ist ein Umstand oder Ereignis, durch das ein Schaden entstehen kann (BSI, 2014, Abschnitt: Bedrohung). Der Schaden bezieht sich im Falle der Informationstechnik auf Verfügbarkeit, Integrität oder Vertraulichkeit von Informationen. Damit eine Bedrohung zur Gefährdung wird, muss für ein konkretes Objekt eine bekannte Schwachstelle vorliegen. Welcher Schutz für die wertschöpfenden

Prozesse angemessen ist, definiert den Schutzbedarf (BSI, 2014, Abschnitt: Schutzbedarf).

Die in den Katalogen enthaltenen Maßnahmen lassen sich im Wesentlichen im Bereich der Standard-IT applizieren. Eine Projektstudie am Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik der Universität Potsdam in Zusammenarbeit mit der HiSolutions AG als Spezialist für IT-Risk und Compliance zeigte, dass die besonderen Anforderungen und Gegebenheiten der Shop-Floor-IT nur wenig berücksichtigt werden (Lass & Fuhr, 2014, S. 13ff.] Auch das BSI hat das Potenzial erkannt und arbeitet an einer Erweiterung ihre Grundschutz-methodik auf Anwendbarkeit in der industriellen Fertigung.

2.4 Defense in Depth als Lösungsansatz

Um seine Infrastruktur zu schützen, wird oft die „Defense in Depth“-Strategie eingesetzt. Es werden mehrere Verteidigungsmaßnahmen, auch als Abwehrlinien bezeichnet, kombiniert und so Risiken eingegrenzt. Sämtliche Kommunikation erfolgt, wie Abbildung 2 verdeutlicht, in separierten Netzsegmenten, welche zusätzlich mit Intrusion Detection Systemen ausgestattet sind, um eventuelle Angriffe schnell aufzuzeigen und rechtzeitig Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Das Einteilen in verschiedene Zonen ist in den Standards ANSI/ISA-99 (IEC62443) geregelt.

Der Aufwand um eine Shop-Floor-Infrastruktur zu kompromittieren wird durch den Einsatz mehrerer Einzelmaßnahmen (DMZ, Paket Filter, IDS, Timed Access Control, Deaktivierte USB-Ports) erhöht. Damit reduziert sich das Risiko und es bleibt mehr Zeit um entsprechende Gegenmaßnahmen einzuleiten. Abbildung 2 erläutert den schematischen Aufbau. Systeme werden in verschiedene Zonen segmentiert und können nur mittels speziellen „Leitungen“ sogenannte Conduits kommunizieren. Dabei ist die Kommunikation so reglementiert, dass sämtliche irrelevanten Informationen, welche nicht direkt zwischen zwei Zonen benötigt werden, blockiert werden. Dieses auch als „Zone and Conduit“ definierte Modell ist eines der zentralen Elemente der Defense in Depth-Strategie.

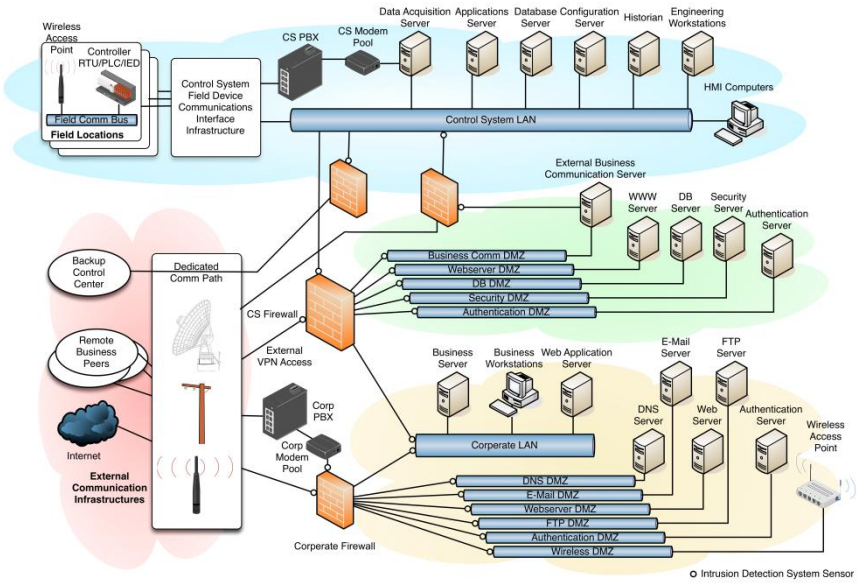


Abbildung 2: Beispiel einer Defense in Depth-Strategie (Kuipers, 2006, S. 23)

Defense in Depth bietet jedoch keinen vollständigen Schutz, härtet aber das System als solches vor Angriffen. Bei Standardangriffen (z. B. Portscans, Bruteforce, Skript-Kiddies) wirken diese Maßnahmen sehr gut, sodass schnell das Interesse verloren wird. Allerdings ist die abschreckende Wirkung im Falle von gezielten Angriffen, welche keine zufällige Bedrohung darstellen, sondern eine klare Absicht erkennen lassen und mit dem Einsatz von Geld für das Eindringen in die Anlage einhergehen, eher gering.

Defense in Depth kann in beliebiger Granularität umgesetzt werden, jedoch ist mit zunehmender Detailtiefe auch mit erheblichen Kosten zu rechnen. Da einzelne Zonen nur kontrolliert und reglementiert kommunizieren, sollten diese wohl überlegt strukturiert werden. Jeder Conduit muss gepflegt/gewartet und auch an die sich ändernden Anforderungen angepasst werden. Dementsprechend ergeben sich aus der zunehmenden Anzahl von Conduits auch steigende Kosten für Wartung und Anpassung.

Auch werden mit dem zunehmenden Einsatz von Sicherheitstechnik die Grenzen der Echtzeitanforderungen erreicht. Eine generelle Lösung kann

hier nicht aufgezeigt werden, da die jeweiligen Spezifika jeder Anlage genau berücksichtigt werden müssen. Defense in Depth dient daher als Leitfaden um zum Beispiel das „Zone and Conduit“-Modell einzusetzen. Nachdem ein Modell für die IT-Sicherheit einer Anlage aufgestellt wurde, muss es validiert, verifiziert und oftmals nachträglich angepasst werden. Nachträgliche Änderungen sind im laufenden Betrieb jedoch nur mit Aufwand zu realisieren, da es keine ausgiebigen Tests an Produktionsanlagen geben kann.

2.5 Der Faktor Mensch

Auch in der Werkhalle spielt der Faktor Mensch im Zusammenhang mit sicherheitstechnischen Belangen eine Rolle. Der sorglose Umgang mit Wechseldatenträgern in Verbindung mit Bring-your-own-Device stellt die Sicherheitsexperten vor neue Herausforderungen (Deutschland sicher im Netz, 2014, S. 24). Ähnlich wie bei Stuxnet werden USB-Sticks mit ihrer gefährlichen Payload immer häufiger. Speziell präparierte Datenträger werden an Orten, die das Personal aufsucht ausgelegt und auf die Neugier der Angestellten gesetzt. Steckt ein Angestellter einen solch präparierten Stick in sein Dienstgerät, so beginnt der eigentliche Angriff auf das System. Unauffällig werden Daten transferiert und ein Einfallstor für weitere Angriffe geschaffen. Hier reichen technische Maßnahmen (z.B. Deaktivieren der USB-Ports) nicht aus, da sie den Arbeitsablauf behindern. Es müssen organisatorische Regelungen gefunden werden, die zum einen einfach zum anderen aber auch weitreichend sind. Beispielsweise könnten nur firmeneigene Datenträger erlaubt sein und alle privaten Datenträger sind per Dienstanweisung nicht zu benutzen. Auch hier müssen eventuelle Situationen von Vorhinein betrachtet werden: Was passiert wenn die Größe des Datenträgers nicht ausreicht? Wer inventarisiert und wartet die Firmendatenträger? Wie wird unterbunden, dass Datenträger die Firma verlassen?

Auch hier rüsten Betreiber und Angreifer kontinuierlich auf, weshalb das Sicherheitskonzept stetig angepasst werden muss. Ist die technische Seite

sehr gut abgedeckt, so versuchen die Angreifer die Lücken auf organisatorischer Seite auszunutzen. Oft geben nicht sensibilisierte Mitarbeiter unbeabsichtigt unternehmensrelevante Daten weiter. (Mitnick & Simon, 2003, S. 16f.) Für sie harmlose Informationen ergeben in ihrer Gesamtheit jedoch wertvolle Fakten für die potentiellen Angreifer. Beispielsweise empfinden Angestellte Informationen über interne Abläufe oder die eingesetzte Standardsoftware als harmlos. Die daraus ableitbaren Schlussfolgerungen hingegen (Wissen welche Person zugriffsberechtigt bzw. weisungsberechtigt ist oder bekannte Schwachstellen bei der eingesetzten Software) sind durchaus für die Planung eines Angriffs von Nutzen. Mittels einfacher Prinzipien ist es möglich das Handeln von Angestellten zu manipulieren. Ähnlich wie beim Marketing werden dabei die sechs Prinzipien von Cialdini (Autorität, Zuneigung, Revanchieren, Konsequenz, soziale Bestätigung und Mangel) erläutert, die die Grundlage für eine Manipulation einer Person schaffen, angewendet. (Cialdini, 2001, S. 76ff.) Social Engineering ist und bleibt eine eigesetzte Angriffstechnik, der mit organisatorischen und technischen Maßnahmen begegnet werden muss.

3 Die 4. industrielle Revolution

Industrie 4.0 als vierte industrielle Revolution propagiert eine Abkehr von der klassischen automatisierten Fabrik, die große Mengen gleichartiger Produkte auf der Basis zentraler Produktionspläne herstellt. Die Vision beschreibt die selbstorganisierte Fabrik, in der intelligente und teilautonome Objekte sich selbst die passenden Ressourcen suchen und viele Probleme der heutigen Fabrikorganisation durch direkte lokale Interaktion vermieden werden. Dieses Cyber Physical Production System (CPPS) realisiert eine neue Art von Fabrik – die „Smart Factory“.

3.1 Die vernetzte Fabrik

Vernetzung und Kommunikation kommen in der Smart Factory besondere Bedeutung zu. Der Arbeitskreis Industrie 4.0 nennt als wesentliche Elemente autonome eingebettete Systeme, die drahtlos untereinander und mit dem Internet vernetzt sind (Kagermann, Wahlster & Helbig, 2012, S. 17).

Die flächendeckende Vernetzung von Informations- und Kommunikationstechnik zu einem Internet der Dinge, Dienste und Daten ist der Grundgedanke von Industrie 4.0 (Spath, 2014, S. 2)

Bezogen auf die Automatisierungspyramide erfolgt die Integration der Systeme in vertikaler Richtung – auch unter dem Begriff Konvergenz der IT aggregiert – als auch horizontal über ganze Wertschöpfungsnetzwerke. Die klare Trennung der Ebenen der klassischen Pyramide (Abbildung 1) ist in der Smart Factory nicht mehr gegeben (Günthner, Chisu & Kuzmany, 2010, S. 44). Ergänzend soll der gesamte Lebenszyklus des Produktes einbezogen werden. Informationen aus der Nutzung und Verwendung eines Produktes fließen in den Produktionsprozess ein und decken Potenziale auf (Barthelmey, 2014, S. 209).

3.2 Dezentrale Steuerung mit autonomen intelligenten Elementen

Industrie 4.0 stellt innerhalb der Produktionsorganisation und -steuerung moderne Technologien, um dezentral gesteuerte Produktionsanlagen mit intelligenten und selbststeuernden Elementen in der Werkhalle zu gestalten. AutoID-Technologien und smarte Sensoren statten Systeme und Produktionsobjekte mit erweiterten Fähigkeiten zur Umgebungserfassung und Entscheidungsfindung aus.

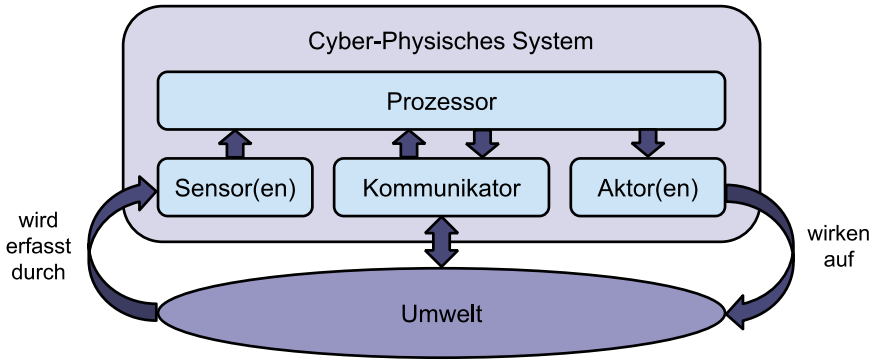


Abbildung 3: Schematischer Aufbau eines Cyber-Physischen Systems (Veigt, 2013)

Mit diesen, auch als Cyber Physical Systems (CPS) bezeichneten Elementen, und deren Zusammenspiel werden neue Paradigmen der dezentralen Steuerung und Prozessgestaltung in Fabrikanlagen implementiert. CPS realisieren die eindeutige Identifizierung und Lokalisierbarkeit von Produktionsobjekten, besitzen Informationen zu ihrem aktuellen Zustand und zu ihrer Historie, sowie zu alternativen Wegen zum gewünschten Zielzustand. Sie können autonom Entscheidungen treffen, d. h., Umgebungsinformationen aus der Sensorik oder der Kommunikation mit anderen CPS werden selbsttätig verarbeitet und entsprechende Aktionen ausgelöst. Abbildung 3 zeigt die vorhandenen Kommunikationswege sowie die möglichen Interaktionen zwischen System und Umgebung.

3.3 Standardisierung des Informationsaustauschs

Bedingt durch das dezentrale Steuerungskonzept findet in der Smart Factory ein hohes Maß an Kommunikation statt. Etliche Informationen unterschiedlicher Aggregationsstufen werden zwischen den einzelnen Systemen ausgetauscht. Von einfachen An-Aus-Signalen bis hin zu vielschichtigen Datenstrukturen, welche die von CPS aufbereiteten Statusinformation als auch Konfigurations- und Fertigungsdaten transportieren, Anfragen beinhalten oder komplexe Interaktionen beschreiben. Durch die übergreifende Integration der Systeme über Domänen- und Hierarchiegrenzen, sowie über den gesamten Lebenszyklusphasen eines Produktes hinweg, entstehen hohe Ansprüche an die Interoperabilität der Systeme.

Durch geeignete Standards werden sowohl die technische als auch die semantische Dimension abgebildet, um eine ungehinderte Kommunikation aller beteiligten Elemente zu ermöglichen. Beispielsweise bietet OPC-UA einen flexiblen Container, der auch die Kommunikationsinfrastruktur vereinfacht (im Gegensatz zum klassischen OPC-DA). In Kombination mit einer semantischen Beschreibung entfallen umständliche und fehleranfällige Konvertierungen und hoher Anpassungs- und Konfigurationsaufwand. Universal Machine to MES (UMCM) ist dahingehend ein viel-

versprechende Ansatz. Feldbusssysteme lösen zunehmend durch Einsatz smarter Sensoren die diskrete Verkabelung ab (Lass & Hennig, 2012, S. 16ff.). Sie lassen sich einfach in Standardinfrastrukturen integrieren bzw. können dann deren Medien (Kommunikationsstack und Protokolle) nutzen. Bereits jetzt gibt es dahingehend durchaus markreife Systeme z.B. EtherCAT, Modbus TCP. In der Realität werden stets autonome Objekte unterschiedlicher Hersteller mit unterschiedlichen Fähigkeiten zur Autonomie in Fertigung, Montage und Logistik interagieren. Bisherige Insellösungen einzelner Bereiche, die eine aggregierte und zeitnahe Auswertung (wie Manufacturing Analytics) nur mit großem Aufwand und inhaltlichen Verlusten zuließen, werden durch eine einheitliche und standardisierte Kommunikationsinfrastruktur ersetzt.

3.4 Die psychosoziale Komponente

Der Arbeitsablauf kann sich durch Industrie 4.0 stark verändern. Human Maschine Interaction (HMI) gewinnt an Bedeutung (Scheer, 2013). Durch die Steigerung der Komplexität von Maschinen und Steuerungssystemen steigen auch die Anforderung an das technische Personal. Der Mensch ist in der Smart Factory ein wesentlicher Akteur. Durch technische Unterstützung in seinen Fähigkeiten erweitert, wird er vom klassischen Bediener zum Steuernden und Regulierenden. Stark ausgeprägt sind selbstverantwortliche Autonomie und dezentrale Führungs- und Steuerungsformen sowie erweiterte kollaborative Arbeitsorganisation (Kagermann, Wahlster & Helbig, 2013, S. 27). Langjährige Erfahrung qualifizierter Mitarbeiter zur Beurteilung und Lösung von Ausnahmesituationen, kombiniert mit den informationstechnischen Werkzeugen des Industrie 4.0 Konzepts, ergeben neben hoher Effizienz auch bisher nicht denkbare Entfaltungsmöglichkeiten für Mitarbeiter. (Spath, 2014, S. 2)

4 Mit Industrie 4.0 wird alles anders?

Durch den zuvor schon erwähnten stetig steigenden Grad an Komplexität und Vernetzung, steigen auch die Risiken und der Bedarf an adäquaten Konzepten zur deren Minderung.

4.1 Anpassung bisheriger Konzepte

Durch die verstärkte Kommunikation der Komponenten von Industrie 4.0 sind nun auch externe Quellen (Kundenwünsche, Zuliefererdaten) in den Produktionsprozess integriert. Da der Grad der Vernetzung stetig steigt und auch der Bedarf an Informationen unternehmensübergreifend ist, sind vermeintlich sichere Konzepte wie Air Gap nicht mehr zeitgemäß (Byres, 2013, S. 29ff.). Eine Anpassung bisheriger Konzepte ist erforderlich:

- Entwicklung einheitlicher Protokolle
- Erhöhung des Wirkungsgrad klassischer Technologien
- ergänzende Sensibilisierung der Mitarbeiter
- Sicherstellung der Integrität, Vertraulichkeit und Authentizität

Durch die Entwicklung einheitlicher Protokolle zwecks Interoperabilität und dem zunehmenden Einsatz vom Standard-IT ist die potentielle Wirkung eines Exploits größer, da eine größere Anzahl von Benutzer betroffen sind. Ein Exploit ist ein Softwarecode, welcher eine Schwachstelle gezielt ausnutzt um die Verwundbarkeit aufzuzeigen. Mittels Exploits kann festgestellt werden, ob die vorhandene Schwachstelle auch tatsächlich genutzt werden kann. Auch ist der Exploit mit weniger Aufwand zur erstellen, da die benötigten Informationen vorhanden oder einfach zu erlangen sind bzw. Erkenntnisse ohne Probleme von einem System auf das andere übertragen lassen. Damit fällt auch das ebenfalls als sicher geglaubte Prinzip „security by obscurity“. [Byres & Lowe, 2004, S. 213ff.]

Da die Kommunikation auf semantisch höherer Ebene bzw. durch einen höheren Aggregationsgrad gekennzeichnet ist, wird die Erweiterung klassischer Verfahren notwendig: beispielsweise semantische Plausibiltätschecks von Steuerungsinformationen in Firewalls der Gateways zwischen Netzwerksegmenten anstelle einfacher headerorientierter Packetfilterung und dies alles unter Berücksichtigung der Echtzeitanforderungen. Komponenten die Sicherheitsmaßnahmen technisch umsetzen (Firewall, Verschlüsselung, etc.) implementieren algorithmisch aufwendigere Verfahren und

stellen im Vergleich zur herkömmlichen Technik einen höheren Kostenfaktor dar. Lösungsanbieter müssen unter Ausnutzung der Fähigkeiten von CPS die Markttauglichkeit solcher Produkte sicherstellen.

Auch in Zukunft wird der Mensch in einem Produktionssystem als Akteur eine zentrale Rolle spielen. Im Hinblick auf IT-Security bleibt damit Social Engineering ein wesentliches Thema und entsprechende Maßnahmen ein wichtiges Instrument zur Realisierung von sicheren Systemen. Die Sensibilisierungsmaßnahmen müssen auch vermitteln, dass der Mitarbeiter sich nicht ausschließlich auf die Intelligenz des Systems hinsichtlich Security verlässt, sondern sich selbst weiterhin als sicherheitsverantwortlichen Akteur begreift.

Dieses allgemeine Ziel gilt nicht nur weiterhin, sondern gewinnt im Industrie 4.0 Kontext besondere Bedeutung. Da die Komponenten der Anlage intern Daten austauschen als auch die unternehmensübergreifende Kommunikation stattfindet ist die effektive Implementierung entsprechender Maßnahmen und damit die Schaffung von Vertrauen in die Informationen eines der wichtigsten Zielstellungen für die Zukunft von Industrie 4.0. (Kagermann, Wahlster & Hebig, 2013, S. 45 , 50).

4.2 Neue Konzepte

Als Teil der Lösungsstrategie, IT-Sicherheit in Industrie 4.0 adäquat zu integrieren, bedarf es auch neuer Konzepte. Systematisch betrachtet ergeben sich unterschiedliche Aufgabenfelder:

- Integration von Sicherheitsmaßnahmen bereits bei der Standardisierung von Industrie 4.0 Komponenten
- Berücksichtigung bei der Planung und Entwurf der Produktionsanlage (Security per Design)
- Bereitstellung Vorgehensmodellen zum Übergang bestehender Anlagen vom Ist zu Industrie 4.0

- Angepasste Tools für die Wartung und Pflege der komplexen Software- und Steuerungssysteme der Smart Factory

Entsprechende Mechanismen zur Realisierung von Sicherheit sind vorzusehen und praxistauglich zu gestalten. Gerade hier sind die Standardisierungsgremien gefragt, IT-Sicherheit nicht als lästiges Begleitthema im Sinne eines zusätzlichen und vermeidbaren Add-Ons zu behandeln, sondern als von Grund auf als wichtiges Thema zu etablieren.

Sicherheit im Nachhinein zu implementieren bedeutet häufig erhöhten Aufwand und kann auf Grund der technischen Komplexität zu schwer beherrschbaren Seiteneffekten führen. Allerdings ist dieser Punkt kritisch zu betrachten. Gerade kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) werden in den seltensten Fällen komplette Anlagen und Prozesse umstellen. Umso wichtiger sind Werkzeuge, welche die prozessspezifische Adaption von Industrie 4.0 Lösungen aufwandsarm gestalten und deren ganzheitliche Analyse hinsichtlich Wirtschaftlichkeit gestatten. Mit resultierenden Nutzenargumentationen können zielgerichtet Inventionen vorbereitet und Fehlschläge vermieden werden.

Im Hinblick auf die langen Innovationszyklen von Industrieanlagen und den hohen Investitionsbedarfs einer ganzheitlichen Umstellung wird die vollständige Adaption von Industrie 4.0 Konzepten einen längeren Prozess darstellen. Zur erfolgreichen Gestaltung dieser Übergangsphase der Heterogenität (klassische Komponenten neben Industrie 4.0 Elementen) sind langfristige Lösungen und Migrationskonzepte gefragt, welche die Transformation systematisch und zielführend gestalten.

Die Wartungs- und Pflegetools müssen entsprechende Richtlinien einhalten und während des gesamten Einsatzes beherrschbar bleiben. Sie müssen in ihrer Methodik und ihren Funktionen unterschiedlichen Nutzergruppen (IT-Abteilung, Automatisierungstechniker) im operativen Betrieb in Fragen der Sicherheit assistieren und eine ganzheitliche Perspektive hinsichtlich vertikaler und horizontaler Integration der Systeme bieten.

4.3 Fallstudie

Untersuchungen im Labor des Lehrstuhls für Wirtschaftsinformatik der Universität Potsdam zeigen den konkreten Handlungsbedarf. Als Anwendungszentrum Industrie 4.0 Potsdam (AZI 4.0) stellt das Labor reale Komponenten (z. B. SPS, Robotersteuerungen, CPS mit unterschiedlichen Graden an Intelligenz, etc.) und eine Softwareumgebung zur Verfügung. Es erlaubt die prozessspezifische Adaption von Industrie 4.0 Lösungen und die Simulation von Fabrikanlagen. (vgl. www.industrie40-live.de). Mit Hilfe von Szenarien können mit der Simulationsumgebung des AZI 4.0 Bedrohungen und mögliche Gegenmaßnahmen praxisnah ermittelt und überprüft werden.

Die Abbildung einer typische Fabrikanlage bzw. Fertigungsprozesses, basierend auf bereits umgesetzten Szenarios diverser Projekte in der Simulationsumgebung, stellt die Grundlage für die Simulation und Untersuchung verschiedener Testcases dar. Angriffe auf die vorhandenen Industriekomponenten der Anlage im Rahmen von Penetration Tests bilden die Testcases. Durch systematisches Vorgehen und Zugriff auf das Fabrik-LAN war die Manipulation der Anlage innerhalb kurzer Zeit möglich. Gemäß der Simulationsmethodik (vgl. Lass & Gronau, 2012; Gronau, Theuer & Lass 2012) wurden folgende Testcases aufgestellt:

- Ausspähung der Infrastruktur
- bekannte Schwachstellen nutzen
- reguläre Operation von Systemelementen verhindern
- Manipulation des Cyber Physical Production System

Mit Hilfe des Werkzeugs Nessus erfolgte eine erste Untersuchung des Netzwerkes. Nessus ist ein Netzwerk- und Vulnerability Scanner. Zahlreiche Netzwerkkomponenten antworten beim Netzwerkscan mittels einen für sie typischen Fingerprint. Dieser kann genutzt werden um das eingesetzte Betriebssystem, sowie auch die Art des Gerätes zu bestimmen. So war es möglich die anzugreifenden Komponenten BDE-Terminal, Robotersteuerung

und SPS schnell ausfindig zu machen und anlagenspezifische Informationen zu beschaffen.

Nach Kenntnis der konkreten Netzwerkinfrastuktur sowie Art und Typ der eingesetzten Geräte, konnten spezifische Schwachstellen mit Hilfe von Metasploit identifiziert werden. Metasploit ist ein komfortables webbasiertes Tool mit Zugriff auf eine Datenbank möglicher Schwachstellen. Vor einigen Jahren war noch ein hohes Maß an Fachwissen notwendig um solche Untersuchungen durchzuführen. Durch eine immer einfacher werdende Bedienung von Analyse- und Angriffswerkzeuge, wächst auch der Kreis der Anwender, die es missbräuchlich einsetzen. Metasploit ermöglicht unter anderen das einfache Entwickeln und Ausführen von Exploits.

Eine Lücke im IP-Stack des BDE-Terminals ermöglichte den Neustart des Gerätes ohne Vorwarnung. Da dieser Angriff beliebig oft funktionierte, war es möglich, das Terminal durch ständigen Neustart zu blockieren. Danach wurde die Steuerung des Roboters attackiert. Diese ist zur Konfigurationszwecken in das Produktionsnetzwerk eingebunden. Über einen offenen Port, welcher sich bei der Verbindung mittels Telnet als Debugschnittstelle herausstellte, konnte nach kurzer Zeit der Roboter in einen undefinierten Zustand versetzt werden. So schalteten die Safety-Maßnahmen den Roboter in den Störungsmodus. Das Gerät war nicht mehr verfügbar, die Funktionsfähigkeit musste durch manuellen Eingriff wiederhergestellt werden. Mit entsprechenden Information (z. B. durch intensives Studium von Handbüchern, Datenblättern, etc.; verfügbar im Internet) ist das zielgerichtete und unbemerkte Manipulieren des Roboterprogramms ohne weiteres möglich, wenn auch mit hohem Aufwand verbunden. Eine besondere Bedrohung liegt in der subtile Veränderungen von Parametern, die durch langfristiges Wirken nur schwer nachvollziehbare Störungen oder Qualitätsprobleme hervorrufen (Falliere, Murchu, Chien, 2011, S. 3f).

Nach den Angriffen auf die klassischen Komponenten standen die eingesetzten CPS im Mittelpunkt der Betrachtung. Nach Analyse des

aufgezeichneten Datenverkehrs und mittels Replay-Attacke konnten die übertragen Daten beeinflusst werden. Bei einer Replay-Attacke werden valide Datenpakete modifiziert und in das Netzwerk eingeschleust. Das Empfängersystem geht von einer normalen Kommunikation aus und interpretiert die Daten regulär. Im konkreten Fall ist es gelungen, Mengenmeldungen eines CPS-Werkstückträgers zu modifizieren. Resultat war die Erhöhung der Schlechtmenge eines Arbeitsganges, deren Ursache in den Kontrollsystemen nicht nachvollziehbar war und die effizienten Planungsaktivitäten verhinderte.

Es folgte der systematische Versuch, die Autonomie des CPS für Manipulationen auszunutzen und die möglicherweise implementierten Plausibilitätschecks zu umgehen. Nach Auswertung der Kommunikation mit der koordinierenden SPS des Transportsystems, konnten Antworten von Seiten der Steuerung imitiert werden. Als Szenario wurden Teile des Transportsystems als belegt markiert und die autonome Wegplanung erzeugte einen Mehraufwand durch Umwege zu den Bearbeitungsstation.

Die Testfälle zeigen, dass die Kommunikation nicht ausreichend hinsichtlich der Schutzziele Integrität, Authentizität und Verfügbarkeit abgesichert sind und klassische Angriffsmethoden auch im Industrie 4.0 Kontext effektiv anwendbar sind. Da ein CPS Informationen über sich für andere Systeme bereitstellt, müssen diese Daten valide sein. Im Labor konnte gezeigt werden, dass wenn Daten zum Zustand des Werkstücks verändert werden, erhebliche Folgen daraus resultieren.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Implementierung der unter Industrie 4.0 subsumierten Konzepte und Technologien bedeutet beträchtliche Veränderungen in der Anwendungslandschaft produzierender Unternehmen. Durch diese vierte industrielle Revolution ergeben sich neue Herausforderungen hinsichtlich IT-Sicherheit und deren systematischen Umsetzung.

Weder die Maßnahmen und Best-Practice-Methoden aus der klassischen IT-Welt noch die besonderen Gegebenheiten aus der Automatiserungsdomäne

bieten ausreichend Effektivität für die Anlagen der neuen Generation Industrie 4.0. IT-Sicherheit umzusetzen. Bewährte Konzepte (wie BSI-Grundschutz sind nicht ohne weiteres auf den Anwendungsbereich Fabrik anzuwenden. Spezifika des Automatisierungsbereichs, die bisher durchaus als Sicherheitsmechanismen wirkten, verlieren durch Umsetzung des Industrie 4.0 Paradigmas ihre Effektivität.

Die Untersuchungen im Labor des Anwendungszentrum Industrie 4.0 zeigen den dringlichen Handlungsbedarf bzgl. des Thema IT-Sicherheit und dessen Relevanz für Industrie 4.0. Adäquate Sicherheitskonzepte müssen die Komponenten von Produktionsanlagen und Automationssystemen stärker einzubeziehen, um Schaden zu vermeiden.

Die angesprochen Themenfelder liefern eine grundsätzliche Richtung für des Vorgehen und setzen die Schwerpunkte, die für weitere Arbeiten des Anwendungszentrum Industrie 4.0 die aktuelle Arbeitspakete definieren.

Literatur

Barthelmey, A. et al. (2014). Cyber Physical Systems for Life Cycle Continuous Technical Documentation of Manufacturing Facilities. Procedia CIRP, 17, 207-211.

Brettelet, M. al. (2014). How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective. In: International Journal of Science, Engineering and Technology 8 (1), 37-44.

Bundesamt für Informationssicherheit (2014) IT-Grundschutzkataloge: Glossar und Begriffsdefinitionen, Stand: 13. EL Stand 2009

Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (2008). IT-Grundschutz-Vorgehensweise, BSI-Standard 100-2, Version 2.0.

Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (2013). ICS-Security-Kompendium.

Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (2014). Industrial Control System Security -Top 10 Bedrohungen und Gegenmaßnahmen.

Byres, E. (2013). The air gap: SCADA's enduring security myth. In: Communications of the ACM, 56(8), 29-31.

Byres, E. / Lowe, J. (2004). The myths and facts behind cyber security risks for industrial control systems. In Proceedings of the VDE Kongress (Vol. 116). Berlin, 213-218.

Cialdini, R. B. (2001). The Science of Persuasion. Scientific American, 284(2), 76-81.

Criteria for Information Technology Security Evaluation, Version 3.1, Revision 4, 2012. Parts 1-3, http://www.commoncriteriaportal.org/cc/.

DsiN-Sicherheitsmonitor Mittelstand - IT-Sicherheitslage 2014 in Deutschland, Deutschland sicher im Netz e.V ,2014.

Falliere, N. / Murchu, L. O. / Chien, E. (2011). W32. stuxnet dossier. White paper, Symantec Corp., Security Response.

Gronau, N. / Theuer, H. / Lass, S. (2012). Evaluation of Production Processes using Hybrid Simulation. In: Proceeding of the 1st International Conference Robust Manufacturing Control (RoMaC 2012).

Günthner, W. A. / Chisu, R. / Kuzmany, F. (2010). Die Vision vom Internet der Dinge (pp. 43-46). Springer Berlin Heidelberg.

Helmus, F. P. (2003). Anlagenplanung: Von Der Anfrage Bis Zur Abnahme, Wiley-VCH Verlag, 19.

ISO copyright office (Hrsg.) (2005). ISO/IEC 27001:2005. Information technology – Security techniques – Information security management systems – Requirements.

Kagermann, H. / Wahlster, W. / Helbig, J. (2013). Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 – Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Forschungsunion im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft.

Kuipers, D. / Fabro, M. (2006). Control Systems Cyber Security: Defense in Depth Strategies. Idaho: Idaho National Laboratory.

Langmann, R. (2004). Taschenbuch der Automatisierung. Leipzig: Hanser Verlag.

Lass, S. / Fuhr, D. (2014). IT-Sicherheit in der Fabrik. In: Productivity Management 19 (3), 13-16.

Lass, S. / Gronau, N. (2012) Efficient Analysis of Production Processes with a Hybrid Simulation Environment. In: Proceeding of the 22nd International Conference of Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM 2012), Helsinki, Finnland.

Lass, S. / Hennig, G. (2012). Smarte Sensoren in der Produktion: Mit intelligenten Systemen einen hohen Automatisierungsgrad realisieren, In: Productivity Management 17 (2), 16-19.

Mitnick, K. D. / Simon, W. L. (2006). Die Kunst der Täuschung: Risikofaktor Mensch. Hüthig Jehle Rehm.

National Institute of Standards and Technology (2010). Special Publication 800-53, Recommended Security Controls for Federal Information Systems and Organizations, Revision 3, August 2009, mit Updates von 2010.

Scheer, A. W. (2013). Industrie 4.0: Wie sehen Produktionsprozesse im Jahr 2020 aus?. IMC AG.

Spath, D. et al. (2013). Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0. Fraunhofer Verlag.

Veigt, M. et al. (2013) Entwicklung eines Cyber-Physischen Logistiksystems. In: Industrie Management 29(1), 15-18.

Autoren

Univ.-Prof. Dr. mont. Hubert Biedermann
Dipl.-Ing. Markus Gram
Montanuniversität Leoben
Department Wirtschafts- und Betriebswissenschaften
Franz-Josef-Straße 18
A-8700 Leoben
hubert.biedermann@wbw.unileoben.ac.at

Prof. Dr.-Ing. habil. Wilhelm Dangelmaier
Universität Paderborn
Heinz Nixdorf Institut
Wirtschaftsinformatik, insbesondere CIM
Fürstenallee 11
33102 Paderborn
whd@hni.upb.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse
Dipl.-Wirt.-Ing. Olga Erohin
Dipl.-Wirt.-Ing. Daniel Lieber
Technische Universität Dortmund
Institut für Produktionssysteme (IPS)
Professur für Arbeits- und Produktionssysteme (APS)
Leonhard-Euler-Straße 5
44227 Dortmund
Jochen.deuse@ips.tu-dortmund.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Dombrowski
M. A. Maren Evers
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christoph Riechel
Technische Universität Braunschweig
Institut für Fabrikbetriebslehre und Unternehmensforschung
Langer Kamp 19
38106 Braunschweig
u.dombrowski@tu-bs.de

Prof. Dr.-Ing. Norbert Gronau
Dipl.-Inform. David Kotarski
Dipl.-Ing. Sander Lass
Dipl.-Ing. Hanna Theuer
Universität Potsdam
Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik und Electronic Government
August-Bebel-Straße 89
14482 Potsdam
norbert.gronau@wi.uni-potsdam.de

Prof. Dr. rer. pol. Dr. h. c. Wolfgang Kersten
M. Sc. Marius Indorf
Dr. rer. pol. Meike Schröder
Technische Universität Hamburg-Harburg
Institut für Logistik und Unternehmensführung
Schwarzenbergstraße 95c
21073 Hamburg
w.kersten@tuhh.de

A.o. Univ.-Prof. Dr. Peter Kuhlang
Dr.-Ing. Bernd Britzke
Markus Busenbach
Thomas Finsterbusch
Dr. Knut Kille
Thomas Mühlbradt
Deutsche MTM-Vereinigung e.V.
MTM-Institut
Eichenallee 11
15738 Zeuthen
peter.kuhlang@dmtm.com

Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding
Dr.-Ing. Axel Friedewald
Dipl.-Ing. Fedor Titov
Technische Universität Hamburg-Harburg
Institut für Produktionsmanagement und -technik
Denickestraße 17
21073 Hamburg
loedding@tuhh.de

Prof. Dr.-Ing. Dominik T. Matt
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Erwin Rauch, M. Sc.
Free University of Bozen - Bolzano
Fakultät für Naturwissenschaften und Technik
Piazza Universitá 5
I-39100 Bozen
dominik.matt@unibz.it

Prof. Dr.-Ing. Egon Müller
Dipl.-Ing. (FH) Hendrik Hopf
PD Dr.-Ing. habil. Ralph Riedel
Technische Universität Chemnitz
Institut für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme
Professur Fabrikplanung und Fabrikbetrieb
Erfenschlager Straße 73
09125 Chemnitz
egon.mueller@mb.tu-chemnitz.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis
M. Sc. Thorben Kuprat
M. Sc. Jonas Mayer
Leibniz Universität Hannover
Institut für Fabrikanlagen und Logistik
An der Universität 2
30823 Garbsen
nyhuis@ifa.uni-hannover.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Michael Schenk
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Institut für Logistik und Materialflusstechnik (ILM)
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg
michael.schenk@iff.fraunhofer.de.
M. A. Fabian Schenk
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und Automatisierung IFF, Magdeburg

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christopher M. Schlick
Dipl.-Ing. Jennifer Bützler
Dipl.-Inform. Marco Faber
Dipl.-Inform. Sinem Kuz
RWTH Aachen
Lehrstuhl und Institut für Arbeitswissenschaft (IAW)
Bergdriesch 27
52062 Aachen
c.schlick@iaw.rwth-aachen.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Wilfried Sihn
Dipl.-Ing. Robert Glawar
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Philipp Hold
Dipl.-Ing. Lukas Lingitz
Technische Universität Wien
Institut für Managementwissenschaften
Bereich Betriebstechnik und Systemplanung
Theresianumgasse 7
A-1040 Wien
wilfried.sihn@fraunhofer.at

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dieter Spath
Dipl.-Ing. Oliver Ganschar M. Sc.
M. Sc. Bastian Pokorni
Dr.-Ing. Sebastian Schlund
Fraunhofer Institut für Arbeitswissenschaften und Organisation IAO
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
Dieter.spath@iaa.fraunhofer.de

Prof. Dr. rer. pol. Uta Wilkens
M. Sc. Thomas Süße
Bernd-Friedrich Voigt
Ruhr-Universität Bochum
Institut für Arbeitswissenschaft
Lehrstuhl Arbeitsmanagement und Personal
Gebäude NB
44780 Bochum
uta.wilkens@ruhr-uni-bochum.de

Ausgewählte Literatur für die Bereiche

Fabrikmanagement
Fertigungsmanagement
IT
Materialmanagement
Produktentwicklung
Supply Chain Management

Fabrikmanagement

77100	Krallmann, Herrmann	Produktkonfiguration (Industrie Management 1/2003)	82 S.	978-3-936771-00-8
77102	Scholz-Reiter, Bernd	Manufacturing Execution Systems (Industrie Management 2/2003)	66 S.	978-3-936771-02-2
77110	Scholz-Reiter, Bernd	Mobile Industry (Industrie Management 6/2003)	66 S.	978-3-936771-10-7
77111	Scholz-Reiter, Bernd; Scharke, Heiko	Comprehensive Information Chain of Automated Disassembly of Obsolete Technical Appliances	256 S.	978-3-936771-11-4
77119	Krallmann, Herrmann; Scholz-Reiter, Bernd; Gronau, Norbert	Prozessgestaltung (Industrie Management 1/2004)	82 S.	978-3-936771-19-0
77128	Scholz-Reiter, Bernd	Neue Fertigungstechnologien (Industrie Management 6/2004)	66 S.	978-3-936771-28-2
77136	Scholz-Reiter, Bernd	Digital Engineering (Industrie Management 2/2005)	66 S.	978-3-936771-36-7
77139	Scholz-Reiter, Bernd	Dynamik in Produktion und Logistik (Industrie Management 5/2005)	82 S.	978-3-936771-39-8
77140	Scholz-Reiter, Bernd	Mikro- und Nanotechnologie (Industrie Management 6/2005)	82 S.	978-3-936771-40-4
77145	Freitag, Michael	Modellierung und Analyse von Produktionssystemen mit Methoden der Nichtlinearen Dynamik	140 S.	978-3-936771-45-9
77146	Blecker, Thorsten; Friedrich, Gerhard	Mass Customization: Concepts-Tools-Realization	509 S.	978-3-936771-46-6
77163	Scholz-Reiter, Bernd	Szenario Produktion 2020 (Industrie Management 1/2006)	66 S.	978-3-936771-63-3
77166	Gronau, Norbert	Automatisierung (Industrie Management 2/2006)	66 S.	978-3-936771-66-4
77167	Scholz-Reiter, Bernd (Hrsg.); Müller, Steffen	Ein KI-unterstütztes Durchlaufzeit-, Bestands- und Kapazitätsregelkreiskonzept für die Werkstattfertigung	170 S.	978-3-936771-67-1
77169	Gronau, Norbert	Kooperationsnetzwerke (Industrie Management 3/2006)	82 S.	978-3-936771-69-5
77177	Gronau, Norbert	Fabrikcontrolling (Industrie Management 4/2006)	66 S.	978-3-936771-77-0
77183	Scholz-Reiter, Bernd	Industrial Engineering (Industrie Management 5/2006)	66 S.	978-3-936771-83-1
77190	Scholz-Reiter, Bernd	Änderungsmanagement (Industrie Management 6/2006)	66 S.	978-3-936771-90-9
77193	Scholz-Reiter, Bernd	Globalisierung und Produktion (Industrie Management 1/2007)	82 S.	978-3-936771-93-0
1903	Blecker, Thorsten; Edwards, Kasper; Friedrich, Gerhard; Hvam, Lars; Salvador, Fabrizio (Hrsg.)	Innovative Processes and Products for Mass Customization	440 S.	978-3-940019-03-5
1905	Gronau, Norbert	Beschäftigungssicherung (Industrie Management 2/2007)	82 S.	978-3-940019-05-9
1910	Scholz-Reiter, Bernd	Entwicklung von Produktionssystemen (Industrie Management 3/2007)	82 S.	978-3-940019-10-3
1919	Scholz-Reiter, Bernd (Hrsg.); Höhns, Hartmut	Konzeption einer adaptiven Auftragskoordination im Rahmen des Supply Chain Managements	250 S.	978-3-940019-19-6
1920	Scholz-Reiter, Bernd	Logistik (Industrie Management 5/2007)	82 S.	978-3-940019-20-2

Ausgewählte Literatur für die Bereiche

Fabrikmanagement
Fertigungsmanagement
IT
Materialmanagement
Produktentwicklung
Supply Chain Management

1925	Gronau, Norbert	Komplexitätsmanagement (Industrie Management 6/2007)	66 S.	978-3-940019-25-7
1930	Gronau, Norbert	Wettbewerbsfähigkeit (Industrie Management 2/2008)	82 S.	978-3-940019-30-1
1931	Gronau, Norbert	China (Industrie Management 1/2008)	66 S.	978-3-940019-31-8
1933	Scholz-Reiter, Bernd (Hrsg.); Hamann, Tilo	Lernfähige intelligente Produktionsregelung	246 S.	978-3-940019-33-2
1936	Kuster, Jürgen	Providing Decision Support in the Operative Management of Process Disruptions	118 S.	978-3-940019-36-3
1941	Scholz-Reiter, Bernd	PLM (Industrie Management 3/2008)	66 S.	978-3-940019-41-7
1944	Gronau, Norbert (Hrsg.)	Wettbewerbsfähigkeit durch Arbeits- und Betriebsorganisation	302 S.	978-3-940019-44-8
1946	Scholz-Reiter, Bernd	Kognitive Automatisierung (Industrie Management 4/2008)	66 S.	978-3-940019-46-2
1949	Scholz-Reiter, Bernd (Hrsg.)	Technologiegetriebene Veränderungen der Arbeitswelt	328 S.	978-3-940019-49-3
1952	Scholz-Reiter, Bernd	Industrielle Dienstleistung (Industrie Management 5/2008)	82 S.	978-3-940019-52-3
1953	de Beer, Christoph	Untersuchung der Dynamik von selbststeuernden Prozessen in produktionslogistischen Systemen anhand ereignisdiskreter Simulationsmodelle	140 S.	978-3-940019-53-0
1968	Scholz-Reiter, Bernd	Technologiegetriebene Veränderungen der Arbeitswelt (Industrie Management 2/2009)	82 S.	978-3-940019-68-4
1974	Scholz-Reiter, Bernd	Selbstorganisation (Industrie Management 3/2009)	66 S.	978-3-940019-74-5
1979	Gronau, Norbert	Strategisches Management (Industrie Management 4/2009)	66 S.	978-3-940019-79-0
1980	Schenk, Michael	Digital Engineering - Herausforderung für die Arbeits- und Betriebsorganisation	400 S.	978-3-940019-80-6
1986	Bastian-Köpp, Dörte	Cooperative design of manufacturing systems in SME's - Development of an integration approach and a groupware-based cooperation concept -	210 S.	978-3-940019-86-8
1994	Gronau, Norbert	Prozessorientiertes Wissensmanagement (Industrie Management 1/2010)	66 S.	978-3-940019-94-3
8305	Scholz-Reiter, Bernd	Digital Engineering (Industrie Management 2/2010)	82 S.	978-3-942183-05-5
8310	Gronau, Norbert; Lindemann, Marcus	Einführung in das Produktionsmanagement (2., überarbeitete Auflage)	272 S.	978-3-942183-10-9
8312	Scholz-Reiter, Bernd	Kopplung MES - ERP (Productivity Management 2/2010)	66 S.	978-3-942183-12-3
8313	Gronau, Norbert	Qualitätsmanagement (Industrie Management 4/2010)	82 S.	978-3-942183-13-0
8321	Scholz-Reiter, Bernd	Mikro- und Nanotechnologien (Industrie Management 6/2010)	66 S.	978-3-942183-21-5
8326	Scholz-Reiter, Bernd	Autonome Systeme (Industrie Management 1/2011)	66 S.	978-3-942183-26-0
8329	Gronau, Norbert	Simulation in Produktion und Logistik (Productivity Management 1/2011)	66 S.	978-3-942183-29-1
8330	Scholz-Reiter, Bernd	Brasilien (Industrie Management 2/2011)	82 S.	978-3-942183-30-7
8331	Scholz-Reiter, Bernd	Industrial Automation (Productivity Management 2/2011)	46 S.	978-3-942183-31-4
8335	Gronau, Norbert	Wandlungsfähige Produktionssysteme (Industrie Management 3/2011)	82 S.	978-3-942183-35-2

Ausgewählte Literatur für die Bereiche

Fabrikmanagement
Fertigungsmanagement
IT

Materialmanagement
Produktentwicklung
Supply Chain Management

8341	Gronau, Norbert	Produktivität steigern (Productivity Management 3/2011)	66 S.	978-3-942183-41-3
8344	Siepermann/Eley (Hrsg.)	Logistik – Gestern, heute, morgen - Festschrift für Richard Vahrenkamp zur Vollendung des 65. Lebensjahres	348 S.	978-3-942183-44-4
8348	Scholz-Reiter, Bernd	Intralogistik (Productivity Management 4/2011)	66 S.	978-3-942183-48-2
8356	Scholz-Reiter, Bernd	Selbstoptimierende Produktion (Productivity Management 5/2011)	66 S.	978-3-942183-56-7
8359	Scholz-Reiter, Bernd	Produktionsnahe Informationssysteme (Industrie Management 1/2012)	66 S.	978-3-942183-59-8
8362	Gronau, Norbert	Kundenindividuelle Produktion (Productivity Management 1/2012)	66 S.	978-3-942183-62-8
8365	Gronau, Norbert	Produktkonfiguration - 53 Anbieter im Vergleich (Productivity Marktüberblick 1/2012)	60 S.	978-3-942183-65-9
8367	Scholz-Reiter, Bernd	Russland (Industrie Management 2/2012)	66 S.	978-3-942183-67-3
8369	Gronau, Norbert	Industrial Automation (Productivity Management 2/2012)	46 S.	978-3-942183-69-7
8370	Gronau, Norbert	Wissensarbeit (Industrie Management 3/2012)	82 S.	978-3-942183-70-3
8372	Gronau, Norbert	Dezentralisierung (Productivity Management 3/2012)	66 S.	978-3-942183-72-7
8374	Müller, Egon (Hrsg.)	Demographischer Wandel – Herausforderung für die Arbeits- und Betriebsorganisation der Zukunft	461 S.	978-3-942183-74-1
8377	Scholz-Reiter, Bernd (Hrsg.); Liu, Huaxin	A Dynamic Bottleneck-oriented Manufacturing Control System	187 S.	978-3-942183-77-2
8380	Scholz-Reiter, Bernd	Neuausrichtung der Automobilindustrie (Industrie Management 5/2012)	66 S.	978-3-942183-80-2
8385	Gronau, Norbert	Energieeffiziente MES - 39 Anbieter im Vergleich (Productivity Marktüberblick 2/2012)	60 S.	978-3-942183-85-7
8384	Scholz-Reiter, Bernd	Energieeffiziente Produktion (Productivity Management 4/2012)	66 S.	978-3-942183-84-0
8392	Gronau, Norbert	Diskrete Fertigung (Productivity Management 5/2012)	66 S.	978-3-942183-92-5
8398	Scholz-Reiter, Bernd	Vierte industrielle Revolution (Industrie Management 1/2013)	66 S.	978-3-942183-98-7
5000	Scholz-Reiter, Bernd	Industrie 4.0 (Productivity Management 1/2013)	66 S.	978-3-95545-000-7
5006	Gronau, Norbert	Kundenzufriedenheit (Productivity Management 2/2013)	46 S.	978-3-95545-006-9
5008	Gronau, Norbert	Qualitätsmanagement Systeme (Productivity Marktüberblick 1/2013)	40 S.	978-3-95545-008-3
5017	Scholz-Reiter, Bernd	Desktop Manufacturing (Industrie Management 2/2013)	66 S.	978-3-95545-017-5
5019	Scholz-Reiter, Bernd	Standardisierung (Productivity Management 3/2013)	66 S.	978-3-95545-019-9
5025	Scholz-Reiter, Bernd; Krohne, Farian	Entwicklung einer Bewertungsmethode für das Anlaufmanagement (Informationstechnische Systeme und Organisation von Produktion und Logistik, Band 15)	162 S.	978-3-95545-025-0
5031	Gronau, Norbert	Nachhaltige Produktion (Productivity Management 4/2013)	66 S.	978-3-95545-031-1
5042	Lee, Seung-Ho	Ansatz zur Erhöhung der Produktivität durch Wissen: Unter Berücksichtigung von kulturellen Aspekten, Produkt- und Prozess-Komplexität	247 S.	978-3-95545-042-7
5045	Scholz-Reiter, Bernd (Hrsg.);	Simulationsbasierte Analyse der Dynamik	175 S.	978-3-95545-045-8

Ausgewählte Literatur für die Bereiche

Fabrikmanagement
Fertigungsmanagement
IT
Materialmanagement
Produktentwicklung
Supply Chain Management

Uwe Hinrichs

5048	Scholz-Reiter, Bernd	Logistikprozesse (Productivity Management 5/2013)	66 S.	978-3-95545-048-9

Fertigungsmanagement (PPS)

77103	Scholz-Reiter, Bernd	Mehrwerkesteuerung (PPS Management 2/2003)	82 S.	978-3-936771-03-9
77106	Gronau, Norbert	PPS-/ERP-Integration (PPS Management 3/2003)	66 S.	978-3-936771-06-0
77109	Scholz-Reiter, Bernd	Prozessorientierte Fertigung (PPS Management 4/2003)	82 S.	978-3-936771-09-1
77122	Scholz-Reiter, Bernd	Advanced Planning and Scheduling (PPS Management 2/2004)	66 S.	978-3-936771-22-0
77134	Gronau, Norbert	Bestandsmanagement (PPS Management 1/2005)	66 S.	978-3-936771-34-3
77141	Scholz-Reiter, Bernd	Planung und Steuerung (PPS Management 2/2005)	66 S.	978-3-936771-41-1
77142	Gronau, Norbert	Manufacturing Execution Systeme (PPS Management 3/2005)	66 S.	978-3-936771-42-8
77143	Scholz-Reiter, Bernd	PPS und Controlling (PPS Management 4/2005)	66 S.	978-3-936771-43-5
77165	Gronau, Norbert	RFID in Produktion und Logistik (PPS Management 1/2006)	66 S.	978-3-936771-65-7
77171	Gronau, Norbert	Mobile Technologien (PPS Management 2/2006)	66 S.	978-3-936771-71-8
77173	Blecker, Thorsten; Friedrich, Gerhard; Hvam, Lars; Edwards, Kasper (Hrsg.)	Customer Interaction and Customer Integration	488 S.	978-3-936771-73-2
77185	Gronau, Norbert	Advanced Planning and Scheduling (PPS Management 3/2006)	66 S.	978-3-936771-85-5
77189	Scholz-Reiter, Bernd	Störungsmanagement (PPS Management 4/2006)	66 S.	978-3-936771-89-3
1901	Gronau, Norbert	Termintreue (PPS Management 1/2007)	66 S.	978-3-940019-01-1
1909	Scholz-Reiter, Bernd	Simulation in Produktion und Logistik (PPS Management 2/2007)	82 S.	978-3-940019-09-7
1922	Gronau, Norbert	Serienfertigung (PPS Management 3/2007)	66 S.	978-3-940019-22-6
1924	Scholz-Reiter, Bernd	Standardisierung produktionsnaher IT (PPS Management 4/2007)	66 S.	978-3-940019-24-0
1935	Gronau, Norbert	Qualität in der Produktion (PPS Management 1/2008)	66 S.	978-3-940019-35-6
1940	Scholz-Reiter, Bernd	Prozessfertigung (PPS Management 2/2008)	66 S.	978-3-940019-40-0
1950	Scholz-Reiter, Bernd	Innerbetriebliche Logistik (PPS Management 3/2008)	66 S.	978-3-940019-50-9
1959	Scholz-Reiter, Bernd	Lieferantenmanagement (PPS Management 4/2008)	66 S.	978-3-940019-59-2
1965	Gronau, Norbert	Mobile Technologien in der Produktion (PPS Management 1/2009)	66 S.	978-3-940019-65-3
1970	Kolditz, Jan	Vorgehensmodell zur Erstellung von Fachkonzepten für selbststeuernde produktionslogistische Prozesse	178 S.	978-3-940019-70-7
1972	Scholz-Reiter, Bernd	Schlanke Produktionssysteme (PPS Management 2/2009)	66 S.	978-3-940019-72-1

Ausgewählte Literatur für die Bereiche

Fabrikmanagement
Fertigungsmanagement
IT
Materialmanagement
Produktentwicklung
Supply Chain Management

1983	Gronau, Norbert	Logistisches Prozessmanagement (Productivity Management 3/2009)	66 S.	978-3-940019-83-7
1988	Scholz-Reiter, Bernd	Effiziente Kleinserienfertigung (Productivity Management 4/2009)	66 S.	978-3-940019-88-2
1997	Gronau, Norbert	Factory Automation (Productivity Management 1/2010)	66 S.	978-3-940019-97-4
8305	Scholz-Reiter, Bernd	Digital Engineering (Industrie Management 2/2010)	82 S.	978-3-942183-05-5
8306	Gronau, Norbert	Digital Factory (Productivity Management 1a/2010)	46 S.	978-3-942183-06-2
8309	Gronau, Norbert	Open Source (Industrie Management 3/2010)	66 S.	978-3-942183-09-3
8312	Scholz-Reiter, Bernd	Kopplung MES - ERP (Productivity Management 2/2010)	66 S.	978-3-942183-12-3
8313	Gronau, Norbert	Qualitätsmanagement (Industrie Management 4/2010)	82 S.	978-3-942183-13-0
8315	Nyhuis, Peter (Hrsg.)	Wandlungsfähige Produktionssysteme	468 S.	978-3-942183-15-4
8317	Scholz-Reiter, Bernd	Globale Logistik (Industrie Management 5/2010)	66 S.	978-3-942183-17-8
8318	Gronau, Norbert	Störungsmanagement (Productivity Management 3/2010)	66 S.	978-3-942183-18-5
8324	Scholz-Reiter, Bernd	Prozessmanagement (Productivity Management 4/2010)	66 S.	978-3-942183-24-6
8326	Scholz-Reiter, Bernd	Autonome Systeme (Industrie Management 1/2011)	66 S.	978-3-942183-26-0
8329	Gronau, Norbert	Simulation in Produktion und Logistik (Productivity Management 1/2011)	66 S.	978-3-942183-29-1
8331	Scholz-Reiter, Bernd	Industrial Automation (Productivity Management 2/2011)	46 S.	978-3-942183-31-4
8335	Gronau, Norbert	Wandlungsfähige Produktionssysteme (Industrie Management 3/2011)	82 S.	978-3-942183-35-2
8341	Gronau, Norbert	Produktivität steigern (Productivity Management 3/2011)	66 S.	978-3-942183-41-3
8344	Siepermann/Eley (Hrsg.)	Logistik – Gestern, heute, morgen - Festschrift für Richard Vahrenkamp zur Vollendung des 65. Lebensjahres	348 S.	978-3-942183-44-4
8348	Scholz-Reiter, Bernd	Intralogistik (Productivity Management 4/2011)	66 S.	978-3-942183-48-2
8350	Gronau, Norbert	Produktentstehung (Industrie Management 5/2011)	82 S.	978-3-942183-50-5
8356	Scholz-Reiter, Bernd	Selbstoptimierende Produktion (Productivity Management 5/2011)	66 S.	978-3-942183-56-7
8357	Scholz-Reiter, Bernd	Grüne Technologien (Industrie Management 6/2011)	82 S.	978-3-942183-57-4
8359	Scholz-Reiter, Bernd	Produktionsnahe Informationssysteme (Industrie Management 1/2012)	66 S.	978-3-942183-59-8
8361	Borg, Erik; Daedelow, Holger; Johnson, Ryan (Hrsg.)	RapidEye Science Archive (RESA) - Vom Algorithmus zum Produkt	232 S.	978-3-942183-61-1
8362	Gronau, Norbert	Kundenindividuelle Produktion (Productivity Management 1/2012)	66 S.	978-3-942183-62-8
8365	Gronau, Norbert	Produktkonfiguration - 53 Anbieter im Vergleich (Productivity Marktüberblick 1/2012)	60 S.	978-3-942183-65-9
8367	Scholz-Reiter, Bernd	Russland (Industrie Management 2/2012)	66 S.	978-3-942183-67-3
8369	Gronau, Norbert	Industrial Automation (Productivity Management 2/2012)	45 S.	978-3-942183-69-7

Ausgewählte Literatur für die Bereiche

Fabrikmanagement
Fertigungsmanagement
IT

Materialmanagement
Produktentwicklung
Supply Chain Management

8370	Gronau, Norbert	Wissensarbeit (Industrie Management 3/2012)	82 S.	978-3-942183-70-3
8372	Gronau, Norbert	Dezentralisierung (Productivity Management 3/2012)	66 S.	978-3-942183-72-7
8376	Gronau, Norbert	Technische Dokumentation (Industrie Management 4/2012)	68 S.	978-3-942183-76-5
8377	Scholz-Reiter, Bernd (Hrsg.); Liu, Huaxin	A Dynamic Bottleneck-oriented Manufacturing Control System	187 S.	978-3-942183-77-2
8379	Scholz-Reiter, Bernd (Hrsg.); Böse, Felix	Selbststeuerung in der Fahrzeuglogistik	222 S.	978-3-942183-79-6
8380	Scholz-Reiter, Bernd	Neuausrichtung der Automobilindustrie (Industrie Management 5/2012)	66 S.	978-3-942183-80-2
8384	Scholz-Reiter, Bernd	Energieeffiziente Produktion (Productivity Management 4/2012)	66 S.	978-3-942183-84-0
8385	Gronau, Norbert	Energieeffiziente MES - 39 Anbieter im Vergleich (Productivity Marktüberblick 2/2012)	60 S.	978-3-942183-85-7
8392	Gronau, Norbert	Diskrete Fertigung (Productivity Management 5/2012)	66 S.	978-3-942183-92-5
8393	Gronau, Norbert	Hidden Champions (Industrie Management 6/2012)	66 S.	978-3-942183-93-2
8398	Scholz-Reiter, Bernd	Vierte industrielle Revolution (Industrie Management 1/2013)	66 S.	978-3-942183-98-7
5000	Scholz-Reiter, Bernd	Industrie 4.0 (Productivity Management 1/2013)	66 S.	978-3-95545-000-7
5003	Schmalzried, Dirk	In-Memory-basierte Real-Time Supply Chain Planung	250 S.	978-3-95545-003-8
5006	Gronau, Norbert	Kundenzufriedenheit (Productivity Management 2/2013)	46 S.	978-3-95545-006-9
5008	Gronau, Norbert	Qualitätsmanagement Systeme (Productivity Marktüberblick 1/2013)	40 S.	978-3-95545-008-3
5017	Scholz-Reiter, Bernd	Desktop Manufacturing (Industrie Management 2/2013)	66 S.	978-3-95545-017-5
5019	Scholz-Reiter, Bernd	Standardisierung (Productivity Management 3/2013)	66 S.	978-3-95545-019-9
5025	Scholz-Reiter, Bernd; Krohne, Farian	Entwicklung einer Bewertungsmethode für das Anlaufmanagement (Informationstechnische Systeme und Organisation von Produktion und Logistik, Band 15)	162 S.	978-3-95545-025-0
5029	Gronau, Norbert	Cloud Computing (Industrie Management 4/2013)	66 S.	978-3-95545-029-8
5031	Gronau, Norbert	Nachhaltige Produktion (Productivity Management 4/2013)	66 S.	978-3-95545-031-1
5038	Gronau, Norbert	Eco-Innovation (Industrie Management 5/2013)	66 S.	978-3-95545-038-0
5042	Lee, Seung-Ho	Ansatz zur Erhöhung der Produktivität durch Wissen: Unter Berücksichtigung von kulturellen Aspekten, Produkt- und Prozess-Komplexität	247 S.	978-3-95545-042-7
5045	Scholz-Reiter, Bernd (Hrsg.); Uwe Hinrichs	Simulationsbasierte Analyse der Dynamik	175 S.	978-3-95545-045-8
5048	Scholz-Reiter, Bernd	Logistikprozesse (Productivity Management 5/2013)	66 S.	978-3-95545-048-9
5052	Scholz-Reiter, Bernd	Bio-Manufacturing (Industrie Management 6/2013)	66 S.	978-3-95545-052-6

Ausgewählte Literatur für die Bereiche

Fabrikmanagement
Fertigungsmanagement
IT
Materialmanagement
Produktentwicklung
Supply Chain Management

IT

77101	Gronau, Norbert	ERP-Technologien (PPS Management 1/2003)	82 S.	978-3-936771-01-5
77110	Scholz-Reiter, Bernd	Mobile Industry (Industrie Management 6/2003)	66 S.	978-3-936771-10-7
77115	Gronau, Norbert; Benger, Alf	JXTA Workshop: Potenziale, Konzepte, Anwendungen	122 S.	978-3-936771-15-2
77116	Bichler, Martin; Holtmann, Carsten	Coordination and Agent Technology in Value Networks	112 S.	978-3-936771-16-9
77121	Gronau, Norbert	Wandlungsfähigkeit (Industrie Management 2/2004)	82 S.	978-3-936771-21-3
77135	Gronau, Norbert	Unternehmensarchitekturen (ERP Management 1/2005)	66 S.	978-3-936771-35-0
77138	Gronau, Norbert	Interoperabilität (Industrie Management 4/2005)	66 S.	978-3-936771-38-1
77149	Lenz, Richard; Hasenkamp, Ulrich; Hasselbring, Wilhelm; Reichert, Manfred	EAI-Workshop 2005	105 S.	978-3-936771-49-7
77151	Gronau, Norbert	Geschäftsprozessmanagement (ERP Management 3/2005)	66 S.	978-3-936771-51-0
77152	Gronau, Norbert	Enterprise Content Management (ERP Management 4/2005)	66 S.	978-3-936771-52-7
77156	Hasselbring, Wilhelm; Giesecke, Simon	Dependability Engineering	196 S.	978-3-936771-56-5
77157	Hasselbring, Wilhelm; Giesecke, Simon	Research Methods in Software Engineering	136 S.	978-3-936771-57-2
77160	Gronau, Norbert	Wandlungsfähige Informationssystemarchitekturen - Nachhaltigkeit bei organisatorischem Wandel (2. Auflage)	324 S.	978-3-936771-60-2
77163	Scholz-Reiter, Bernd	Szenario Produktion 2020 (Industrie Management 1/2006)	66 S.	978-3-936771-63-3
77166	Gronau, Norbert	Automatisierung (Industrie Management 2/2006)	66 S.	978-3-936771-66-4
77169	Gronau, Norbert	Kooperationsnetzwerke (Industrie Management 3/2006)	82 S.	978-3-936771-69-5
77170	Gronau, Norbert	Support von ERP-Systemen (ERP Management 2/2006)	66 S.	978-3-936771-70-1
77172	Blecker, Thorsten; Friedrich, Gerhard (Hrsg.) ; Jannach, Dietmar	Building intelligent electronic Services	150 S.	978-3-936771-72-5
77174	Aier, Stephan; S chönherr, Marten (Hrsg.)	Enterprise Application Integration - Serviceorientierung und nachhaltige Architekturen (2. Auflage)	428 S.	978-3-936771-74-9
77175	Aier, Stephan; Schönherr, Marten (Hrsg.)	Unternehmensarchitekturen und Systemintegration (2. Auflage)	342 S.	978-3-936771-75-6
77176	Aier, Stephan; Schönherr, Marten	Enterprise Application Integration - Flexibilisierung komplexer Unternehmensarchitekturen (2. Auflage)	274 S.	978-3-936771-76-3
77178	Gronau, Norbert (Hrsg.); Andresen, Katja	Design and Use Patterns of Adaptability in Enterprise Systems	147 S.	978-3-936771-78-7
77180	Gronau, Norbert; Hasselbring, Wilhelm (Hrsg.)	M-WISE: Modellierung wissensintensiver Prozesse im Software Engineering	540 S.	978-3-936771-80-0
77181	Strüver, Sven-Carsten	Standardbasiertes EAI-Vorgehen am Beispiel des Investment Bankings	404 S.	978-3-936771-81-7

Ausgewählte Literatur für die Bereiche

Fabrikmanagement
Fertigungsmanagement
IT

Materialmanagement
Produktentwicklung
Supply Chain Management

77182	Ahrens, Maximilian; Schönherr, Marten (Hrsg.)	Service Oriented Modeling - 1st International Workshop on Service Oriented Modeling	109 S.	978-3-936771-82-4
77184	Gronau, Norbert	Business Intelligence (ERP Management 3/2006)	66 S.	978-3-936771-84-8
77187	Happe, Jens; Koziolek, Heiko; Rohr, Matthias; Storm, Christian; Warns, Timo (Hrsg.)	Proceedings of the International Research Training Groups Workshop 2006	75 S.	978-3-936771-87-9
77188	Eggert, Sandy	Enterprise Content Management	258 S.	978-3-936771-88-6
77191	Gronau, Norbert; Eggert, Sandy (Hrsg.)	Auswahl, Einführung und Integration von ERP-Systemen	412 S.	978-3-936771-91-6
77192	Kratzke, Nane	Modellbasierte Analyse interorganisationaler Wissensflüsse	222 S.	978-3-936771-92-3
77194	Aier, Stephan	Integrationstechnologien als Basis einer nachhaltigen Unternehmensarchitektur - Abhängigkeiten zwischen Organisation und Informationstechnologie	394 S.	978-3-936771-94-7
77196	Benger, Alf	Gestaltung von Wertschöpfungsnetzwerken	180 S.	978-3-936771-96-1
77198	Gronau, Norbert (Hrsg.)	4. Konferenz Professionelles Wissensmanagement - Erfahrungen und Visionen, Band 1 / D	446 S.	978-3-936771-98-5
77199	Gronau, Norbert (Ed.)	4th Conference on Professional Knowledge Management - Experiences and Visions, Band 2 / E	392 S.	978-3-936771-99-2
1902	Gronau, Norbert	Personalmanagement (ERP Management 1/2007)	66 S.	978-3-940019-02-8
1904	Gronau, Norbert; Lämmer, Anne; Andresen, Katja (Hrsg.)	Wandlungsfähige ERP-Systeme - Entwicklung, Auswahl und Methode (2. Auflage)	182 S.	978-3-940019-04-2
1906	Steffens, Ulrike; Addicks, Jan Stefan; Streekmann, Niels (Hrsg.)	MDD, SOA und IT-Management (MSI 2007) Workshop, Oldenburg, April 2007	82 S.	978-3-940019-06-6
1907	Schmid, Simone; Rüsike,Tilman	Qualifizierung und Support von ERP-Systemen - Ergebnisse einer empirischen Untersuchung	76 S.	978-3-940019-07-3
1908	Michael A. Herzog (Hrsg.)	Content Engineering - Konzepte, Technologien und Anwendungen in der Medienproduktion	180 S.	978-3-940019-08-0
1911	Freund, Tessen	Software Engineering durch Modellierung wissensintensiver Entwicklungsprozesse	316 S.	978-3-940019-11-0
1912	Gronau, Norbert	ERP-Systeme für die öffentliche Verwaltung (ERP Management 2/2007)	66 S.	978-3-940019-12-7
1913	Gronau, Norbert; S tein, Moreen (Hrsg.)	ERP-Systeme in der öffentlichen Verwaltung	266 S.	978-3-940019-13-4
1916	Gronau, Norbert	Industrielles Informationsmanagement (Industrie Management 4/2007)	66 S.	978-3-940019-16-5
1918	Dietrich, Jens	Nutzung von Modellierungssprachen und -methodologien standardisierter B2B-Architekturen für die Integration unternehmensinterner Geschäftsprozesse	294 S.	978-3-940019-18-9
1924	Scholz-Reiter, Bernd	Standardisierung produktionsnaher IT (PPS Management 4/2007)	66 S.	978-3-940019-24-0
1926	Müller-Birn, Claudia; Gronau, Norbert (Hrsg.)	Analyse sozialer Netzwerke und Social Software - Grundlagen und Anwendungsbeispiele	326 S.	978-3-940019-26-4
1927	Gronau, N.	ERP-Systeme im Dienstleistungssektor (ERP Management 4/2007)	66 S.	978-3-940019-27-1
1928	Gronau, Norbert	Serviceorientierte Architekturen (ERP Management 1/2008)	66 S.	978-3-940019-28-8

Ausgewählte Literatur für die Bereiche

Fabrikmanagement
Fertigungsmanagement
IT

Materialmanagement
Produktentwicklung
Supply Chain Management

1929	Appelrath, H.-Jürgen; Felden, Carsten; Uslar, Mathias (Hrsg.)	IT in der Energiewirtschaft: Track Proceedings der MKWI 2008	54 S.	978-3-940019-29-5
1934	Bichler, Martin; Hess, Thomas; Krcmar, Helmut; Lechner, Ulrike; Matthes, Florian; Picot, Arnold; Speitkamp, Benjamin; Wolf, Petra (Hrsg.)	Multikonferenz Wirtschaftsinformatik 2008	444 S.	978-3-940019-34-9
1938	Großmann, Uwe; Kawalek, Jürgen; Sieck, Jürgen (Hrsg.)	Information, Kommunikation und Arbeitsprozessoptimierung mit Mobilen Systemen - Zahlen, Ergebnisse und Perspektiven zum IKAROS-Projekt	222 S.	978-3-940019-38-7
1939	Diehl, Malte; Lipskoch, Henrik; Meyer, Roland; Storm, Christian (Hrsg.)	Proceedings des gemeinsamen Workshops der Graduiertenkollegs 2008	106 S.	978-3-940019-39-4
1946	Scholz-Reiter, Bernd	Kognitive Automatisierung (Industrie Management 4/2008)	66 S.	978-3-940019-46-2
1948	Steffens, Ulrike; Addicks, Jan Stefan; Streekmann, Niels (Hrsg.)	MDD, SOA und IT-Management (MSI 2008) - Workshop, Oldenburg, Sept. 2008	108 S.	978-3-940019-48-6
1951	Gronau, Norbert	ERP-Modernisierung (ERP Management 3/2008)	66 S.	978-3-940019-51-6
1952	Scholz-Reiter, Bernd	Industrielle Dienstleistung (Industrie Management 5/2008)	82 S.	978-3-940019-52-3
1954	Giesecke, Simon	Architectural Styles for Early Goal - driven Middleware Platform Selection	278 S.	978-3-940019-54-7
1957	Gronau, Norbert	Produktpiraterie (Industrie Management 6/2008)	66 S.	978-3-940019-57-8
1960	Gronau, Norbert; Gäbler, Andreas	Einführung in die Wirtschaftsinformatik, Band 1 (2. durchgesehene Auflage 2010)	318 S.	978-3-940019-60-8
1962	Rohloff, Michael	Integrierte Gestaltung von Unternehmensorganisation und IT	377 S.	978-3-940019-62-2
1963	Gronau, Norbert; Gäbler, Andreas	Einführung in die Wirtschaftsinformatik, Band 2 (2. durchgesehene Auflage 2010)	286 S.	978-3-940019-63-9
1966	Gronau, Norbert	Internationalisierung im Mittelstand (ERP Management 1/2009)	66 S.	978-3-940019-66-0
1967	Felden, Carsten	Energiewirtschaftliche Fragestellungen aus betrieblicher und ingenieurwissenschaftlicher Sicht	120 S.	978-3-940019-67-7
1969	Bill, Ralf; Flach, Guntram; Klammer, Ulf; Niemeyer, Cindy (Hrsg.)	GeoForum MV 2009 – Geoinformation für jedermann	150 S.	978-3-940019-69-1
1970	Kolditz, Jan	Vorgehensmodell zur Erstellung von Fachkonzepten für selbststeuernde produktionslogistische Prozesse	178 S.	978-3-940019-70-7
1973	Avanes, Artin; Fahland, Dirk; Geibig, Joanna; Haschemi, Siamak; Heglmeier, Sebastian; Sadile, Daniel A.; Theisselmann, Falko; Wachsmuth, Guido; Weißleder, Stephan (Hrsg.)	Dagstuhl 2009 - Proceedings des gemeinsamen Workshops der Informatik-Graduiertenkollegs und Forschungskollegs	226 S.	978-3-940019-73-8

Ausgewählte Literatur für die Bereiche

Fabrikmanagement
Fertigungsmanagement
IT
Materialmanagement
Produktentwicklung
Supply Chain Management

1975	Gronau, Norbert	Prozessmanagement (ERP Management 2/2009)	66 S.	978-3-940019-75-2
1976	Hasselbring, Wilhelm	WISENT: Wissensnetz Energiemeteorologie	416 S.	978-3-940019-76-9
1978	Offermann, Philipp	Eine Methode zur Konzeption betrieblicher Software mit einer Serviceorientierten Architektur	236 S.	978-3-940019-78-3
1981	Ulrike Steffens, Jan Stefan Addicks, Matthias Postina, Niels Streekmann (Eds.)	MDD, SOA und IT-Management (MSI 2009) - Workshop, Oldenburg, October 2009	99 S.	978-3-940019-81-3
1983	Gronau, Norbert	Logistisches Prozessmanagement (Productivity Management 3/2009)	66 S.	978-3-940019-83-7
1984	Gronau, Norbert	ERP-Integration (ERP Management 3/2009)	66 S.	978-3-940019-84-4
1987	Gronau, Norbert; Eggert, Sandy (Hrsg.)	Architekturen, Geschäftsmodelle und Marketingstrategien für ERP-Anbieter	258 S.	978-3-940019-87-5
1992	Broy, M., Gronau, N., Wildemann, H.	Gestaltung interorganisationaler Software-Entwicklung - Herausforderungen durch Wandlungsfähigkeit und Wiederverwendung	352 S.	978-3-940019-92-9
1994	Gronau, Norbert	Prozessorientiertes Wissensmanagement (Industrie Management 1/2010)	66 S.	978-3-940019-94-3
1995	Gronau (Hrsg.)/Stein/Röchert-Voigt/u.a.	E-Government-Anwendungen	264 S.	978-3-940019-95-0
1996	Gronau, Norbert	ERP-Architekturen (ERP Management 1/2010)	66 S.	978-3-940019-96-7
1997	Gronau, Norbert	Factory Automation (Productivity Management 1/2010)	66 S.	978-3-940019-97-4
1998	Schröpfer, Christian	Das SOA-Management-Framework - Ein ganzheitliches, integriertes Konzept für die Governance Serviceorientierter Architekturen	360 S.	978-3-940019-98-1
1999	Sommer, Björn	Informationsmodell für das rechnerunterstützte Monitoring von Engineering-Projekten in der Produktentwicklung	202 S.	978-3-940019-99-8
8301	Bill, R., Flach, G., Klammer, U., Niemeyer, C. (Hrsg.)	GeoForum MV 2010 – Vernetzte Geodaten: vom Sensor zum Web	148 S.	978-3-942183-01-7
8303	Eggert, Sandy	Wandlungsfähigkeit von Enterprise Content Management - Gestaltung wandlungsfähiger ECM-Prozesse unter Verwendung kartographischer Methoden	292 S.	978-3-942183-03-1
8304	Sultanow, Eldar	Zusammenarbeit in verteilten Projekten - Dekomposition, Barrieren und Lösungen im Kontext der Webentwicklung	134 S.	978-3-942183-04-8
8307	Gronau, N.; L indemann, M.	Einführung in das Informationsmanagement (2., überarbeitete Auflage)	236 S.	978-3-942183-07-9
8309	Gronau, Norbert	Open Source (Industrie Management 3/2010)	66 S.	978-3-942183-09-3
8311	Gronau, Norbert	Business Intelligence mit ERP-Systemen (ERP Management 2/2010)	66 S.	978-3-942183-11-6
8312	Scholz-Reiter, Bernd	Kopplung MES - ERP (Productivity Management 2/2010)	66 S.	978-3-942183-12-3
8314	Fohrholz, Corinna	Business Software für Apple-Plattformen (iSuccess 1/2010)	66 S.	978-3-942183-14-7
8316	Amt24 e.V.; Tanja Röchert-Voigt; Denise Berg	Web 2.0 in der öffentlichen Verwaltung	92 S.	978-3-942183-16-1
8319	Gronau, Norbert	ERP-Auswahl und -Einführung (ERP Management 3/2010)	66 S.	978-3-942183-19-2

Ausgewählte Literatur für die Bereiche

Fabrikmanagement
Fertigungsmanagement
IT
Materialmanagement
Produktentwicklung
Supply Chain Management

8320	Hasselbring, Wilhelm (Hrsg.)	Betriebliche Informationssysteme: Grid-basierte Integration und Orchestrierung	498 S.	978-3-942183-20-8
8322	Flach, G.; Schultz, J. (Hrsg.)	5. Rostocker eGovernment-Forum 2010 - Wissensbasiertes eGovernment: Erschließung und Nutzung von Verwaltungswissen	78 S.	978-3-942183-22-2
8323	Gronau, N.; Eggert, S.; Fohrholz, C. (Hrsg.)	Software as a Service, Cloud Computing und Mobile Technologien	380 S.	978-3-942183-23-9
8325	Gronau, Norbert	Lizenzmodelle für ERP-Systeme (ERP Management 4/2010)	66 S.	978-3-942183-25-3
8326	Scholz-Reiter, Bernd	Autonome Systeme (Industrie Management 1/2011)	66 S.	978-3-942183-26-0
8327	Gronau, Norbert	Mobiles Arbeiten und Sicherheit (iSuccess 1/2011)	66 S.	978-3-942183-27-7
8328	Gronau, Norbert	Effizienz durch ERP (ERP Management 1/2011)	82 S.	978-3-942183-28-4
8329	Gronau, Norbert	Simulation in Produktion und Logistik (Productivity Management 1/2011)	66 S.	978-3-942183-29-1
8330	Scholz-Reiter, Bernd	Brasilien (Industrie Management 2/2011)	82 S.	978-3-942183-30-7
8331	Scholz-Reiter, Bernd	Industrial Automation (Productivity Management 2/2011)	46 S.	978-3-942183-31-4
8332	Bill, R., Flach, G., Klammer, U., Lerche, T. (Hrsg.)	GeoForum MV 2011 – Geodateninfrastrukturen: Drehscheibe für Wirtschaft und Verwaltung	181 S.	978-3-942183-32-1
8333	Krallmann, Hermann; Levina, Olga; Schulz, Marcel	Chronik des Fachgebiets Systemanalyse und EDV	130 S.	978-3-942183-33-8
8336	Hölzl, Ribe-Baumann, Brückner (Ed.)	Joint Workshop of the German Research Training Groups in Computer Science	242 S.	978-3-942183-36-9
8338	Dr. Erik Borg, Holger Daedelow (Hrsg.)	RapidEye Science Archive (RESA) - Erste Ergebnisse	190 S.	978-3-942183-38-3
8339	Gronau, Norbert; Meier, Horst; Bahrs, Julian (Hrsg.)	Handbuch gegen Produktpiraterie - Prävention von Produktpiraterie durch Technologie, Organisation und Wissensflussmanagement	248 S.	978-3-942183-39-0
8340	Gronau, Norbert	Anpassungsfähigkeit und Flexibilität (ERP Management 2/2011)	66 S.	978-3-942183-40-6
8343	Kretzer, Michael (Hrsg.)	Spannungsfelder des Software-Engineering im Medizin- und Pharmaumfeld	142 S.	978-3-942183-43-7
8347	Flach, Guntram; Schultz, Jürgen (Hrsg.)	6. Rostocker eGovernment-Forum 2011 - Nachhaltiges eGovernment: Herausforderung und Notwendigkeit	82 S.	978-3-942183-47-5
8348	Scholz-Reiter, Bernd	Intralogistik (Productivity Management 4/2011)	66 S.	978-3-942183-48-2
8349	Gronau, Norbert	Kostenreduktion durch ERP (ERP Management 3/2011)	66 S.	978-3-942183-49-9
8355	Gronau, Norbert	ERP-Strategien (ERP Management 4/2011)	66 S.	978-3-942183-55-0
8357	Scholz-Reiter, Bernd	Grüne Technologien (Industrie Management 6/2011)	82 S.	978-3-942183-57-4
8359	Scholz-Reiter, Bernd	Produktionsnahe Informationssysteme (Industrie Management 1/2012)	66 S.	978-3-942183-59-8
8360	Gronau, Norbert	Wettbewerbsfähigkeit (ERP Management 1/2012)	66 S.	978-3-942183-60-4
8361	Borg, Erik; Daedelow, Holger; Johnson, Ryan (Hrsg.)	RapidEye Science Archive (RESA) - Vom Algorithmus zum Produkt	232 S.	978-3-942183-61-1

Ausgewählte Literatur für die Bereiche

Fabrikmanagement
Fertigungsmanagement
IT
Materialmanagement
Produktentwicklung
Supply Chain Management

8362	Gronau, Norbert	Kundenindividuelle Produktion (Productivity Management 1/2012)	66 S.	978-3-942183-62-8
8364	Gronau, Norbert; Eggert, Sandy	115 ERP-Systeme im Vergleich (ERP Marktüberblick 1/2012)	96 S.	978-3-942183-64-2
8365	Gronau, Norbert	Produktkonfiguration - 53 Anbieter im Vergleich (Productivity Marktüberblick 1/2012)	60 S.	978-3-942183-65-9
8367	Scholz-Reiter, Bernd	Russland (Industrie Management 2/2012)	66 S.	978-3-942183-67-3
8368	Bill, Ralf; Flach, Guntram; Klammer, Ulf; Lerche, Tobias (Hrsg.)	GeoForum MV 2012 – GIS schafft Energie: Beiträge der Geoinformationswirtschaft zur Energiewende	220 S.	978-3-942183-68-0
8371	Gronau, Norbert	Customer Relationship Management (ERP Management 2/2012)	66 S.	978-3-942183-71-0
8375	Gronau, Norbert; Weber, Nadja; Jähnchen, Marie	Wettbewerbsfaktor Analytics - Status, Potenziale, Herausforderung	164 S.	978-3-942183-75-8
8376	Gronau, Norbert	Technische Dokumentation (Industrie Management 4/2012)	68 S.	978-3-942183-76-5
8379	Scholz-Reiter, Bernd (Hrsg.); Böse, Felix	Selbststeuerung in der Fahrzeuglogistik	222 S.	978-3-942183-79-6
8380	Scholz-Reiter, Bernd	Neuausrichtung der Automobilindustrie (Industrie Management 5/2012)	66 S.	978-3-942183-80-2
8381	Flach, Guntram; Schultz, Jürgen (Hrsg.)	7. Rostocker eGovernment-Forum - Innovatives eGovernment: Effizienzsteigerung durch Wandel	64 S.	978-3-942183-81-9
8383	Gronau, Norbert; Fohrholz, Corinna (Hrsg.)	Höhere Produktivität durch moderne ERP-Systeme	336 S.	978-3-942183-83-3
8385	Gronau, Norbert	Energieeffiziente MES - 39 Anbieter im Vergleich (Productivity Marktüberblick 2/2012)	60 S.	978-3-942183-85-7
8387	Gronau, Norbert	ERP-Technologien (ERP Management 3/2012)	66 S.	978-3-942183-87-1
8388	Gronau, Norbert; Eggert, Sandy	86 ERP-Systeme im Vergleich (ERP Marktüberblick 2/2012)	78 S.	978-3-942183-88-8
8389	Gronau, Norbert; Gäbler, Andreas	Einführung in die Wirtschaftsinformatik, Band 1 (3. überarbeitete Auflage 2012)	310 S.	978-3-942183-89-5
8390	Gronau, Norbert; Gäbler, Andreas	Einführung in die Wirtschaftsinformatik, Band 2 (3. überarbeitete Auflage 2012)	290 S.	978-3-942183-90-1
8391	Gronau, Norbert	ERP-Markt.info 2/2012	30 S.	978-3-942183-91-8
8392	Gronau, Norbert	Diskrete Fertigung (Productivity Management 5/2012)	66 S.	978-3-942183-92-5
8394	Gronau, Norbert	Prozessmanagement mit ERP (ERP Management 4/2012)	66 S.	978-3-942183-94-9
8398	Scholz-Reiter, Bernd	Vierte industrielle Revolution (Industrie Management 1/2013)	66 S.	978-3-942183-98-7
5000	Scholz-Reiter, Bernd	Industrie 4.0 (Productivity Management 1/2013)	66 S.	978-3-95545-000-7
5005	Bill, R.; Flach, G.; Korduan, P.; Zehner, M.; Seip, S. (Hrsg.)	GeoForum MV 2013 – Neue Horizonte für Geodateninfrastrukturen	256 S.	978-3-95545-005-2
5006	Gronau, Norbert	Kundenzufriedenheit (Productivity Management 2/2013)	46 S.	978-3-95545-006-9
5008	Gronau, Norbert	Qualitätsmanagement Systeme (Productivity Marktüberblick 1/2013)	40 S.	978-3-95545-008-3

Ausgewählte Literatur für die Bereiche

Fabrikmanagement
Fertigungsmanagement
IT
Materialmanagement
Produktentwicklung
Supply Chain Management

5010	Gronau, Norbert	Wirtschaftlichkeit (ERP Management 1/2013)	66 S.	978-3-95545-010-6
5011	Gronau, Norbert; Eggert, Sandy	123 ERP-Systeme im Vergleich (ERP Marktüberblick 1/2013)	102 S.	978-3-95545-011-3
5019	Scholz-Reiter, Bernd	Standardisierung (Productivity Management 3/2013)	66 S.	978-3-95545-019-9
5023	Gronau, Norbert	Big Data (ERP Management 2/2013)	66 S.	978-3-95545-023-6
5029	Gronau, Norbert	Cloud Computing (Industrie Management 4/2013)	66 S.	978-3-95545-029-8
5031	Gronau, Norbert	Nachhaltige Produktion (Productivity Management 4/2013)	66 S.	978-3-95545-031-1
5036	Gronau, Norbert; Eggert, Sandy	ERP Add-ons (ERP Management 3/2013)	66 S.	978-3-95545-036-6
5044	Gronau, Norbert	Einführung in die Wirtschaftsinformatik, Band 2 (4. überarbeitete Auflage 2013)	290 S.	978-3-955450-44-1
5051	Gronau Norbert; Weber, Nadja; Fohrholz, Corinna	Forschungsstudie 2013 - Wettbewerbsfaktor Analytics (E-Book)	92 S	978-3-95545-051-9
5052	Scholz-Reiter, Bernd	Bio-Manufacturing (Industrie Management 6/2013)	66 S.	978-3-95545-052-6

Materialmanagement

8329	Gronau, Norbert	Simulation in Produktion und Logistik (Productivity Management 1/2011)	66 S.	978-3-942183-29-1
8356	Scholz-Reiter, Bernd	Selbstoptimierende Produktion (Productivity Management 5/2011)	66 S.	978-3-942183-56-7
8369	Gronau, Norbert	Industrial Automation (Productivity Management 2/2012)	46 S.	978-3-942183-69-7
8385	Gronau, Norbert	Energieeffiziente MES - 39 Anbieter im Vergleich (Productivity Marktüberblick 2/2012)	60 S.	978-3-942183-85-7
8392	Gronau, Norbert	Diskrete Fertigung (Productivity Management 5/2012)	66 S.	978-3-942183-92-5
5000	Scholz-Reiter, Bernd	Industrie 4.0 (Productivity Management 1/2013)	66 S.	978-3-95545-000-7
5006	Gronau, Norbert	Kundenzufriedenheit (Productivity Management 2/2013)	46 S.	978-3-95545-006-9
5017	Scholz-Reiter, Bernd	Desktop Manufacturing (Industrie Management 2/2013)	66 S.	978-3-95545-017-5
5019	Scholz-Reiter, Bernd	Standardisierung (Productivity Management 3/2013)	66 S.	978-3-95545-019-9
5031	Gronau, Norbert	Nachhaltige Produktion (Productivity Management 4/2013)	66 S.	978-3-95545-031-1
5038	Gronau, Norbert	Eco-Innovation (Industrie Management 5/2013)	66 S.	978-3-95545-038-0
5042	Lee, Seung-Ho	Ansatz zur Erhöhung der Produktivität durch Wissen: Unter Berücksichtigung von kulturellen Aspekten, Produkt- und Prozess-Komplexität	247 S.	978-3-95545-042-7
5048	Scholz-Reiter, Bernd	Logistikprozesse (Productivity Management 5/2013)	66 S.	978-3-95545-048-9

Produktentwicklung

77100	Krallmann, Herrmann	Produktkonfiguration (Industrie Management 1/2003)	82 S.	978-3-936771-00-8

Ausgewählte Literatur für die Bereiche

Fabrikmanagement
Fertigungsmanagement
IT

Materialmanagement
Produktentwicklung
Supply Chain Management

77108	Gronau, Norbert	Collaborative Engineering (Industrie Management 5/2003)	82 S.	978-3-936771-08-4
77136	Scholz-Reiter, Bernd	Digital Engineering (Industrie Management 2/2005)	66 S.	978-3-936771-36-7
77137	Gronau, Norbert	Innovationsmanagement (Industrie Management 3/2005)	66 S.	978-3-936771-37-4
77158	Kern, Eva-Maria	Verteilte Produktentwicklung - Rahmenkonzept und Vorgehensweise zur organisatorischen Gestaltung	230 S.	978-3-936771-58-9
77159	Hahn, Axel; Grauer, Manfred	Informations- und Wissensdrehscheibe Produktdatenmanagement	74 S.	978-3-936771-59-6
77172	Blecker, Thorsten; Friedrich, Gerhard (Hrsg.) ; Jannach, Dietmar	Building intelligent electronic Services	150 S.	978-3-936771-72-5
77183	Scholz-Reiter, Bernd	Industrial Engineering (Industrie Management 5/2006)	66 S.	978-3-936771-83-1
77190	Scholz-Reiter, Bernd	Änderungsmanagement (Industrie Management 6/2006)	66 S.	978-3-936771-90-9
77198	Gronau, Norbert (Hrsg.)	4. Konferenz Professionelles Wissensmanagement - Erfahrungen und Visionen, Band 1 / D	446 S.	978-3-936771-98-5
77199	Gronau, Norbert (Ed.)	4th Conference on Professional Knowledge Management - Experiences and Visions, Band 2 / E	392 S.	978-3-936771-99-2
1910	Scholz-Reiter, Bernd	Entwicklung von Produktionssystemen (Industrie Management 3/2007)	82 S.	978-3-940019-10-3
1925	Gronau, Norbert	Komplexitätsmanagement (Industrie Management 6/2007)	66 S.	978-3-940019-25-7
1941	Scholz-Reiter, Bernd	PLM (Industrie Management 3/2008)	66 S.	978-3-940019-41-7
1945	Krause, Lars	Methode zur Implementierung von intergriertem Produktdatenmanagement (PDM); 2. durchgesehene Auflage	286 S.	978-3-940019-45-5
1956	Strickmann, Jan	Analysemethoden zur Bewertung von Entwicklungsprojekten. Ein integriertes semantisches Modell von Projekt- und Produktdaten zur Bewertung der Entwicklungsleistung im Projektcontrolling	194 S.	978-3-940019-56-1
1957	Gronau, Norbert	Produktpiraterie (Industrie Management 6/2008)	66 S.	978-3-940019-57-8
1964	Gronau, Norbert	Frühe Phasen der Produktentwicklung (Industrie Management 1/2009)	66 S.	978-3-940019-64-6
1968	Scholz-Reiter, Bernd	Technologiegetriebene Veränderungen der Arbeitswelt (Industrie Management 2/2009)	82 S.	978-3-940019-68-4
1980	Schenk, Michael	Digital Engineering - Herausforderung für die Arbeits- und Betriebsorganisation	400 S.	978-3-940019-80-6
1992	Broy, M., Gronau, N., Wildemann, H.	Gestaltung interorganisationaler Software-Entwicklung - Herausforderungen durch Wandlungsfähigkeit und Wiederverwendung	352 S.	978-3-940019-92-9
1994	Gronau, Norbert	Prozessorientiertes Wissensmanagement (Industrie Management 1/2010)	66 S.	978-3-940019-94-3
1999	Sommer, Björn	Informationsmodell für das rechnerunterstützte Monitoring von Engineering-Projekten in der Produktentwicklung	202 S.	978-3-940019-99-8
8305	Scholz-Reiter, Bernd	Digital Engineering (Industrie Management 2/2010)	82 S.	978-3-942183-05-5
8326	Scholz-Reiter, Bernd	Autonome Systeme (Industrie Management 1/2011)	66 S.	978-3-942183-26-0
8332	Bill, R., Flach, G., Klammer, U., Lerche, T. (Hrsg.)	GeoForum MV 2011 – Geodateninfrastrukturen: Drehscheibe für Wirtschaft und Verwaltung	181 S.	978-3-942183-32-1

Ausgewählte Literatur für die Bereiche

Fabrikmanagement
Fertigungsmanagement
IT
Materialmanagement
Produktentwicklung
Supply Chain Management

8339	Gronau, Norbert; Meier, Horst; Bahrs, Julian (Hrsg.)	Handbuch gegen Produktpiraterie - Prävention von Produktpiraterie durch Technologie, Organisation und Wissensflussmanagement	248 S.	978-3-942183-39-0
8340	Gronau, Norbert	Anpassungsfähigkeit und Flexibilität (ERP Management 2/2011)	66 S.	978-3-942183-40-6
8341	Gronau, Norbert	Produktivität steigern (Productivity Management 3/2011)	66 S.	978-3-942183-41-3
8350	Gronau, Norbert	Produktentstehung (Industrie Management 5/2011)	82 S.	978-3-942183-50-5
8357	Scholz-Reiter, Bernd	Grüne Technologien (Industrie Management 6/2011)	82 S.	978-3-942183-57-4
8361	Borg, Erik; Daedelow, Holger; Johnson, Ryan (Hrsg.)	RapidEye Science Archive (RESA) - Vom Algorithmus zum Produkt	232 S.	978-3-942183-61-1
8365	Gronau, Norbert	Produktkonfiguration - 53 Anbieter im Vergleich (Productivity Marktüberblick 1/2012)	60 S.	978-3-942183-65-9
8370	Gronau, Norbert	Wissensarbeit (Industrie Management 3/2012)	82 S.	978-3-942183-70-3
8392	Gronau, Norbert	Diskrete Fertigung (Productivity Management 5/2012)	66 S.	978-3-942183-92-5
8398	Scholz-Reiter, Bernd	Vierte industrielle Revolution (Industrie Management 1/2013)	66 S.	978-3-942183-98-7
5000	Scholz-Reiter, Bernd	Industrie 4.0 (Productivity Management 1/2013)	66 S.	978-3-95545-000-7
5002	Borg, Erik; Daedelow, Holger; Johnson, Ryan (Hrsg.)	From the Basics to the Service	330 S.	978-3-95545-002-1
5006	Gronau, Norbert	Kundenzufriedenheit (Productivity Management 2/2013)	46 S.	978-3-95545-006-9
5017	Scholz-Reiter, Bernd	Desktop Manufacturing (Industrie Management 2/2013)	66 S.	978-3-95545-017-5
5019	Scholz-Reiter, Bernd	Standardisierung (Productivity Management 3/2013)	66 S.	978-3-95545-019-9
5021	Gronau, Norbert	Demografische Veränderung der Arbeitswelt (Industrie Management 3/2013)	82 S.	978-3-95545-021-2
5025	Scholz-Reiter, Bernd; Krohne, Farian	Entwicklung einer Bewertungsmethode für das Anlaufmanagement (Informationstechnische Systeme und Organisation von Produktion und Logistik, Band 15)	162 S.	978-3-95545-025-0
5029	Gronau, Norbert	Cloud Computing (Industrie Management 4/2013)	66 S.	978-3-95545-029-8
5031	Gronau, Norbert	Nachhaltige Produktion (Productivity Management 4/2013)	66 S.	978-3-95545-031-1
5042	Lee, Seung-Ho	Ansatz zur Erhöhung der Produktivität durch Wissen: Unter Berücksichtigung von kulturellen Aspekten, Produkt- und Prozess-Komplexität	247 S.	978-3-95545-042-7
5050	Biedermann, Hubert (Hrsg.)	Corporate Capability Management - Wie wird kollektive Intelligenz im Unternehmen genutzt?	455 S.	978-3-95545-050-2
5052	Scholz-Reiter, Bernd	Bio-Manufacturing (Industrie Management 6/2013)	66 S.	978-3-95545-052-6

Supply Chain Management

77173	Blecker, Thorsten; Friedrich, Gerhard; Hvam, Lars; Edwards, Kasper (Hrsg.)	Customer Interaction and Customer Integration	488 S.	978-3-936771-73-2

Ausgewählte Literatur für die Bereiche

Fabrikmanagement
Fertigungsmanagement
IT

Materialmanagement
Produktentwicklung
Supply Chain Management

1903	Blecker, Thorsten; Edwards, Kasper; Friedrich, Gerhard; Hvam, Lars; Salvador, Fabrizio (Hrsg.)	Innovative Processes and Products for Mass Customization	440 S.	978-3-940019-03-5
8317	Scholz-Reiter, Bernd	Globale Logistik (Industrie Management 5/2010)	66 S.	978-3-942183-17-8
8318	Gronau, Norbert	Störungsmanagement (Productivity Management 3/2010)	66 S.	978-3-942183-18-5
8319	Gronau, Norbert	ERP-Auswahl und -Einführung (ERP Management 3/2010)	66 S.	978-3-942183-19-2
8324	Scholz-Reiter, Bernd	Prozessmanagement (Productivity Management 4/2010)	66 S.	978-3-942183-24-6
8329	Gronau, Norbert	Simulation in Produktion und Logistik (Productivity Management 1/2011)	66 S.	978-3-942183-29-1
8330	Scholz-Reiter, Bernd	Brasilien (Industrie Management 2/2011)	82 S.	978-3-942183-30-7
8335	Gronau, Norbert	Wandlungsfähige Produktionssysteme (Industrie Management 3/2011)	82 S.	978-3-942183-35-2
8339	Gronau, Norbert; Meier, Horst; Bahrs, Julian (Hrsg.)	Handbuch gegen Produktpiraterie - Prävention von Produktpiraterie durch Technologie, Organisation und Wissensflussmanagement	248 S.	978-3-942183-39-0
8341	Gronau, Norbert	Produktivität steigern (Productivity Management 3/2011)	66 S.	978-3-942183-41-3
8344	Siepermann/Eley (Hrsg.)	Logistik – Gestern, heute, morgen - Festschrift für Richard Vahrenkamp zur Vollendung des 65. Lebensjahres	348 S.	978-3-942183-44-4
8348	Scholz-Reiter, Bernd	Intralogistik (Productivity Management 4/2011)	66 S.	978-3-942183-48-2
8350	Gronau, Norbert	Produktentstehung (Industrie Management 5/2011)	82 S.	978-3-942183-50-5
8356	Scholz-Reiter, Bernd	Selbstoptimierende Produktion (Productivity Management 5/2011)	66 S.	978-3-942183-56-7
8357	Scholz-Reiter, Bernd	Grüne Technologien (Industrie Management 6/2011)	82 S.	978-3-942183-57-4
8359	Scholz-Reiter, Bernd	Produktionsnahe Informationssysteme (Industrie Management 1/2012)	66 S.	978-3-942183-59-8
8361	Borg, Erik; Daedelow, Holger; Johnson, Ryan (Hrsg.)	RapidEye Science Archive (RESA) - Vom Algorithmus zum Produkt	232 S.	978-3-942183-61-1
8367	Scholz-Reiter, Bernd	Russland (Industrie Management 2/2012)	66 S.	978-3-942183-67-3
8369	Gronau, Norbert	Industrial Automation (Productivity Management 2/2012)	46 S.	978-3-942183-69-7
8372	Gronau, Norbert	Dezentralisierung (Productivity Management 3/2012)	66 S.	978-3-942183-72-7
8374	Müller, Egon (Hrsg.)	Demographischer Wandel – Herausforderung für die Arbeits- und Betriebsorganisation der Zukunft	461 S.	978-3-942183-74-1
8376	Gronau, Norbert	Technische Dokumentation (Industrie Management 4/2012)	68 S.	978-3-942183-76-5
8380	Scholz-Reiter, Bernd	Neuausrichtung der Automobilindustrie (Industrie Management 5/2012)	66 S.	978-3-942183-80-2
8384	Scholz-Reiter, Bernd	Energieeffiziente Produktion (Productivity Management 4/2012)	66 S.	978-3-942183-84-0
8385	Gronau, Norbert	Energieeffiziente MES - 39 Anbieter im Vergleich (Productivity Marktüberblick 2/2012)	60 S.	978-3-942183-85-7
8392	Gronau, Norbert	Diskrete Fertigung (Productivity Management 5/2012)	66 S.	978-3-942183-92-5

Ausgewählte Literatur für die Bereiche

Fabrikmanagement
Fertigungsmanagement
IT

Materialmanagement
Produktentwicklung
Supply Chain Management

8393	Gronau, Norbert	Hidden Champions (Industrie Management 6/2012)	66 S.	978-3-942183-93-2
5000	Scholz-Reiter, Bernd	Industrie 4.0 (Productivity Management 1/2013)	66 S.	978-3-95545-000-7
5003	Schmalzried, Dirk	In-Memory-basierte Real-Time Supply Chain Planung	250 S.	978-3-95545-003-8
5006	Gronau, Norbert	Kundenzufriedenheit (Productivity Management 2/2013)	46 S.	978-3-95545-006-9
5021	Gronau, Norbert	Demografische Veränderung der Arbeitswelt (Industrie Management 3/2013)	82 S.	978-3-95545-021-2
5036	Gronau, Norbert; Eggert, Sandy	ERP Add-ons (ERP Management 3/2013)	66 S.	978-3-95545-036-6
5042	Lee, Seung-Ho	Ansatz zur Erhöhung der Produktivität durch Wissen: Unter Berücksichtigung von kulturellen Aspekten, Produkt- und Prozess-Komplexität	247 S.	978-3-95545-042-7
5045	Scholz-Reiter, Bernd (Hrsg.); Uwe Hinrichs	Simulationsbasierte Analyse der Dynamik	175 S.	978-3-95545-045-8
5048	Scholz-Reiter, Bernd	Logistikprozesse (Productivity Management 5/2013)	66 S.	978-3-95545-048-9
5052	Scholz-Reiter, Bernd	Bio-Manufacturing (Industrie Management 6/2013)	66 S.	978-3-95545-052-6

Die Fortschritte der Informationstechnik eröffnen ungeahnte Chancen für die industrielle Produktion: Informationen über Maschinen, Bauteile und Aufträge können zu geringen Kosten und in hoher Detaillierung erfasst und im Netzwerk weitergeleitet werden. Gleichzeitig nimmt die Fähigkeit zu, auch große Informationsmengen automatisch verarbeiten, Diagnosen treffen und Maßnahmen einleiten zu können. Entsprechend gilt es, viel versprechende Konzepte zu entwickeln, um die neuen Möglichkeiten gewinnbringend nutzen zu können. Dabei kann man leicht übersehen, dass die sog. vierte industrielle Revolution auch den Menschen betrifft und unsere Arbeit zum Teil grundlegend verändern wird.

Der vorliegende Tagungsband stellt Forschungsergebnisse der Mitglieder der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation vor.
Die Beiträge behandeln das Thema aus der Perspektive der Modellierung, des Menschen und der industriellen Anwendung, so dass ein umfassender Überblick entsteht.

ISBN 978-3-95545-083-0

9 783955 450830