

# KMU 4.0 - Digitale Transformation in kleinen und mittelständischen Unternehmen

---

Dominik T. Matt (Hrsg.)



Schriftenreihe der Wissenschaftlichen Gesellschaft  
für Arbeits- und Betriebsorganisation (WGAB) e.V.





Dominik T. Matt (Hrsg.)  
KMU 4.0 - Digitale Transformation in kleinen und mittelständischen  
Unternehmen

Reihe:  
Schriftenreihe der Wissenschaftlichen  
Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation



Wissenschaftliche Gesellschaft  
für Arbeits- und Betriebsorganisation

KMU 4.0 –  
Digitale Transformation in kleinen und  
mittelständischen Unternehmen

Dominik T. Matt (Hrsg.)

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dominik T. Matt**  
Industrial Engineering and Automation (IEA)  
Fakultät für Naturwissenschaften und Technik  
Freie Universität Bozen  
Universitätsplatz 5, 39100 Bozen, Italien  
dominik.matt@unibz.it

Fraunhofer Italia Research Konsortialgesellschaft mit beschränkter Haftung  
A.-Volta-Straße 13 A, 39100 Bozen, Italien  
dominik.matt@fraunhofer.it

**ISBN 978-3-95545-267-4**

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 2018  
Gedruckt und gebunden in Berlin 2018

© **GITO mbH Verlag Berlin 2018**

GITO mbH Verlag  
für Industrielle Informationstechnik und Organisation  
Kaiserdamm 23  
14057 Berlin  
Tel.: +49.(0)30.41 93 83 64  
Fax: +49.(0)30.41 93 83 67  
E-Mail: [service@gito.de](mailto:service@gito.de)  
Internet: [www.gito.de](http://www.gito.de)



# Vorwort

KMUs bilden das Rückgrat unserer Wirtschaft, sie erwirtschaften europaweit den größten Anteil am Bruttoinlandsprodukt und haben auch als wichtiger Arbeitgeber eine zentrale Rolle inne. Und trotzdem stehen KMUs im Kontext der „Digitalisierung“ bzw. der sogenannten „Digitalen Revolution“ nicht immer in der ersten Reihe – häufig beherrschen prominente Namen großer Konzerne die Schlagzeilen. Gleichermäßen lässt sich in der Praxis bei kleinen und mittleren Betrieben eine gewisse Skepsis gegenüber dem Thema Digitalisierung beobachten. Vermeintlich hohe Kosten für neue Technologien, der noch mitunter hohe Forschungs- und Entwicklungsbedarf und das damit verbundene potentiell erhöhte unternehmerische Risiko werden hier häufig als Argumente angeführt. Die digitale Transformation in KMU wird unternehmensintern wie -übergreifend in großem Maße noch von Einzelinitiativen geprägt.

Die zentrale Frage für die unternehmerische Praxis lautet folglich: wie sollten KMU am besten vorgehen, damit die digitale Transformation kein Sprung ins Ungewisse, sondern der Auftakt für eine erfolgreiche und nachhaltige Weiterentwicklung des Unternehmens wird?

Die Wissenschaftliche Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation (WGAB) möchte mit diesem Buch die These untermauern, dass eine systematische Einführung und Umsetzung der Digitalisierung in KMU nicht nur enorme Chancen bietet, sondern vielmehr eine Notwendigkeit darstellt, um auch in Zukunft wettbewerbsfähig agieren zu können.

Im vorliegenden Tagungsband setzen die Mitglieder der WGAB daher den Schwerpunkt ihrer Forschungsergebnisse auf das Leitthema „KMU 4.0 – Digitale Transformation in kleinen und mittelständischen Unternehmen“. Ausgehend von der Analyse der Potenziale und Herausforderungen für KMU, über Digitalisierungsstrategien, der Entwicklung von Instrumenten zur Reifegradbestimmung bis hin zu spezifischen Fallbeispielen zur Umsetzung von Digitalisierungsmaßnahmen finden Wissenschaftler wie auch Praktiker eine Reihe an wertvollen Inputs.

Den Autoren der Beiträge danke ich herzlich für erfrischende Denkanstöße und interessante Einblicke in diese Thematik.

Bozen, im September 2018

Dominik T. Matt



# Inhaltsverzeichnis

Industrie 4.0 für die Textil- und Bekleidungsindustrie.....	1
<i>Larissa von Wascinski, Michael Weiß, Meike Tilebein</i>	
Konzept zur Unterstützung der Digitalen Transformation von Kleinen und Mittelständischen Unternehmen.....	21
<i>Stefan Leineweber, Thom Wienbruch, Bernd Kuhlenkötter</i>	
Mensch, Organisation, Technik im KMU 4.0 .....	41
<i>Uwe Dombrowski, Alexander Karl, Thomas Richter, Jonas Wullbrandt</i>	
Reifegradbestimmung als Vorstufe der Industrie 4.0- Strategieentwicklung.....	71
<i>Egon Müller, Mandy Tawalbeh, Hendrik Hopf</i>	
Industrie 4.0 Assessment - Bewertungsmodell zur Identifikation und Priorisierung von Industrie 4.0 Umsetzungsmaßnahmen in KMUs ...	93
<i>Dominik T. Matt, Marco Unterhofer, Erwin Rauch, Michael Riedl, Riccardo Brozzi</i>	
Produktivitätsanalyse 4.0.....	113
<i>Constantin Grabner, Robert Glöckner, Nils Barck, Hermann Lödging</i>	
Digitalisierung der Produktion in KMU .....	135
<i>Norbert Gronau, Sander Lass</i>	
User-driven Innovation mit UX Probes.....	153
<i>Kathrin Pollmann, Nora Fronemann, Anne Krüger, Wilhelm Bauer</i>	
Zustandsüberwachungssysteme zur Entscheidungsunterstützung in der Produktionsplanung.....	171
<i>Matthias Karner, Wilfried Sihl</i>	
Mobile Endgeräte in der Produktion .....	189
<i>Michael Wächter, Danny Rüffert, Angelika C. Bullinger</i>	
Beitrag zur Strukturplanung und -absicherung der Smart Factory ...	207
<i>Samuel Horler, Egon Müller</i>	

Entwicklung eines flexiblen, inkrementell lernenden Programmiersystems für kollaborative Roboterapplikationen .....	233
<i>Andrea Giusti, Dieter Steiner, Sebastian Bertoli, Dominik T. Matt</i>	
Untersuchung des Potenzials für KMU zur Unterstützung der Baulieferkette mit Building Information Modeling: eine Fallstudie eines ETO-Fassadenlieferanten .....	249
<i>Patrick Dallasega, Christoph P. Schimanski, Andrea Revolti, Carmen Marcher, Dominik T. Matt</i>	
Digitalisierungsstrategien: eine systematische Analyse der wissenschaftlichen Literatur und der EU-Projekte.....	273
<i>Guido Orzes, Riccardo Brozzi, Mario Goldin, Dominik T. Matt</i>	





# Industrie 4.0 für die Textil- und Bekleidungsindustrie

Potenziale, Herausforderungen und KMU-spezifische Ansätze  
Larissa von Wascinski, Michael Weiß, Meike Tilebein

Institut für Diversity Studies in den Ingenieurwissenschaften (IDS),  
Universität Stuttgart

## 1. Einleitung

Der fortschreitende digitale Wandel verändert die Arbeits- und Produktionsumgebungen von Unternehmen rapide. Neben Anpassungsdruck bringt dieser ebenso Potenziale, auch für kleine und mittlere Unternehmen (KMU). Hohe Investitionskosten für neue Technologien, unzureichende Qualifikation der Beschäftigten und fehlende Standards sind Beispiele für Hemmnisse, welche die Zurückhaltung vieler KMU der Textil- und Bekleidungsindustrie gegenüber Industrie 4.0 begründen. Es besteht daher ein Bedarf an KMU-spezifischen Informationen und an Basiswissen für konkrete Implementierungen in Unternehmen. Ebenso benötigen KMU branchenspezifische beispielgebende Leuchtturmprojekte, Unterstützung zur Initiierung und Realisierung von Umsetzungsprojekten sowie umfassende Qualifikationsmaßnahmen.

Genau an diesen Schwachstellen setzt das "Mittelstand 4.0 - Kompetenzzentrum *Textil vernetzt*" an. Dieses wird im Rahmen der Förderinitiative "Mittelstand 4.0 - Digitale Produktions- und Arbeitswelten" durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert. Textilbasierte Werkstoffe und smarte Produktionsprozesse sollen die Potenziale der Digitalisierung und Vernetzung veranschaulichen sowie den Weg dorthin an KMU vermitteln. Dem Projekt liegt ein Konzept aus den Aktivitäten Informieren, Demonstrieren, Qualifizieren, Konzipieren und Umsetzen zugrunde.

Der vorliegende Beitrag stellt in Kapitel 2 die strukturellen Rahmenbedingungen für KMU der Textil- und Bekleidungsindustrie vor und erläutert anschließend notwendige Handlungsfelder für Industrie 4.0. In Kapitel 3 werden zuerst die Potenziale der Digitalisierung für Unterneh-

men in der Textil- und Bekleidungsindustrie aufgezeigt. Bei der Erschließung dieser Potenziale gibt es für KMU spezifische Herausforderungen, die anschließend dargestellt werden. In Kapitel 4 steht das "Mittelstand 4.0 - Kompetenzzentrum *Textil vernetzt*" im Fokus, das diese Aspekte konkret adressiert. Kapitel 5 schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

## 2. Industrie 4.0 in der deutschen Textil- und Bekleidungsindustrie

In Deutschland sind derzeit ca. 1400 Textil- und Bekleidungsunternehmen (inklusive Schuh- und Lederwaren) angesiedelt. In Summe erwirtschaften diese einen jährlichen Umsatz von rund 32 Mrd. Euro (Gesamtverband der deutschen Textil- und Modeindustrie e. V. 2017a). Daher zählt diese Branche zu den wichtigsten Konsumgüterbranchen in Deutschland (Uppenkamp 2017). 95% dieser Unternehmen haben weniger als 250 Beschäftigte (Gesamtverband der deutschen Textil- und Modeindustrie e. V. 2017a), zählen also zu den KMU.

Aufgrund des starken internationalen Wettbewerbs im Bereich textiler Massenprodukte, mit Großproduzenten in Asien und Osteuropa, haben viele deutsche Textil- und Bekleidungsunternehmen sich auf Nischen spezialisiert und ihren Fokus auf die Entwicklung und Produktion technischer Textilien bzw. exklusiver Mode gelegt (Artschwager et al. 2017).

Die Herstellung modischer und hochwertiger Bekleidung erfordert die schnelle Anpassung an Modetrends und an Veränderungen im Kundenverhalten sowie die damit einhergehenden Marktveränderungen hin zu Kleinserien und Individualisierung. Im Bereich der technischen Textilien sind die Entwicklung von High-Tech-Fasern und neuer Produktionstechnologien sowie der breiter werdende Anwendungsbereich für technische Textilien Treiber einer hohen Marktdynamik mit kundenspezifischen Einzellösungen. Der Einsatzbereich textilbasierter Werkstoffe reicht dabei von Anwendungen in der Land- und Forstwirtschaft über den Fahrzeugbau bis hin zu Medizinprodukten (Allianz Faserbasierte Werkstoffe Baden-Württemberg 2018).

Die zunehmende Bedeutung der technischen Anwendungsbereiche von Textilien spiegelt sich in den Unternehmensentwicklungen wieder. So hat sich der Auftragseingang im Produktionszweig "Herstellung von technischen Textilien" von 2012 bis 2016 um gut 20% erhöht (Gesamtverband der deutschen Textil- und Modeindustrie e. V. 2017b), und auch auf den Umsatz bezogen wurden hier in den letzten Jahren die höchsten Zuwächse erwirtschaftet (Uppenkamp 2017).

Textile Wertschöpfungsprozesse, insbesondere für die beschriebenen Nischenprodukte, sind aufgrund der vielfältigen Anforderungen seitens der Anwendungsfelder und der faserbasierten Ausgangsmaterialien sehr komplex. Daher benötigen Unternehmen für die Entwicklung und Produktion sehr viel (erfahrungsbasiertes) Wissen (Weiß et al. 2017). Zusätzlich liegt in Unternehmen der Textil- und Bekleidungsindustrie meist eine stark heterogene Produktions- und Systemlandschaft vor. Häufig finden sich nebeneinander Produktionsanlagen unterschiedlichster Generationen, und es kommen individuelle Softwarelösungen für die unterschiedlichen Problemstellungen in den verschiedenen Unternehmensbereichen zum Einsatz. Der digitale Wandel, wie er durch Industrie 4.0 forciert wird, und die damit einhergehenden Änderungen der Arbeits- und Produktionsumgebungen stellen daher viele Unternehmen vor große Herausforderungen.

Die Umsetzung von Industrie 4.0 in der deutschen Textil- und Bekleidungsindustrie erfordert ein breit angelegtes Vorgehen, wie es exemplarisch für den Bereich Stricken in der Studie Strick 4.0 (Artschwager et al. 2017) beschrieben wird. Dabei wurden die folgenden zehn Handlungsfelder identifiziert.

#### *Handlungsfeld 1: Horizontale Integration*

Etablierte Wertschöpfungsbeziehungen müssen noch flexibler gestaltet werden. Dazu müssen Informationen aus der gesamten Wertschöpfungskette, nicht nur von Zulieferern sondern auch von Dienstleistern im Umfeld der Produktion, jederzeit und mit geringer Latenz zur Verfügung gestellt werden. Diese horizontale Integration ist eine Kerneigenschaft von Industrie 4.0 (Kagermann et al. 2013).

#### *Handlungsfeld 2: Intralogistik*

Der Individualisierungstrend und die Reduktion der Losgrößen erfordern Konzepte und Lösungen, die eine Automatisierung logistischer Vorgänge innerhalb der Unternehmen ermöglichen. Der voll- oder teilautomatisierte Warentransport ist noch nicht flächendeckend realisiert.

#### *Handlungsfeld 3: Vertikale Integration*

Steigender Flexibilitätsbedarf erfordert ein Echtzeitbild der Produktion, welches kritische Zustände aufzeigt und ein schnelles Eingreifen in das Produktionssystem erlaubt. Dafür sind einheitliche Daten- und Informationsflüsse sowie geeignete Erfassungs- und Auswertungssysteme notwendig.

#### *Handlungsfeld 4: CPS mit Big Data und Cloud-Technologien*

Der Informationsbedarf, aber auch die -verfügbarkeit in den verschiedenen Unternehmensbereichen wächst. Cyber-physische Systeme (CPS), in denen die physischen Komponenten eng mit der digitalen Repräsentation verknüpft werden, sind in der Lage jederzeit ein Echtzeitbild ihres Zustands zu liefern. Die daraus resultierenden Datenmengen benötigen entsprechende Auswertungs- und Datenhaltungskonzepte, wie beispielsweise Big Data oder Cloud-Technologien.

#### *Handlungsfeld 5: Durchgängiges Engineering*

Heterogene Daten und Medienbrüche entlang der gesamten Wertschöpfungskette sind ein großes Hemmnis für Kleinserienfertigung und Produktindividualisierung. Die Ergänzung bestehender Prozesse und Produkte durch virtuelle Repräsentationen ist zentrale unabdingbare Voraussetzung für die horizontale und vertikale Integration und ermöglicht auch die Simulation von Produkten und Prozessen.

#### *Handlungsfeld 6: Materialforschung und Textil als CPS*

Innovative Entwicklungen in der Materialforschung und bei Produktionsverfahren erlauben die Gestaltung von Textilien als Teil von CPS. Beispielsweise kann durch leitfähige Tinten ein Textil mit Sensorik und Kommunikationsmöglichkeiten versehen werden. Dies ermöglicht den direkten Austausch von Informationen zwischen Produkt und Maschine oder auch Feedback aus der Nutzungs- und Entsorgungsphase des Produktes.

#### *Handlungsfeld 7: Verfahrenstechnik der Zukunft*

Für die Unternehmen der Textil- und Bekleidungsindustrie sind die übergeordneten strategischen Ziele der Ressourcenproduktivität und Ressourceneffizienz weiterhin wichtig. Mit durchgängiger Digitalisierung und Vernetzung können Produktionsprozesse situationsbezogen und über das gesamte Wertschöpfungsnetzwerk optimiert werden.

#### *Handlungsfeld 8: Leuchtturmprojekte und Wertschöpfungspotenziale durch neue Dienstleistungen*

Durch Industrie 4.0 wird es auch Änderungen an den Geschäftsmodellen der Unternehmen geben. Leuchtturmprojekte und die Kommunikation von Best-Practice-Lösungen können helfen, die Entwicklung von Industrie-4.0-Geschäftsmodellen, insbesondere bei der kundenindividuellen Fertigung, voranzutreiben.

### *Handlungsfeld 9: Demografiesensible Arbeitsplatzgestaltung*

Das interaktive Zusammenspiel zwischen Mensch und technischen Systemen erfordert bei Industrie 4.0 neue Regeln. Die neuen System- und Prozesslandschaften sollen sich, in den zunehmend heterogenen Beleg-schaften, dynamisch an die Bedürfnisse der Menschen anpassen. Langfristig wird sich die Rolle des Menschen in der Produktion wandeln. In den künftigen Smart Factories (Lasi et al. 2014) ist diese Rolle eher die eines Fertigungsmanagers als die eines Maschinenbedieners.

### *Handlungsfeld 10: Integriertes Forschungs- und Anwendungszentrum*

Um den Wissenstransfer zwischen Forschung und KMU in sämtlichen Handlungsfeldern zu forcieren wird abschließend die Einrichtung eines integrierten Forschungs- und Anwendungszentrums empfohlen. Dort sollen der aktuelle Wissenstand vermittelt sowie richtungsweisende Projekte initiiert werden. Dies ist - für die Bereiche Bekleidung, Smart Textiles und textiler Leichtbau - auch Fokus des in Kapitel 4 näher beschriebenen Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum *Textil vernetzt*.

## 3. Potenziale und Herausforderungen von Industrie 4.0 für die Textil- und Bekleidungsindustrie

### 3.1. Potenziale

Industrie 4.0-Ansätze ermöglichen, auch für KMU der Textil- und Bekleidungsindustrie, Potenziale für Umsatzsteigerungen, neue Wettbewerbsvorteile, die Erschließung neuer Formen der Wertschöpfung sowie innovative Geschäftsmodelle.

Die Potenziale von Industrie 4.0 lassen sich den folgenden vier Kategorien zuordnen:

- Verbesserung interner Abläufe
- Verbesserung organisatorischer Rahmenbedingungen
- neue Produkte und Dienstleistungen
- neue Geschäftsmodelle.

Nachfolgend werden jeweils zwei Beispiele für jede der vier Kategorien erläutert.

### *Verbesserung interner Abläufe*

Ein Potenzial von Industrie 4.0 ist die verbesserte Informations- und Wissensbereitstellung im und zwischen Unternehmen. Durch die Vernetzung verschiedener Informations- und Wissensquellen kann die Wissensbereitstellung in allen Prozessen verbessert und können Medienbrüche vermieden werden. Unterschiedliches Wissen kann dabei bedarfsgerecht in den Prozessen genutzt werden. Insbesondere für Unternehmen der Textil- und Bekleidungsindustrie, mit ihren wissensintensiven Entwicklungs- und Produktionsprozessen und den breit gefächerten Anwendungsfeldern ihrer Produkte, ist die verbesserte Wissensbereitstellung von Bedeutung. Beispielsweise werden für die Produktion eines einzelnen Garns mehr als 100 Prozess- und Produktparameter aus den unterschiedlichsten Unternehmensbereichen benötigt. Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts TexWIN wurde das Erfahrungswissen der Beschäftigten unter anderem in einer Weberei mit verschiedenen Informationsquellen im Unternehmen verknüpft (Weiß et al. 2018). Damit konnte sowohl die Produktanlaufphase deutlich reduziert, als auch eine stabilere Produktion mit höherer Produktqualität ermöglicht werden.

Auch ergeben sich Verbesserungen interner Abläufe durch neue Maschinentypen und Produktionsverfahren sowie konsequente Digitalisierung (Artschwager/Tilebein 2017). Klein- und Kleinstserienfertigung wird durch neue Maschinen und Verfahren, die auf diesen Anwendungsfall hin optimiert wurden, unterstützt. Beispielsweise ist es inzwischen möglich bei einer Spinnanlage mit über 1000 Spinnstellen jede einzelne davon individuell anzusteuern. Damit können unterschiedliche Produkte gleichzeitig auf dieser Maschine hergestellt werden. Ein Beispiel aus dem Bereich der Verfahren ist der digitale Textildruck. Voraussetzung für die Erschließung von Verbesserungspotenzial ist dabei stets eine entsprechend effiziente horizontale und vertikale Integration sowie eine konsequente Digitalisierung.

### *Verbesserung organisatorischer Rahmenbedingungen*

Durch Industrie 4.0 können auch die organisatorischen Rahmenbedingungen in Unternehmen der Textil- und Bekleidungsindustrie verbessert werden. Aufgrund der demographischen Entwicklung und der Notwendigkeit der Beschäftigten immer länger zu arbeiten, ist eine altersgerechte Arbeitsplatzgestaltung essentiell (Löhner et al. 2018). Insbesondere die Automatisierung kann dabei unterstützen, Beschäftigte von körperlich anstrengender Arbeit durch beispielsweise den Einsatz von Robotern oder automatischen Transportsystemen zu entlasten. Beispielsweise müssen in der Weberei schwere Kettbäume (bis zu 3000 kg)

zwischen Zettelmaschine, Schärmaschine, Weberei und Lager hin und her transportiert werden. Trotz entsprechender technischer Hilfsmittel ist das Be- und Entladen von den Kettbaum-Niederhubwagen kräftezehrend. Diese körperliche Anstrengung könnte in Zukunft durch ein vollautomatisches Transport- und Ladesystem übernommen werden.

Neben der körperlichen Entlastung können Beschäftigte durch den Einsatz von Assistenzsystemen unterstützt werden. Sie helfen bei der Beschaffung von Informationen und der Durchführung komplexer sowie selten durchgeführter Tätigkeiten durch die Bereitstellung von Schritt für Schritt Anleitungen. Beispielsweise kann ein Assistenzsystem den Beschäftigten in der Weberei bei der Behebung eines Schussfadenbruchs an der Webmaschine mit Hilfe einer Augmented-Reality-Anwendung kontextspezifische Anweisungen, wie die Einführung des Schussfadens am Vorspulgerät, einblenden (Löhner et al. 2018).

Der digitale Wandel in der Technologie und den Produktionsverfahren hat auch Auswirkungen auf die Anforderungsprofile der Beschäftigten und deren Erst- und Weiterqualifizierung. Die Digitalisierung und neue Präsentationstechnologien wie Smartphones, Tablets, aber auch Augmented- und Virtual-Reality-Brillen ermöglichen ganz neue Formen der Wissensvermittlung auch in KMU. Im europäischen Forschungsprojekt "Technology Enhanced Learning Livinglab for Manufacturing Environments" (Isaksson et al. 2015) wurden zwei unterschiedliche Qualifizierungsansätze untersucht. Ein Ansatz nutzte die Methode des "Precision Teaching" um digitale Inhalte direkt am Arbeitsplatz zu vermitteln. Zum Beispiel wurden so in der Warenschau von Geweben die kundenspezifischen Markierungsregeln für die unterschiedlichen Fehlerarten im laufenden Betrieb vermittelt. Der zweite Ansatz nutzte Augmented Reality um mit einem Assistenzsystem Beschäftigte bei Wartungsarbeiten in der Weberei zu unterstützen und gleichzeitig Wissen zu vermitteln (Martin et al. 2015).

Ebenso müssen bestehende Bildungsangebote um entsprechende Inhalten zum Thema Digitalisierung erweitert werden. Die virtuelle Bildungsplattform ViBiNet der deutschen Textil- und Bekleidungsindustrie wurde beispielsweise im Rahmen des Forschungsprojektes Learn Textile! (Winkler et al. 2015) um Themen zur Digitalisierung und zu neuen faserbasierten Materialien erweitert um die Aus- und Weiterbildung an den Stand der Technik und die Bedürfnisse der Unternehmen anzupassen.

### *Neue Produkte und Dienstleistungen*

Durch die Digitalisierung sowie die Ausgestaltung von Produkten als Bestandteil cyber-physischer Systeme können diese ihren Zustand sowie Informationen über ihre Umwelt erfassen. Diese Daten können einerseits an den Hersteller zur Produktverbesserung zurückgemeldet werden, andererseits können die Daten auch genutzt werden um zusätzliche Services bereitzustellen. Damit kann das ganze Spektrum vom Produkt über ergänzende Services bis hin zu Produkt-Service-Kombinationen, sogenannten hybriden Produkten, abgedeckt werden. Ansätze hierfür wurden in dem europäischen Forschungsprojekt "Towards a new Manufacturing Service Ecosystem" (Wiesner et al. 2014) systematisch erforscht. Beispielsweise kann ein Laufshirt mit Sensorik ausgestattet und so die Vitalparameter während des Laufens erfasst werden. Diese Daten können anschließend durch einen Service ausgewertet und darauf aufbauend individuelle Gesundheits- oder Trainingsratschläge kommuniziert werden.

Der allgemeine Trend zur Individualisierung von Produkten spielt eine immer wichtigere Rolle für Unternehmen (Heß 2008). Dies gilt gleichermaßen für Unternehmen der Textil- und Bekleidungsindustrie, auch außerhalb des modischen Bereichs. Produkte müssen sowohl optisch als auch funktional möglichst genau an die individuellen Bedürfnisse der Kunden angepasst sein. Die Digitalisierung in Kombination mit neuen Produktionstechnologien, wie beispielsweise dem digitalen Textildruck oder 3D-Stricken, unterstützt sowohl die Erfassung als auch die Umsetzung von individuellen Anforderungen.

Sogenannte Microfactories bieten hierbei gute Ausgangsbedingungen um auf individuelle Kundenanforderungen reagieren zu können. Aufgrund ihrer günstigen Kostenstrukturen können sie individuelle Produkte einem breiteren Kundenspektrum zur Verfügung stellen. Für die Textil- und Bekleidungsindustrie steht mit der "Digital Textile Micro Factory" eine erste integrierte, digitale Produktionskette rund um digitalen Textildruck für Kleinserien- bzw. Einzelfertigung zur Verfügung (Kaiser 2017).

### *Neue Geschäftsmodelle*

Der digitale Wandel begünstigt die Entstehung innovativer Geschäftsmodelle bei allen Akteuren im textilen Wertschöpfungs-system. Viele davon sind datenbasiert. Beispielsweise kann die aus Industrie 4.0 resultierende Transparenz als charakterisierende Eigenschaft für Geschäftsmodelle genutzt werden, die auf Nachhaltigkeit angelegt sind (Schuh et

al. 2017). Dem Kunden können detailliert Informationen über die Herkunft und Produktion der Ware vermittelt und damit auch gleichzeitig die Nachhaltigkeit glaubhaft kommuniziert werden. So kann zum Beispiel ein Bekleidungsstück mit einem Identifikationsmerkmal wie einem RFID-Chip oder mit einer unsichtbaren Tinte versehen werden. Mit diesem Identifikationsmerkmal kann der Kunde dann den Entstehungsprozess, aber auch die Echtheit seines Produktes nachvollziehen.

Im Business-to-Business-Bereich ergeben sich aus verbesserten Informationen über das Endkundenverhalten und den Einsatz der eigenen Produkte beim Business-Kunden ebenfalls Möglichkeiten der Erschließung neuer Dimensionen des Kundennutzens (Tilebein 2017). Selbstorganisierende temporäre Netzwerke ersetzen beziehungsweise ergänzen etablierte Strukturen. Auch können über die Digitalisierung Kundenbeziehungen und Kommunikationskanäle individuell gestaltet werden. Beispielsweise können durch die Beobachtung der Kundenaktivitäten Rückschlüsse auf die modischen Präferenzen der Beobachteten gezogen und entsprechend angepasste Werbung angeboten werden. Plattformkonzepte und Netzwerkprodukte ermöglichen wie in anderen Bereichen völlig neue Industrie-4.0-Geschäftsmodelle auch für die Textil- und Bekleidungsindustrie.

### 3.2. Herausforderungen

Für die KMU der Textil- und Bekleidungsindustrie ist die Nutzung der Chancen, die sich durch den digitalen Wandel ergeben, alles andere als trivial. Sie sehen sich mit zahlreichen Herausforderungen konfrontiert, die mit der digitalen Transformation einhergehen. Dabei werden sie sowohl vor organisatorische Herausforderungen als auch vor technische Hemmnisse gestellt, die sie in einer aktiven Auseinandersetzung mit den Chancen und Risiken von Industrie 4.0 bremsen.

Viele KMU der Textil- und Bekleidungsindustrie erkennen die Potenziale für ihre eigene Organisation noch nicht, die sich durch die Digitalisierung ergeben könnten. Oftmals fehlt ihnen die Einordnung des eigenen Unternehmens in die Industrie-4.0-Landschaft, und sie können ihren Handlungsbedarf hin zu Industrie 4.0 und die schon jetzt nutzbaren Potenziale nicht richtig erfassen (Artschwager et al. 2017).

Dies wird durch die Situation erschwert, dass es bisher kaum Leuchtturmprojekte in der Textil- und Bekleidungsindustrie gibt, die als Inspiration für andere Unternehmen dienen könnten (Artschwager et al. 2017). Branchenspezifische Anwendungsbeispiele wie "Simulate, Print and Go!" (Artschwager 2015) können Unternehmen motivieren die Potenziale für ihre eigene Organisation intensiver zu eruieren.

Als weiteres Hemmnis werden oft die Kosten für den digitalen Wandel angeführt. Die Investitionskosten werden als sehr hoch angesehen und der daraus resultierende wirtschaftliche Nutzen als zu gering erachtet. In einer Studie über die Chancen und Herausforderungen von Industrie 4.0 haben 46% aller beteiligten Unternehmen angegeben, dass der wirtschaftliche Nutzen unklar sei bei gleichzeitig zu hohen Investitionskosten (Koch et al. 2014). In der Textil- und Bekleidungsindustrie dürfte die Skepsis ähnlich hoch ausfallen. Dies spiegelt sich auch in der Aussage "Industrie 4.0 ist für Standardartikel zu unwirtschaftlich!" (Artschwager et al. 2017) wieder.

Für viele Unternehmen der deutschen Textil- und Bekleidungsindustrie ist ihr explizites und implizites Produkt- und Prozesswissen ein wichtiges Kapital (z. B. ungewöhnliche Einstellungen an einer Legemaschine für Vliesstoffe um bestimmte Produkteffekte zu erreichen oder unübliches Material wie Carbonfasern zu verarbeiten). Es besteht die Befürchtung, dass mit der durchgängigen Digitalisierung ein großes Risiko für den unkontrollierten Wissensabfluss und damit für den Verlust dieses wichtigen Kapitals einhergeht. Zugleich werden Unternehmen mit einer ganzen Reihe an neuen legislativen Anforderungen konfrontiert, insbesondere wenn ihr Geschäftsmodell digitale Kommunikationskanäle vorsieht. Ein Beispiel dafür ist die neue Datenschutz-Grundverordnung (Die Bundesbeauftragte für den Datenschutz und die Informationsfreiheit 2017). Dieses komplexe Regelwerk erschwert vielen KMU rechtskonforme Strukturen und Regeln in ihren Unternehmen festzulegen. Datenschutz und Datensicherheit bilden für KMU der Textil- und Bekleidungsindustrie damit eine weitere Herausforderung bei der Umsetzung von Industrie 4.0.

Die Integration von Digitalisierungsansätzen in die bestehende Prozesslandschaft der KMU ist eine zusätzliche Herausforderung bei der Einführung von Industrie 4.0 in der Textil- und Bekleidungsindustrie. Etablierte Abläufe müssen an diese neuen digitalen Strukturen angepasst werden um das volle Potenzial ausschöpfen zu können. Beispielsweise kann durch die Digitalisierung der Kunde sehr viel früher in die Produktentwicklung eingebunden werden. Die Vorstellung der Kollektion kann sehr früh im Entwicklungsprozess mit Hilfe von virtuellen Mustern erfolgen und damit die Rückmeldungen der Kunden noch in die Entwicklung einfließen. Dies reduziert die Entwicklungszeiten und gleichzeitig wird die Erwartungshaltung des Kunden besser berücksichtigt. Dazu müssen die Entwicklungsprozesse entsprechend umstrukturiert werden, das heißt Aktivitäten aus späteren Phasen der Produktentwicklung müssen vorgezogen werden.

Die Verankerung der neuen Abläufe bei den Beschäftigten, aber auch bei der Führung ist ein wichtiger Erfolgsfaktor für den digitalen Wandel im Unternehmen (Dombrowski/Wagner 2014). Häufig werden Digitalisierung und Automatisierung von den Beschäftigten nur als erster Schritt hin zu Rationalisierungsmaßnahmen interpretiert. Entsprechend groß ist der Widerstand dagegen. Dem kann durch Bereitstellung von Informationen und durch Schulung der Beschäftigten entgegengewirkt werden. Bisher ist das Verständnis für Industrie 4.0 bei KMU eher gering ausgeprägt. Dies zeigt sich auch in der Industrie-4.0-Readiness-Studie der IMPULS-Stiftung (Lichtblau et al. 2015). Das Verständnis, aber auch die Qualifizierung der Beschäftigten für Industrie 4.0 zeigen sich hier sehr gering ausgeprägt. Die Beschäftigten in KMU stuften sich im Schnitt als Anfänger ein. Diese Umfrage aus dem allgemeinen Anlagen- und Maschinenbau zeigt einen deutlichen Informations- und Qualifizierungsbedarf der Beschäftigten.

Neben den organisatorischen Hemmnissen gibt es auch technische Hindernisse bei der Umsetzung der Digitalisierung. Die KMU der Textil- und Bekleidungsindustrie sind geprägt durch inhomogene System- und Produktionslandschaften. Teilweise werden dort aktuellste Produktionsanlagen neben 40 Jahre alten Maschinen eingesetzt. Durch Retrofit-Ansätze können auch diese alten Maschinen in die Lage versetzt werden notwendige Prozessparameter zu erfassen. Zum Beispiel können an einer älteren Stickmaschine Luftfeuchte- und Vibrationssensoren angebracht werden um mit diesen zusätzlichen Informationen den Stickprozess zu optimieren. Dadurch sind die Digitalisierungspotenziale und der notwendige Aufwand für deren unternehmensweite Nutzung sehr unterschiedlich. Auch die Anwendungssysteme sind stark heterogen. Einzelne Abteilungen in den KMU haben für ihre spezifischen Fragestellungen oftmals eigene Anwendungen entwickelt. Entsprechend schwierig gestalten sich der abteilungsübergreifende Austausch von Informationen und damit der digitale Wandel. Aufgrund dieser individuellen Ausgangssituationen kann kein generischer Ansatz für die Digitalisierung herangezogen werden. Es bedarf individueller Lösungsansätze zur Etablierung von Industrie 4.0 in den KMU der Textil- und Bekleidungsindustrie.

Erschwert wird die Umsetzung zudem in vielen Bereichen durch das Fehlen von Standards für den Austausch von Informationen. Proprietäre Schnittstellen und Eigenentwicklungen dominieren die Systemlandschaft in der Textil- und Bekleidungsindustrie. Die Systemintegration wird dadurch sehr komplex, da für jede Kommunikation individuelle Lösungen entwickelt werden müssen. Zudem kommen oft nicht gepflegte Systeme zum Einsatz, deren Hersteller nicht mehr existieren. Bei

diesen Anwendungen ist es entsprechend aufwendig Schnittstellen zu realisieren.

Neben Standards fehlen häufig ebenfalls die virtuellen Repräsentationen der Produkte und Prozesse. Momentan ist es beispielsweise noch nicht möglich, die Haptik eines textilen Stoffes digital so zu beschreiben, dass es den Anforderungen in den Entwicklungs- und Produktionsprozessen genügt. Daher müssen an vielen Stellen erst noch entsprechende virtuelle Repräsentationen entwickelt werden, wie es beispielsweise in dem AiF-Projekt "Virtualisierung im Innovationsprozess" für Möbelbezugsstoffe der Fall ist (AiF 2016). Die Virtualisierung von Produkten und Prozessen und die anschließende Vernetzung der resultierenden Modelle sind die Grundvoraussetzungen von Industrie 4.0 (Brecher et al. 2014). Ohne die Virtualisierung ist die Durchgängigkeit des digitalen Engineerings nicht umsetzbar.

Zusammengefasst stehen KMU der deutschen Textil- und Bekleidungsindustrie vor den nachfolgenden organisatorischen und technischen Herausforderungen:

- fehlende Kenntnisse über Potenziale für das eigene Unternehmen
- kaum Leuchtturmprojekte als Branchenvorbilder
- hohe Kosten für die Digitalisierung bei gleichzeitig eingeschränkten finanziellen Mitteln
- Datensicherheit und Datenschutz
- fehlende Information und Qualifikation bei den Beschäftigten
- inhomogene System- und Produktionslandschaften
- fehlende Standards
- fehlende digitale Modelle.

Der Vielzahl an Herausforderungen steht bei vielen KMU der Textil- und Bekleidungsindustrie eine geringe Industrie-4.0-Readiness gegenüber.

#### 4. KMU-spezifische Ansätze

Die Herausforderungen, vor denen KMU der Textil- und Bekleidungsindustrie stehen, zeigen auf, dass es noch erhebliche Informationsdefizite

bei den Unternehmen gibt. Ebenso fehlt es an inspirierenden Branchenbeispielen und entsprechender Qualifikation der Beschäftigten. Aufgrund der großen Diversität von Textil- und Bekleidungsunternehmen in ihren Strukturen und Produkten können nur sehr eingeschränkt allgemeingültige Umsetzungsempfehlungen gegeben werden. Die Komplexität von Industrie 4.0 erfordert Unterstützung bei der Konzipierung und der Umsetzung von unternehmensspezifischen Lösungen (Gansch et al. 2013).

Um diesen Bedarf bei den Unternehmen abzudecken, gibt es ein KMU-spezifisches Konzept, welches aus den aufeinander aufbauenden Schritten Informieren, Demonstrieren, Qualifizieren, Konzipieren und Umsetzen besteht (Heine 2018). Abbildung 1 zeigt das Konzept, welches Unternehmen den Weg hin zu Industrie 4.0 erleichtern soll.

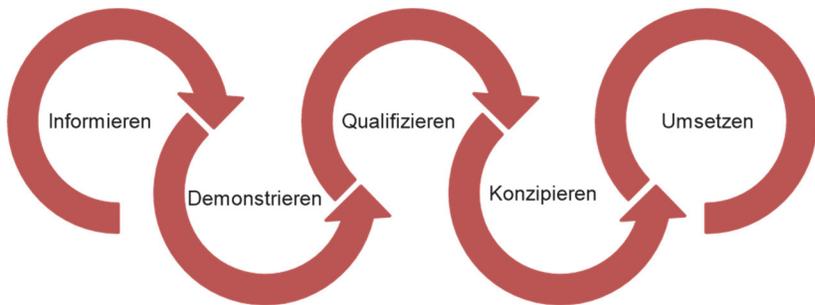


Abbildung 1: Konzept zur Erhöhung der Industrie-4.0-Readiness in Unternehmen der Textil- und Bekleidungsindustrie (Kompetenzzentrum Textil vernetzt 2018)

Im Rahmen der Förderinitiative "Mittelstand 4.0 - Digitale Produktions- und Arbeitsprozesse" des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) wird im Projekt "Mittelstand 4.0 - Kompetenzzentrum *Textil vernetzt*" dieses Konzept mit konkreten Maßnahmen hinterlegt.

Damit ist es eines von bisher 24 Kompetenzzentren, die deutschlandweit vorwiegend dem Mittelstand, aber auch Handwerksbetrieben mit individuellen Angeboten rund um die Themenbereiche Digitalisierung, Vernetzung und Einführung von Industrie-4.0-Anwendungen unterstützend zur Verfügung stehen. Das Kompetenzzentrum *Textil vernetzt* versteht sich dabei als richtungweisender Ansprechpartner für KMU der Textil- und Bekleidungsindustrie, des Textilmaschinenbaus und angrenzender Branchen.

Das Konsortium besteht aus dem leitenden Gesamtverband textil+mode und den Partnern Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf (DITF), Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University (ITA), Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (STFI) sowie dem Querschnittstechnologiepartner Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V. Anhand textilbasierter Werkstoffe, vernetzter Produktionsprozesse sowie smarter Sensortechnik vermitteln diese Partner die Potenziale der Digitalisierung an KMU der Textil- und Bekleidungsindustrie und veranschaulichen den Weg dorthin. Die fünf aufeinander aufbauenden Schritte Informieren, Demonstrieren, Qualifizieren, Konzipieren und Umsetzen sowie die zugehörigen Maßnahmen werden nachfolgend kurz vorgestellt.

Der erste Schritt *Informieren* soll den Unternehmen und den Beschäftigten die Potenziale von Industrie 4.0 aufzeigen. Der Fokus liegt dabei auf einer zielgruppenorientierten Wissensvermittlung und dem Transfer aktueller Entwicklungsstände im Bereich Digitalisierung. Dazu muss sowohl über technische als auch über organisatorische Aspekte von Industrie 4.0 aufgeklärt und ein Verständnis für Industrie 4.0 und Digitalisierung geschaffen werden. Ziel ist es, sowohl die Beschäftigten als auch die Geschäftsleitungen für Industrie-4.0-Themen zu sensibilisieren.

Dabei wird eine große Bandbreite an Maßnahmen eingesetzt, um die unterschiedlichen unternehmensspezifischen Wissensstände hinsichtlich Industrie 4.0 zu berücksichtigen. Die Veranstaltungsformate richten sich dabei sowohl an Einsteiger und Nutzer als auch an Spezialisten. Um möglichst viele KMU zu erreichen wird ein breites Spektrum an Informationskanälen und Medien genutzt. Zu den Veranstaltungsformaten zählen Labtouren (z. B. Lernfabrik 4.0 - Digitale Anwendungen in der Praxis erleben), virtuelle Labtouren (z. B. In Zukunft Arbeiten - Ein Blick in die digitale Arbeit von morgen), Fachtagungen (z. B. Textil goes digital: Digitalisierung in der Praxis), Industriedialoge (z. B. Arbeitskreis Digitalisierung), Messen (z. B. Techtexil 2019, 100 Stunden Morgen: Themenwoche zur digitalen Zukunft und Innovation im Mittelstand), Roadshows und Webinare (z. B. Textil trifft auf Elektro).

Durch das *Demonstrieren* von existierenden Industrie-4.0-Lösungen aus der Textil- und Bekleidungsindustrie sollen im zweiten Schritt Unternehmen inspiriert werden über mögliche Anwendungsbereiche von Industrie 4.0 in ihren eigenen Organisationen nachzudenken und eigene Anwendungsbereiche zu identifizieren.

Als zentrale Maßnahme zum Demonstrieren wurde die Labtour festgelegt. Hierbei werden bei den einzelnen Projektpartnern lauffähige Industrie-4.0-Lösungen (Demonstratoren) bereitgestellt um direkt die Verfahren und Anwendungsmöglichkeiten für die Branche, aber auch einzelne Unternehmen aufzuzeigen. Beispielsweise kann man sich an den DITF über "Simulate, Print and Cut" (Kaiser et al. 2017) informieren, welches ein durchgängiges digitales Engineering vom 3D-Design über digitalen Textildruck bis hin zum fertigen Produkt realisiert (siehe auch Abbildung 2). Da die Demonstrationsumgebungen komplette Produktionsanlagen umfassen, sind die Labtours erst einmal an den Produktionsstandort des jeweiligen Konsortial- oder Umsetzungspartners gebunden. Damit die Ortsgebundenheit nicht als Hemmnis bei der Ansprache geographisch weiter entfernter KMU wirkt, werden zusätzliche virtuelle Labtours angeboten. Die Unternehmen haben in diesem Rahmen die Möglichkeit, einen visuellen Eindruck von Verfahren und Anwendungsmöglichkeiten digitalisierter Umsetzungsprojekte zu erhalten, ohne vor Ort sein zu müssen. Dadurch soll der Transfer von abstrakten Potenzialen zu konkretem Nutzen erleichtert werden.

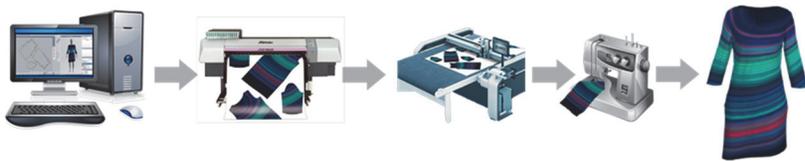


Abbildung 2: Demonstrierte Prozesskette "Simulate, Print and Cut"

Bevor die Ideen für eine Anwendung von Industrie 4.0 umgesetzt werden können, müssen den Beschäftigten grundlegende, aber auch weiterführende Lösungskonzepte zu Industrie 4.0 und Digitalisierung vermittelt werden. Damit werden sie für die Umsetzung von individuellen Industrie-4.0-Lösungen im eigenen Unternehmen qualifiziert. Dieses *Qualifizieren* stärkt gleichzeitig noch die Verankerung von Industrie 4.0 in der eigenen Organisation.

Hierfür werden Workshops angeboten, die unterschiedliche Themen der Digitalisierung aufgreifen und verschiedene Ausgangsqualifikationen berücksichtigen. Beispielsweise wird in einem Workshop das Thema "Retrofit für Textilmaschinen" behandelt. Dort werden Aspekte von der Sensorauswahl bis hin zur Einbindung in die Softwarelandschaft von Unternehmen vorgestellt und diskutiert.

Aufgrund der Komplexität der Thematik genügt in vielen Fällen die Qualifizierung der Beschäftigten nicht, um eine erfolgreiche Umsetzung zu gewährleisten. Expertinnen und Experten sollen daher beim *Konzipieren* eigener individueller Lösungen für einzelne Unternehmen unterstützen um die Grundlagen für eine erfolgreiche Umsetzung zu legen. Sie unterstützen die Unternehmen bei der Analyse ihrer technischen, organisatorischen und wirtschaftlichen Potenziale. Daraus können dann individuelle Handlungsfelder bis hin zu spezifischen Projektplänen abgeleitet werden. Die konkrete Form der Unterstützung wird dabei individuell mit den Textil- und Bekleidungsunternehmen abgesprochen.

Auch das *Umsetzen* erfordert eine fachliche Begleitung mit Expertise. Unternehmen sollen bei der Umsetzung einer konzeptionell ausgearbeiteten Lösung jederzeit bei auftretenden Problemen auf externen Rat zugreifen können.

Hierfür sind einerseits Praxisworkshops vorgesehen, in denen sich die Beschäftigten der Unternehmen intensiv und praxisnah mit aktuellen und relevanten Technologien, wie automatisierte textile Prozessketten, RFID in der Textilindustrie oder auch Augmented und Virtual Reality, beschäftigen und so praktische Erfahrungen damit sammeln können. Andererseits gibt es direkte Unterstützung bei individuellen Projekten der KMU. Dabei können Unternehmen bei der Identifikation geeigneter Lösungsansätze, aber auch mit konkreten Digitalisierungsideen unterstützt werden. Diese konkreten Umsetzungen können dann wieder als Branchenleuchttürme für die Textil- und Bekleidungsindustrie dienen.

Das beschriebene fünfstufige Konzept mit den dazugehörigen Maßnahmen hat die Intention Unternehmen sukzessive zu befähigen Industrie 4.0-Potenziale im eigenen Unternehmen zu erkennen und diese auch zu realisieren. Damit sollen die Potenziale, die sich durch den digitalen Wandel ergeben, besser durch KMU nutzbar werden und eine aktiver Wissenstransfer zwischen Forschung und Industrie forciert werden.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag zeigt die Besonderheiten von KMU der deutschen Textil- und Bekleidungsindustrie im Kontext von Industrie 4.0 auf und beschreibt die damit einhergehenden Handlungsfelder, Potenziale und Herausforderungen. Daraus ergibt sich ein substantieller Unterstützungsbedarf der Unternehmen beim digitalen Wandel.

Das vorgestellte fünfstufige KMU-spezifische Konzept, welches Unternehmen den Zugang zu Industrie 4.0 erleichtern soll, adressiert diesen

Unterstützungsbedarf. Es umfasst die Stufen Informieren, Demonstrieren, Qualifizieren, Konzipieren und Umsetzen. Im Projekt "Mittelstand 4.0 - Kompetenzzentrum *Textil vernetzt*" wird dieses Konzept mit konkreten Maßnahmen und Demonstratoren für KMU der Textil- und Bekleidungsindustrie in Deutschland hinterlegt.

Der durch das "Mittelstand 4.0 - Kompetenzzentrum *Textil vernetzt*" initiierte Transfer von Industrie-4.0-Lösungen in die KMU der Textil- und Bekleidungsindustrie wird kontinuierlich weiter ausgebaut. So werden bspw. an den DITF die bestehenden Lösungen um weitere Ansätze, wie z. B. Augmented Reality in der Produktion, aus den Industrie-4.0-Themenfeldern horizontale Integration, vertikale Integration, durchgängiges digitales Engineering, demografiesensible Arbeitsplatzgestaltung sowie CPS-Systeme ergänzt.

Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass die KMU-gerechte Aufbereitung von Best-Practice-Lösungen, die Präsenz von Leuchtturmprojekten sowie die niederschwellige Bereitstellung von Informationen, Beratungsangeboten und Qualifikationsmaßnahmen für den gelingenden digitalen Wandel der KMU hin zu Industrie 4.0 essentiell sind.

## Literatur

- AiF (2016). Virtualisierung im Innovationsprozess für designbasierte Konsumgüter aus formflexiblen Materialien. Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. Online verfügbar unter [https://www.aif.de/innovationskraft/innovationsfoerderung/industrielle-gemeinschaftsforschung/projekt\\_pdf.php?id=20277](https://www.aif.de/innovationskraft/innovationsfoerderung/industrielle-gemeinschaftsforschung/projekt_pdf.php?id=20277), zuletzt geprüft am 12.06.2018.
- Allianz Faserbasierte Werkstoffe Baden-Württemberg (2018). Index-Buch textiles Bauen. Umdenken. Neu denken. Textil denken. Köln: Kölner Universitätsverlag.
- Artschwager, A. (2015). Simulate, Print and Go! Virtuelle Bekleidungssimulation in 3D: von Entwurf bis Musterproduktion. Plattform Industrie 4.0. Online verfügbar unter <https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Anwendungsbeispiele/108-simulate-print-and-go/beitrag-simulate-print-and-go.html>, zuletzt geprüft am 12.06.2018.
- Artschwager, A., Tilebein, M. (2017). Die Zukunft der textilen Produktion am Beispiel von Microfactories. *melliand Textilberichte*, Vol. 3, S. 113.
- Artschwager, A., Tilebein, M., Rieder, O., Armbruster, P., Gresser, G. (2017). Textil digital. Die Zukunft der textilen Produktion am Beispiel des Strick-Clusters Baden-Württemberg. Studie Strick 4.0. Hg. v. Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf und Südwesttextil e. V. Denkendorf. Online verfügbar unter

- <https://www.ditf.de/files/inhalt/startseite/Studie-Strick40.pdf>, zuletzt geprüft am 08.05.2018.
- Brecher, C., Behnen, D., Brumm, M., Carl, C., Ecker, C., Herfs, W. (2014). Virtualisierung und Vernetzung in Produktionssystemen. In C. Brecher, F. Klocke, R. Schmitt und G. Schuh (Hrsg.): *Integrative Produktion. Industrie 4.0-Aachener Perspektiven*. Herzogenrath: Shaker, S. 35–68.
- Die Bundesbeauftragte für den Datenschutz und die Informationsfreiheit (Hrsg.) (2017). *Datenschutz-Grundverordnung. Jetzt mit dem neuen BDSG. BfDI - Info 6*. Online verfügbar unter [https://www.bfdi.bund.de/SharedDocs/Publikationen/Infobroschueren/INFO6.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=52](https://www.bfdi.bund.de/SharedDocs/Publikationen/Infobroschueren/INFO6.pdf?__blob=publicationFile&v=52), zuletzt geprüft am 09.05.2018.
- Dombrowski, U., Wagner, T. (2014). Arbeitsbedingungen im Wandel der Industrie 4.0. Mitarbeiterpartizipation als Erfolgsfaktor zur Akzeptanzbildung und Kompetenzentwicklung. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Vol. 5, S. 351–355.
- Ganschar, O., Gerlach, S., Hämmerle, M., Krause, T., Schlund, S. (2013). *Produktionsarbeit der Zukunft. Industrie 4.0*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Gesamtverband der deutschen Textil- und Modeindustrie e. V. (Hg.) (2017a). 2017 Die deutsche Textil- und Modeindustrie in Zahlen. Online verfügbar unter [http://www.verband-textil-bekleidung.de/fileadmin/Daten/Rundschreiben-Wirtschaft/RS-2017-Wirtschaftspolitik/zahlen2017\\_web.pdf](http://www.verband-textil-bekleidung.de/fileadmin/Daten/Rundschreiben-Wirtschaft/RS-2017-Wirtschaftspolitik/zahlen2017_web.pdf), zuletzt geprüft am 08.05.2018.
- Gesamtverband der deutschen Textil- und Modeindustrie e. V. (Hg.) (2017b). Die Zukunft ist Textil. Die deutsche Textil- und Modeindustrie stellt sich vor. Online verfügbar unter [http://www.textil-mode.de//fileadmin/textil/Website/3\\_Presse/3.3\\_Publikationen/2017-03-13\\_Imagebroschüre\\_dt\\_web.pdf](http://www.textil-mode.de//fileadmin/textil/Website/3_Presse/3.3_Publikationen/2017-03-13_Imagebroschüre_dt_web.pdf), zuletzt geprüft am 18.05.2018.
- Heine, U. (2018). Der textile Mittelstand wird digital. *TEXTILplus*, Vol. 3/4, S. 6–9.
- Heß, W. (2008). Ein Blick in die Zukunft. acht Megatrends, die Wirtschaft und Gesellschaft verändern. Hrsg. v. Allianz Dresdner Economic Research (Working Paper, 103).
- Isaksson, E., Lefrere, P., Naeve, A., Sesana, M., Wild, F. (2015). TELL ME Learning and Creativity Methodology. *The TELL ME Book*, S. 8–54.
- Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., Wahlster, W. (2013). Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. *Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern; Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0: Forschungsunion*.
- Kaiser, C. (2017). Industry 4.0: Digital Textile Micro Factory at Texprocess. Fully networked on-demand production presented live. *International Journals for the Sewing Industry*, Vol. 5, S. 28–29.
- Kaiser, C., Artschwager, A., von Wascinski, L., Moltenbrey, F. (2017). Microfactory 4 Fashion. Virtuelle Bekleidungssimulation in 3D von Entwurf bis Produktion: Ein Meilenstein für die Modeindustrie auf dem Weg zu Industrie 4.0. *Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf*. Online verfügbar unter

- [https://www.ditf.de/files/inhalt/infoboxen/Microfactory/DITF-Microfactory\\_Infosheet\\_DE.pdf](https://www.ditf.de/files/inhalt/infoboxen/Microfactory/DITF-Microfactory_Infosheet_DE.pdf), zuletzt geprüft am 14.06.2018.
- Koch, V., Kuge, S., Geissbauer, R., Schrauf, S. (2014). Industrie 4.0. Chancen und Herausforderungen der vierten industriellen Revolution. PricewaterhouseCoopers. Online verfügbar unter <https://www.strategyand.pwc.com/media/file/Industrie-4-0.pdf>, zuletzt geprüft am 12.06.2018.
- Kompetenzzentrum Textil vernetzt (2018). Unser Angebot für Sie. Wir machen Sie fit für die Digitalisierung in der textilen Welt. Kompetenzzentrum Textil vernetzt. Online verfügbar unter [https://www.kompetenzzentrum-textil-vernetzt.digital/angebote.html?file=files/textil/Events/Downloads/Angebote\\_Textil%20vernetzt\\_A6.pdf](https://www.kompetenzzentrum-textil-vernetzt.digital/angebote.html?file=files/textil/Events/Downloads/Angebote_Textil%20vernetzt_A6.pdf), zuletzt geprüft am 14.06.2018.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., Hoffmann, M. (2014). Industrie 4.0. Wirtschaftsinformatik, Vol. 56 (4), S. 261–264.
- Lichtblau, K., Stich, V., Bertenrath, R., Blum, M., Bleider, M., Millack, A. et al. (2015): Industrie 4.0-Readiness. Aachen, Köln. Online verfügbar unter <http://www.impulsstiftung.de/documents/3581372/4875835/Industrie+4.0+Readiness+IMPULS+Studie+Oktober+2015.pdf>, zuletzt geprüft am 22.05.2018.
- Löhner, M., Lemm, J., Kerpen, D., Saggiomo, M., Gloy, Y.-S. (2018) Soziotechnische Assistenzsysteme für die Produktionsarbeit in der Textilbranche. In: Steffen Wischmann und Ernst Hartmann (Hrsg.): Zukunft der Arbeit. Eine praxisnahe Betrachtung. Berlin: Springer Vieweg, S. 73–86.
- Martin, J., Nunyez, M.-J., Sanguini, R., Weiß, M. (2015). TELL ME Pilots, Take-ups and Demonstrations. The TELL ME Book, S. 154–200.
- Schuh, G., Salmen, M., Jussen, P., Riesener, M., Zeller, V., Hensen, T. et al. (2017). Geschäftsmodell-Innovation. In: Günther Reinhart (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Carl Hanser Verlag, S. 3–30.
- Tilebein, M. (2017). New business models. IoTex - Digitalising the Textile Value Chain, Vol. 1, S. 38–39.
- Uppenkamp, M. (2017). Textilindustrie 2016/2017. Melliand, Vol. 1, S. 18.
- Weiß, M., Fischer, T., Tilebein, M. (2017). Wissensorientierte Nutzung von Informationen im Industrial Internet of Things. Fallbasiertes Schließen für die Textilproduktion. In: Norbert Gronau (Hrsg.): Industrial Internet of Things in der Arbeits- und Betriebsorganisation. Berlin: GITO mbH Verlag, S. 119–140.
- Weiß, M., Fischer, T., Tilebein, M. (2018). Wissensorientierte Nutzung von Produktionsdaten. Ein Beispiel aus der Textilindustrie. Industrie 4.0 Management, Vol. 3, S. 25–28.
- Wiesner, S., Guglielmina, C., Gusmeroli, S., Doumeingts, G. (2014). Manufacturing Service Ecosystem. Aachen: Verlagsgruppe Mainz GmbH Aachen.
- Winkler, M., Grau, G., Tilebein, M. (2015). Lebenslanges Lernen. Neue Ansätze für die Textilwirtschaft. In: Horst Meier (Hrsg.): Lehren und Lernen für die moderne Arbeitswelt. Berlin: GITO mbH Verlag, S. 15–38.



# Konzept zur Unterstützung der Digitalen Transformation von Kleinen und Mittelständischen Unternehmen

Stefan Leineweber, Thom Wienbruch, Bernd Kuhlenkötter

Lehrstuhl für Produktionssysteme, Ruhr-Universität Bochum

## 1. Einleitung

Die Begriffe „Digitalisierung“ und „Industrie 4.0“ sind schon länger fester Bestandteil der Forschungs- und Industrielandschaft, wobei sich deren Definition aufgrund der fortschreitenden technischen Entwicklung stetig verändert. Die Bedeutsamkeit dieser Themen und vor allem die daraus resultierende Notwendigkeit zur Weiterentwicklung, haben bereits viele kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) erkannt und erste Erfahrungen in diesem Bereich gemacht (Meißner et al. 2017; Bischoff et al. 2015). Eine Erkenntnis aus den bisherigen Erfahrungen ist jedoch, dass vor allem die Gestaltung des Transformationsprozesses zur Industrie 4.0 und die damit einhergehende Durchführung von Digitalisierungsprojekten für viele KMU noch eine große Herausforderung darstellt (Meißner et al. 2017; Bischoff et al. 2015). In diesem Kontext existiert bereits eine Vielzahl an Leitfäden, Handlungsempfehlungen und Reifegradmodellen, um KMU im Umfeld von Digitalisierung und Industrie 4.0 zu unterstützen. Diese Ansätze sind zumeist sehr generisch und auf die technischen Aspekte der Digitalisierung fokussiert. Organisations- und Personalthemen stehen weniger im Fokus, obwohl diese ebenfalls einen essentiellen Teil der Entwicklung auf dem Weg zu Industrie 4.0 ausmachen (Hirsch Kreinsen/Weyer 2014). Insgesamt kann festgestellt werden, dass keine Werkzeuge existieren, welche die Umsetzung von Digitalisierungsprojekten in KMU mit dem Hinweis auf konkrete Abhängigkeiten zu anderen, im Kontext der Digitalisierung wichtigen Aspekten, unterstützen. Auch die Bewertung des wirtschaftlichen Nutzens der angestrebten Ziele kommt in den bestehenden Ansätzen nicht zum Tragen.

Unternehmen benötigen daher ein Werkzeug, welches sie bei diesem anstehenden Transformationsprozess unterstützt. Dieses sollte von KMU

ohne externe Unterstützung eingesetzt werden können und zudem auf potenzielle Abhängigkeiten während der Ausrichtung und Durchführung des Transformations- bzw. Digitalisierungsprozesses hinweisen. Ein Ansatz hierfür soll durch das im Folgenden dargelegte Konzept eines Industrie 4.0 Reifegradmodells geschaffen werden.

## 2. Wissenschaftliche Basis

### 2.1. Industrie 4.0: Digitalisierung in der industriellen Arbeitswelt

Das Konzept Industrie 4.0 wurde von Kagermann im Jahr 2011 im Rahmen der Einführung der Hightech-Strategie der Deutschen Bundesregierung vorgestellt (Kagermann et al. 2011). Im Allgemeinen wird unter Industrie 4.0 die Verbindung von Produktions- und modernen Informations- und Kommunikationstechnologien verstanden. Die Vision ist es durch intelligente und digital integrierte Systeme eine selbstorganisierte Produktion zu realisieren (Bauernhansel et al. 2016). Dies soll im Rahmen einer umfassenden Vernetzung zwischen verschiedenen Unternehmensebenen und innerhalb der gesamten Wertschöpfungskette realisiert werden (Lichtblau et al. 2015). Im Gegensatz zum Computer Integrated Manufacturing aus den 1980er Jahren, bei welchem vor allem die vollständige Automatisierung der Fertigung durch einen zentralen Steuerungsansatz verfolgt wurde, ist der Faktor "Mensch" ein essentieller Teil dieser vierten industriellen Revolution (Spath 2013). Der Mensch soll auf Basis seines Erfahrungswissens und befähigt durch Technologien, welche ihm die richtigen Informationen zur richtigen Zeit bereitstellen, Entscheidungen im Produktionsumfeld treffen können. Auch wenn bereits eine klare Vision von Industrie 4.0 existiert, sind Experten der Ansicht, dass die Umsetzung eher kleinschrittig in Form eines evolutionären Prozesses erfolgen wird (Lichtblau et al. 2015; Schumacher et al. 2016). Über den Begriff Industrie 4.0 hinaus existieren zudem eine Reihe von Konzepten und Technologien, welche eng mit diesem verknüpft sind. Hierzu zählen etwa die Begriffe Cyber-Physisches System, Cyber-Physisches Produktionssystem, Smart Factory oder das Internet der Dinge. Definitionen und Beschreibungen dieser Begriffe sowie des Begriffs Industrie 4.0 existieren dabei jedoch in unterschiedlichen Ausführungen. Erwähnenswert wären hier etwa die Industrie 4.0-Definitionen bzw. Beschreibungen von Kagermann (Kagermann et al. 2012), Bitkom (Bitkom et al. 2015) und Spath (Spath 2013), welche sich insbesondere in ihrem Detaillierungsgrad sowie dem inhaltlichen Fokus unterscheiden. Diese Unterschiede sind zum einen mit dem zum Zeitpunkt der Definitionserstellung aktuellen Stand der Forschung verbunden. Sie sind jedoch auch und insbesondere mit der Sichtweise bzw. dem wissenschaftlichen Hintergrund der jeweiligen Autoren verknüpft. Um

eine wissenschaftliche Grundlage für das hier beschriebene Reifegradmodellkonzept zu schaffen, wurden am Lehrstuhl für Produktionssysteme der Ruhr-Universität Bochum die gängigsten Definitionen des Begriffs Industrie 4.0 inhaltlich analysiert. Auf Basis der Ergebnisse wurde daraufhin eine Industrie 4.0-Beschreibung erstellt. Diese Beschreibung stellt keinen Ansatz für eine neue Definition dar, sondern spiegelt lediglich die aktuellen Konzepte und Inhalte wider, die dem Bereich Industrie 4.0 zugeordnet werden können. Diese Beschreibung lautet wie folgt:

*„Intelligente Fabriken („Smart Factories“) verfügen über Cyber-Physische Produktionssysteme, die in Echtzeit die einzelnen Cyber-Physischen Systeme regulieren. Die Cyber-Physischen Systeme steuern wiederum selbstständig und dezentral ihre Prozesse. Die Vernetzung und Kommunikation aller als Cyber-Physische Systeme auftretenden Einheiten, die an der Wertschöpfung beteiligt sind, ist in den Fabriken, die in Wertschöpfungsnetzwerken zusammenarbeiten können, gegeben. Alle Bereiche von Industrie 4.0 sind vom Internet der Dinge und Dienste durchdrungen und basieren auf der Digitalisierung. Die Daten werden dezentral bereitgestellt und die großen Datenmengen anforderungsgerecht erfasst und verarbeitet. Auf Grund der steigenden Komplexität benötigen die Mitarbeiter neue Kompetenzen, deren Erwerb durch Cyber-Physische Systeme unterstützt wird. Die Mitarbeiter treffen Entscheidungen basierend auf ihrem Erfahrungswissen und den Informationen, die von den CPS zur Verfügung gestellt werden. Die Organisation beruht auf der horizontalen und vertikalen Integration der Prozesse sowie auf deren Transparenz. Die Veränderungen durch Industrie 4.0 erfordern neue Geschäftsprozesse und ermöglichen neue Geschäftsmodelle.“*

## 2.2. Der soziotechnische Ansatz im Kontext von Industrie 4.0

Wie bereits in der Abgrenzung zum Computer Integrated Manufacturing erwähnt, ist Industrie 4.0 keine rein technische Revolution (Spath 2013). Laut Hirsch Kreinsen kann davon ausgegangen werden, dass Industrie 4.0 eine disruptive, strukturverändernde Prozessinnovation darstellt (Hirsch Kreinsen/Weyer 2014). Das bedeutet, dass sich dieser zu bewältigende Transformationsprozess nicht nur auf einzelne Arbeitsplätze, Tätigkeiten und Qualifikationen des Einzelnen auswirkt, sondern auch Auswirkungen auf die gesamte Organisations- und Sozialstruktur eines Produktionssystems hat. Dieser Prozess zieht zudem nicht nur interne, sondern auch unternehmensübergreifende Veränderungen nach sich, welche die Strukturen ganzer Wertschöpfungsketten betreffen kön-

nen (Hirsch Kreinsen/Weyer 2014). Bei einer flächendeckenden Umsetzung wird sich die bestehende Arbeitslandschaft in der industriellen Produktion daher langfristig verändern. Das Konzept des soziotechnischen Systems wird hier verwendet, um die Auswirkungen des Transformationsprozesses ganzheitlich identifizieren zu können. Ein soziotechnisches System ist eine Produktionseinheit, die aus voneinander abhängigen technologischen, organisatorischen und personellen Teilsystemen besteht (Rice 1963). Die Dimension Technik umfasst hierbei alle Elemente, die mit operativen Produktions- oder Verwaltungsaufgaben zusammenhängen, während die Dimension Organisation im Wesentlichen Elemente auf allen Unternehmensebenen umfasst, die zur Gestaltung und Steuerung von Arbeitsprozessen beitragen (Block et al. 2015). Die Personaldimension enthält Elemente, welche sich auf das Personal selbst beziehen, sowie wesentliche Qualifizierungs- und Beteiligungsaktivitäten. Bei einem Wandel eines Unternehmens in Richtung Industrie 4.0, welcher sich als Summe einzelner Transformationsprojekte darstellt, müssen daher alle sozio-technischen Dimensionen (Technik, Organisation und Personal) gleichermaßen berücksichtigt werden. Als ein Beispiel in diesem Kontext dient hier die Einführung eines neuen Softwaresystems z.B. eines Manufacturing Execution Systems (MES), welches als ein Element der soziotechnischen Dimension Technik zu fassen ist. Um dabei eine reibungslose Einführung zu gewährleisten und die Möglichkeiten, welche die Nutzung einer solchen Software mit sich bringt auszuschöpfen, sind jedoch über die Installation sowie die Bereitstellung der notwendigen Daten hinaus weitere Maßnahmen erforderlich. Insbesondere das Personal, welches mit dieser Software arbeiten wird, muss beteiligt und entsprechend im Umgang mit der Software qualifiziert werden. Hier ist also eine Veränderung von Elementen der Dimension Personal notwendig. Des Weiteren müssen im Zuge der Einführung eines solchen Softwaresystems auch neue Mitarbeiterrollen mit entsprechenden Rechten und Verantwortlichkeiten definiert werden und somit Veränderungen auf einer organisationalen Ebene erfolgen. Für die Maximierung des Nutzens sowie einer schnellen und reibungslosen Einführung eines solchen Softwaresystems, ist also eine Berücksichtigung von Elementen aus den drei soziotechnischen Systemen essentiell erforderlich.

### 2.3. Reifegradmodelle im Kontext von Industrie 4.0

Reifegradmodelle sind seit Mitte der 80er Jahre durch das Capability Maturity Modell, spätestens aber seit Anfang des neuen Jahrtausends ein Begriff in der Forschungs- und Industrielandschaft. Nach Nyhuis kann generell in vier Modellarten unterschieden werden: Beschreibungs-, Erklärungs-, Prognose- und Entscheidungsmodelle (Nyhuis

2008). Reifegradmodelle lassen sich hierbei in die Kategorie Entscheidungsmodelle einordnen, welche das Bestimmen optimaler Handlungsmöglichkeiten durch Übertragung der in einem Erklärungsmodell gewonnenen Erkenntnisse auf einen praktischen Anwendungsbereich erleichtern. Reifegradmodelle beschreiben zudem ähnlich wie Referenzmodelle nicht die Prozesse selbst, wie etwa Vorgehensmodelle, sondern das was für effektive und effiziente Prozesse zu tun ist, ohne das "wie" vorzugeben (Koch/Foegen 2010). Reifegradmodelle werden in der Regel für spezielle Anwendungsfälle ausgelegt. Sie liefern einheitliche und überprüfbare Aussagen zum Ist-Zustand und zeigen Migrationswege zu höheren Reifegraden auf (Knackstedt et al. 2009). Sie liefern normative, für die Praxis nützliche Aussagen, sind dafür aber im Gegensatz zu naturwissenschaftlichen Modellen nicht wertfrei durch subjektive menschliche Einflüsse (Mettler 2010). Aufgrund seiner Eigenschaften findet das Konzept des Reifegradmodells auch im Umfeld von Industrie 4.0 Anwendung. In diesem, durch eine hohe Komplexität geprägten Umfeld, können Reifegradmodelle vor allem kleinen und mittelständischen Unternehmen als Unterstützungswerkzeug im Rahmen des Transformationsprozesses hin zu Industrie 4.0 dienen. Aktuell werden diese bereits als Werkzeug zur Bestimmung des Unternehmens Ist-Zustandes bezogen auf verschiedene Kriterien oder Themen von Industrie 4.0 und Digitalisierung eingesetzt. Nennenswert in diesem Zusammenhang sind beispielsweise das Impuls Industrie 4.0 Readiness Modell (Lichtblau 2015), der Leitfaden Industrie 4.0 vom VDMA (Anderl 2015), das Maturity Model for Assessing Industrie 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing vom Fraunhofer Institut Austria (Schuhmacher et al. 2016) sowie der Industrie 4.0 Maturity Index von der ACATECH (Schuh et al. 2017). Diese Modelle haben unterschiedliche Schwerpunkte. Sie berücksichtigen dabei eine Variation von Kriterien, Artefakten oder Dimensionen und nutzen zudem verschiedene Auswertungsschemata. Im Mittelpunkt des Industrie 4.0 Readiness Check Maturity Model (Lichtblau 2015) steht etwa das Erkennen des individuellen Potenzials eines Unternehmens für eine Transformation zu Industrie 4.0. Der Unternehmensreifegrad wird hier in sechs Dimensionen (Strategie und Organisation, Smart Factory, Smart Operations, Smart Products, Data-Driven Services und Mitarbeiter), jeweils mit zwei Themen, bewertet, wobei jede Dimension sieben Stufen besitzt. Die Dimensionseinzelbewertungen werden dann zu einem gesamt Industrie 4.0-Reifegrad zusammengefasst. Im Gegensatz dazu soll der VDMA-Werkzeugkasten, welcher Teil des VDMA-Leitfadens (Anderl 2015) ist, Unternehmen Ideen und Ansätze zur Umsetzung von Industrie 4.0 bieten. Er besteht aus zwölf Aspekten, die in die Kategorien Produkt (Integration von Sensoren,

Konnektivität, Funktionalitäten für Datenspeicherung und Informationsaustausch, Monitoring, produktbezogene IT-Services, Produkt-Geschäftsmodelle) und Produktion (Datenverarbeitung in der Produktion, Machine to Machine Communication, unternehmensweite Vernetzung mit der Produktion, ICT-Infrastruktur in der Produktion, Human Machine Interface, Effizienz bei Kleinserien) unterteilt sind. In welchem Maße das Unternehmen die Aspekte erfüllt, wird dabei durch fünf Entwicklungsstufen bestimmt.

Nach einer Analyse gängiger Industrie 4.0-Reifegradmodelle kann festgestellt werden, dass diese Reifegradmodelle darlegen, wie der Unternehmens Ist-Zustand sowie Ziel-Zustand in verschiedenen Industrie 4.0 relevanten Bereichen abgefragt und abgebildet werden kann. Der Fokus dieser Modelle liegt dabei vermehrt auf technischen Aspekten. Die bei einem solchen Transformationsprozess laut soziotechnischem System zu berücksichtigenden Abhängigkeiten, welche im vorherigen Kapitel auch anhand eines Beispiels erläutert wurden, werden dabei jedoch nicht mit abgebildet. Wie bereits angemerkt, stellt die zur Erreichung von Industrie 4.0 notwendige Durchführung von Digitalisierungsprojekten für KMU noch eine große Herausforderung dar (Meißner et al. 2017; Bischoff et. al 2015). Es wäre demzufolge in dem komplexen Umfeld von Industrie 4.0 ein essentieller Mehrwert für KMU, wenn die bei der Durchführung solcher Projekte zu berücksichtigenden Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Elementen dargestellt werden würden. Auch haben KMU meist weder die personellen Ressourcen, welche sich im Vorfeld umfassend mit den Erfolgsaussichten eines Digitalisierungsprojektes befassen können, noch die finanziellen Mittel, um einen Fehlschlag eines solchen Projektes aufzufangen. Ein Modell, welches durch Aufzeigen von Abhängigkeiten das Risiko eines Projektfehlschlages verringert, wäre demnach von großem Mehrwert für KMU.

### 3. Anforderungen an ein Industrie 4.0 Reifegradmodell

Bevor hier das Konzept des entwickelten Modells vorgestellt wird, sollen zunächst die Anforderungen beschrieben werden, die dessen Entwicklung zugrunde lagen. Bei diesen wird in allgemeine und in spezifische Anforderungen unterschieden, wobei die spezifischen Anforderungen sich auf das Themengebiet Industrie 4.0 fokussieren.

Zur Definition der allgemeinen Anforderungen wurde hier ein Konzept von Mettler (Mettler 2010) aufgegriffen. Um die Entwicklung eines Reifegradmodells genau auf die Ansprüche des Entwicklers zu fokussieren und eine zielgerichtete Entwicklung zu ermöglichen, wurden von Mettler auf Basis der Ausführungen von Wiendahl (Wiendahl 2008) und

Nyhuis (Nyhuis 2008) zum Thema "Anforderungen an die Reifegradmodellentwicklung" Fragekomplexe mit verschiedenen Entwicklungsfragen definiert (Mettler 2010; Mettler 2011). Diese Fragekomplexe können als eine Art morphologischer Kasten verstanden werden. Sie bestehen aus reifegradmodellbeschreibenden Merkmalen, welche verschiedene Ausprägungen besitzen. Im Rahmen des hier beschriebenen Reifegradmodellentwicklungsprozesses wurden zwei dieser Fragenkomplexe kombiniert. Im ersten dieser Fragekomplexe teilt Mettler die Merkmale zusätzlich verschiedenen Entwicklungsphasen zu, welche sich an Phasen aus dem Feld der Projektabwicklung orientieren (Definition des Anwendungsbereiches, Modelldesign, Modellevaluation und Evolutionsreflexion) (Mettler 2011). Des Weiteren kommt im Rahmen der Entwicklung ein Fragenkomplex zum Tragen, welcher detaillierter auf spezifische Reifegradmodellmerkmale eingeht (Mettler 2010).

In Abbildung 1 ist eine Kombination dieser beiden Fragekomplexe abgebildet, wobei doppelte Fragen sowie in diesem Kontext nicht relevante Fragen vernachlässigt wurden. Die Fragen wurden hinsichtlich der Auslegung des zu entwickelnden Reifegradmodells beantwortet. Die Ergebnisse dienen dabei als allgemeine Anforderungen an die Reifegradmodellentwicklung.

Phase	Merkmal	Ausprägung			
Anwendungsbereich	Fokus/Breite	Branchenabhängig	Branchenunabhängig		
	Verwendungszweck 1	Gestalten	Entscheiden	Lernen/Wissen	
	Tiefe der Analyse	Arbeitsgruppe	Organisation	Wertkette	Gesellschaft
	Neuigkeitswert	Innovation	Variante	Version	
	Audienz	Management-orientiert	Technologie-orientiert	Beides	
	Verwendungszweck 2	Optimierung	Bewertung		
	Struktur	Rasterbasiert	Hybrid	Formal-strukturiert	
	Verbreitung	Offen	Exklusiv		
Modelldesign	Reifekonzept	Prozessreife	Personenreife	Objektreife	Kombination
	Reifegraddefinition	Bottom-Up	Top-Down		
	Entwicklungspfad	Statisch (Stufenförmig)	Dynamisch (kontinuierlich)		
	Zielfunktion	Eindimensional	Multidimensional		
	Design Prozess	Theoretisch	Praktisch	Kombination	
	Design Produkt	Beschreibung der Art	Beschreibung der Art und Funktion	Instanzierung (Auswertungswerkzeug)	
	Erhebungsmethode	Selbstbeurteilung	Unterstützung durch Dritte	Beurteilung durch Dritte	
	Erhebungstechnik	Interview	Umfrage	Beobachtung	Dokumentenanalyse
	Realisierung	Punktuell	Projektbasiert		
	Hilfsmittel	Keine	Dokumentbasiert	Computergestützt	
Befragte	Management	Angestellte	Geschäftspartner	Kombination	
Evaluationsdesign	Evaluationsobjekt	Design Prozess	Design Produkt	Beides	
	Zeitraumen	Ex-Ante	Ex-Post	Beides	
	Evaluationsmethode	Natürlich	Künstlich		
Evaluationsauswertung	Änderungsobjekt	Keine	Art	Funktion	Form und Funktion
	Frequenz	Nicht Wiederholend	Kontinuierlich		
	Änderungsstruktur	Extern/Offen	Intern/Exklusiv		

Abbildung 1: Beantworteter Fragenkomplex zur Definition von Anforderungen an die Reifegradmodellentwicklung in Anlehnung an Mettler (Mettler 2010, Mettler 2011)

Eines der Ziele eines Industrie 4.0-Reifegradmodells ist es zunächst den Begriff Industrie 4.0 für Unternehmen leichter zugänglich zu machen. Dementsprechend muss ein Bild von Industrie 4.0 gezeichnet werden, welches verständlich und einfach zu kommunizieren ist. Basis hierfür ist in diesem Fall die am Lehrstuhl für Produktionssysteme erstellte Industrie 4.0-Beschreibung. Davon ausgehend gilt es die verschiedenen **relevanten Aspekte/Kriterien zu definieren, welche für eine erfolgreiche Umsetzung von Industrie 4.0 notwendig sind**. Der Fokus liegt dabei auf dem Umfeld der Produktion sowie auf daran angrenzende Bereiche, da diese den Kern von Industrie 4.0 darstellen. Dies stellt die erste spezifische Anforderung an das zu entwickelnde Reifegradmodell dar. Zur Weiterentwicklung im Rahmen von Industrie 4.0 formulieren Unternehmen einen Zielzustand in einem bestimmten Bereich. Um diesen Zustand zu erreichen muss ein Veränderungsprozess durchlaufen werden. Zur erfolgreichen Umsetzung dieses Prozesses gilt

es dabei entsprechend Abhängigkeiten zu anderen Bereichen zu berücksichtigen. Diese Tatsache lässt sich sowohl auf den in Kapitel 2.2 dargelegten soziotechnischen Ansatz (Block et al. 2015; Hirsch Kreinsen/Weyer 2014) als auch auf frühere Ansätze (Leavitt 1965) zurückführen. Diese besagen, dass bei Veränderungsprozessen in der technischen, organisatorischen und personellen Dimension im Gesamtsystem der Produktion auftretenden Interdependenzen berücksichtigt werden müssen, wenn die Veränderungsprozesse erfolgreich umgesetzt werden sollen. Dies gilt es in Form der **Definition von Abhängigkeiten zwischen Kriterien sowie Ausprägungen innerhalb des Modells** als spezifische Anforderungen an die Reifegradmodellentwicklung mit aufzunehmen. Diese Abhängigkeiten können auch als eine erste Form von Handlungsempfehlungen für Unternehmen betrachtet werden, auch wenn diese womöglich noch nicht entsprechend konkret sind. Des Weiteren muss hier die Tatsache berücksichtigt werden, dass Industrie 4.0 ein sich weiterentwickelndes Forschungsfeld darstellt. Wie diese Veränderungen aussehen ist jedoch ungewiss. Dementsprechend muss das Modell fortlaufend angepasst werden können und **Anpassungen** müssen aufgrund des dynamischen Umfeldes von Industrie 4.0 mit geringem Aufwand möglich sein.

#### 4. Reifegradmodellkonzept

Im Folgenden Kapitel wird ein Reifegradmodellkonzept vorgestellt, welches die im vorherigen Kapitel definierten Anforderungen an ein Industrie 4.0 Reifegradmodell adressiert und somit eine Weiterentwicklung zu bisherigen Modellen darstellt. Dazu wird zunächst das gewählte Entwicklungsvorgehen beschrieben sowie partiell Ergebnisse aus verschiedenen Stufen der Reifegradmodellentwicklung dargelegt. Der Fokus liegt in diesem Beitrag jedoch auf den Ergebnissen der Entwicklungsphase, weswegen des Weiteren das Reifegradmodellkonzept als solches sowie ein Ansatz zur Beschreibung der im Rahmen des Transformationsprozesses zu berücksichtigenden Abhängigkeiten vorgestellt werden.

##### 4.1. Vorgehensweise bei der Modellentwicklung

Bei dem hier verwendeten Entwicklungsvorgehen handelt es sich um das Vorgehen nach dem Design Science Modell bzw. Design Science Research Modell. Design Science ist eine wissenschaftliche Disziplin, welche sich ursprünglich mit Informationssystemen beschäftigt hat und als Problemlösungsprozess verstanden wird (Hevner et al. 2004). Es wird speziell für sogenannte Wicked Problems angewandt. Diese zeichnen

sich durch instabile Anforderungen und Rahmenbedingungen, komplexe Zusammenhänge, und plastische Prozesse und Artefakte aus, welche sich nur durch menschliche Kreativität und Teamwork lösen lassen (Hevner et al. 2004). Industrie 4.0 ist nach diesem Maßstab ein solches Wicked Problem. Bei Design Science kann generell in zwei Bereiche unterschieden werden. In Behavioural Science sowie in Design Science Research. Der Fokus liegt hier auf der Sparte des Design Science Research, welches sich mit der Erweiterung von menschlichen und unternehmerischen Fähigkeiten, durch die Erschaffung von neuen und innovativen Artefakten zur Generierung von "Nützlichkeit" beschäftigt.

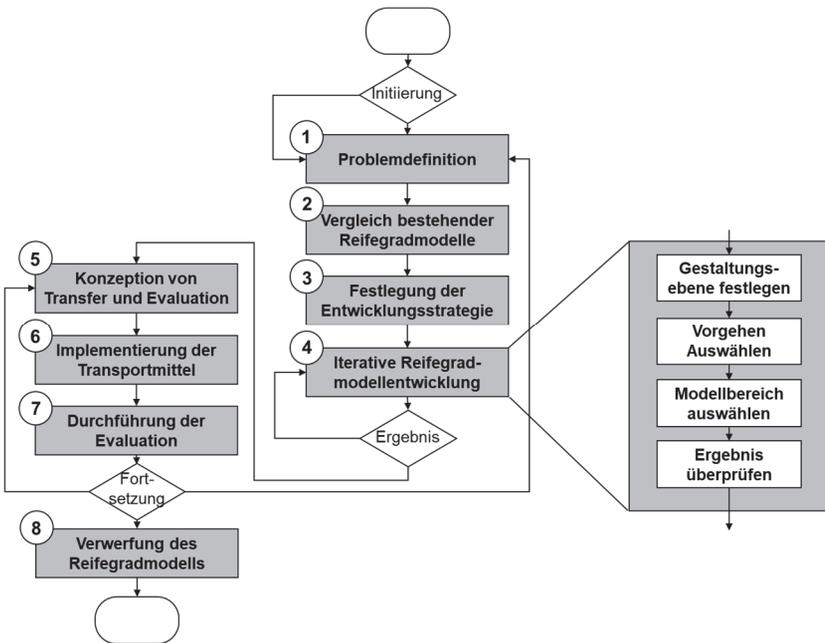


Abbildung 2: Vereinfachtes Reifegradmodellentwicklungsvorgehen nach dem Design Science Research Ansatz in Anlehnung an Becker et al. (Becker et al. 2009).

Hevner et al. haben in diesem Zusammenhang zunächst sieben Entwicklungsrichtlinien definiert (Hevner et al. 2004). Auf Basis dieser Entwicklungsrichtlinien wurde von Becker et al. (Becker et al. 2009) ein mehrstufiges Konzept zur Entwicklung von Reifegradmodellen erstellt, welches im Kontext der hier beschriebenen Reifegradmodellentwicklung genutzt wird. Der Ansatz enthält acht maßgebliche Richtlinien bzw. Stu-

fen. Das Vorgehensmodell, inklusive dieser acht Richtlinien, ist in Abbildung 2 in vereinfachter Form dargelegt. Die in Phase 1 zu formulierende Problemdefinition ergibt sich aus der Eingangs vorgestellten Problemlage von Unternehmen im Umfeld von Industrie 4.0. In Phase 2 wurde ein Vergleich bestehender Industrie 4.0 Reifegradmodelle durchgeführt. Im Rahmen von Kapitel 2.3 wurde angemerkt, dass bestehende Reifegradmodelle die in Kapitel 3 dargelegten Anforderungen, welche an ein Industrie 4.0-Reifegradmodell bestehen, nur teilweise erfüllen. Dieses rechtfertigt hier auch eine Modellneuentwicklung. Die in Phase 3 durchzuführende Festlegung der Entwicklungsstrategie wurde innerhalb dieses Kapitels beschrieben. Hier wurde der Design Science Research Ansatz nach Becker et al. gewählt. Im nachfolgenden Unterkapitel werden die Ergebnisse der vierten Entwicklungsphase dargelegt. Die Phasen 5 bis 7 des in Abbildung 2 dargestellten Vorgehens wurden im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes ADAPTION durchgeführt, werden aber in diesem Beitrag nicht näher beschrieben, da der Schwerpunkt auf dem entwickelten Reifegradmodell liegt. Generell wurden die Entwicklungsphasen 4 bis 7 teilweise innerhalb des Projektkonsortiums durchgeführt, um die Praxistauglichkeit des entwickelten Modells zu gewährleisten.

#### 4.2. Aufbau des Reifegradmodells

Generell kann das hier beschriebene Modell, wie in den Anforderungen definiert als branchenunabhängig bezeichnet werden. Dennoch ist es hinsichtlich des Inhaltes auf den Bereich der Produktion sowie partiell auf angrenzende Bereiche fokussiert. Der Schwerpunkt der im Vorfeld am Lehrstuhl für Produktionssysteme erstellten Industrie 4.0-Beschreibung liegt ebenfalls auf dem Bereich der Produktion. Folglich wurden im Rahmen der Entwicklung die relevanten Artefakte für das Reifegradmodell aus dieser Beschreibung sowie aktuellen Industrie 4.0 Reifegradmodellen abgeleitet. Insgesamt wurden sechsundvierzig Industrie 4.0-Kriterien identifiziert. In diesem Zuge wurden auch Kriterien zu Themen wie Mitarbeiterqualifikation, Mitarbeiterbeteiligung sowie Veränderungsmanagement formuliert. Die Kriterien wurden daraufhin mindestens einer der drei soziotechnischen Dimensionen zugeordnet. Um innerhalb eines Kriteriums in verschiedene Grade der Reife zu unterscheiden, wurden diese in verschiedene Ausprägungen unterteilt. Es ist jedoch von dem jeweiligen Kriterium abhängig, ob diese Ausprägungen hierarchisch oder nicht hierarchisch in ihrem Aufbau sind. Letzteres tritt insbesondere aber nicht ausschließlich bei Kriterien auf, welche sich der soziotechnischen Dimension Personal zuordnen lassen. Die Anzahl dieser Ausprägungen hängt von dem jeweiligen Kriterium ab und reicht

von mindestens drei bis maximal acht Ausprägungen. Beispielsweise kann im Kriterium "Maschinendatenerfassung" in fünf verschiedene Ausprägungen unterschieden werden. Das Kriterium ist dabei maßgeblich der soziotechnischen Dimension "Technik" zuzuordnen. Zum besseren Verständnis im Zuge der Anwendung durch ein Unternehmen, existiert für jedes Kriterium sowie für jede Ausprägung eine Beschreibung. Diese werden jedoch in diesem Beitrag aufgrund der hohen Anzahl der Kriterien nur exemplarisch im Rahmen des Kapitels 4.3. aufgeführt. Darüber hinaus wird das Konzept des Reifegradmodells von einem Glossar begleitet, das Fachbegriffe erklärt, welche den Anwendungsunternehmen möglicherweise nicht bekannt sind.

### 4.3. Abhängigkeiten innerhalb des Reifegradmodells

Das hier vorgestellte Reifegradmodell dient, wie andere Industrie 4.0-Reifegradmodelle auch, primär zur Ermittlung des Ist-Zustandes innerhalb eines Unternehmens oder Unternehmensbereiches sowie zur Bestimmung der dort angestrebten Zielzustände. Die detaillierte Erfassung dieser Zustände erfolgt dabei innerhalb des Modells durch eine Einordnung des betrachteten Bereiches in die entsprechenden Ausprägungen der Modellkriterien. Im Rahmen der Definition der spezifischen Anforderungen an das zu entwickelnde Reifegradmodell in Kapitel 3 wurde zudem festgelegt, dass bei der Bestimmung von Zielzuständen in den Kriterien auch Interdependenzen zu anderen Kriterien und deren Ausprägungen berücksichtigt werden müssen. Dadurch werden anwendenden Unternehmen Themenbereiche aufgezeigt, welche zur Erreichung des angestrebten Zielzustandes weiterhin von Relevanz sind. In diesem Zuge wurden innerhalb des Reifegradmodellkonzeptes Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Kriterien sowie Ausprägungen definiert. Die Bestimmung und Klassifizierung der Abhängigkeiten wurde hierbei auf Basis von Literaturrecherchen sowie auf Basis von Gesprächen mit Unternehmensvertretern durchgeführt. Dies sichert die erforderliche praxisnähe des Reifegradmodells, führt jedoch auch zu einer gewissen Subjektivität bei der Definition der Abhängigkeiten. Das vorgestellte Modell erhebt folglich nicht den Anspruch alle Wechselwirkungen, die in einem solchen Transformationsprozess berücksichtigt werden müssen, zu beschreiben. Es dient ausschließlich als unterstützendes Werkzeug. Mit der Design-Structure Matrix wurde zur Erfassung und Dokumentation der Abhängigkeiten eine Visualisierungsmethode genutzt, welche auch im Bereich des Komplexitätsmanagements verwendet wird. Generell wurde im Kontext der Bestimmung der Abhängigkeiten zwischen den Kriterien und Ausprägungen in zwei verschiedene Abhängigkeitstypen unterschieden: In explizite sowie implizite Abhängigkeiten.

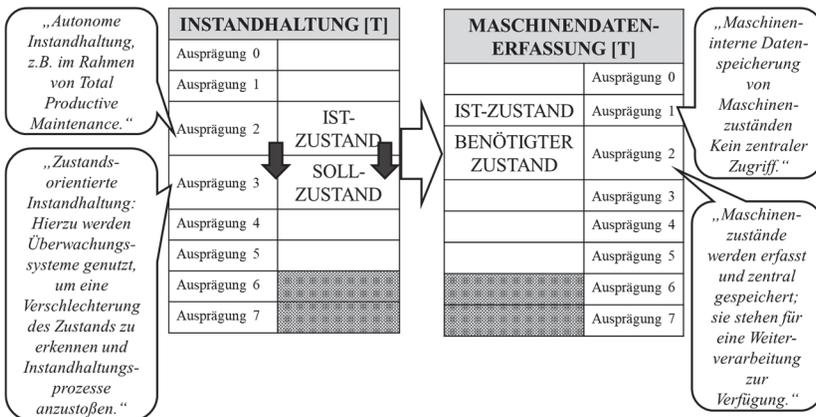


Abbildung 3: Das Prinzip der expliziten Abhängigkeit am Beispiel des Kriteriums Instandhaltung

Explizite Abhängigkeiten beschreiben hierbei den konkreten Zusammenhang zwischen dem Erreichen einer bestimmten Ausprägung eines Kriteriums und dem Erreichen einer anderen Ausprägung eines anderen Kriteriums. Dies ist dabei die Voraussetzung für die Erreichung des gewünschten Zielzustandes und stellt somit eine Handlungsempfehlung für das Unternehmen in diesem Bereich dar. Ein Beispiel für diese Abhängigkeitsform ist in der Abbildung 4 exemplarisch dargestellt. In diesem Beispiel ist zu sehen, dass die Erreichung der Ausprägung 3, ausgehend von Ausprägung 2, im Kriterium "Instandhaltung" direkt mit der Erreichung der Ausprägung 2 der Ausprägung "Maschinendatenerfassung" verknüpft ist. Um die Komplexität auf einem überschaubaren Level zu halten, wurden in diesem Zusammenhang zunächst nur Abhängigkeiten ersten Grades berücksichtigt. Das bedeutet, dass nicht angezeigt wird, von welchen Kriterien und Ausprägungen wiederum die Erreichung von Ausprägung 2 im Kriterium "Maschinendatenerfassung" abhängig ist.

Implizite Abhängigkeiten betrachten in diesem Zusammenhang ausschließlich die Kriterienebene und beschreiben, dass zwei Kriterien potenziell eine thematische Schnittmenge haben. Konkret bedeutet das, dass wenn ein Unternehmen seinen Zielstatus in einem Kriterium mit Hilfe des Reifegradmodells festlegt, weitere Kriterien mit thematischem Bezug aufgeführt werden. Dabei wird kein direkter Bezug zu den Ausprägungen der Kriterien hergestellt. In der nachfolgenden Abbildung 5 ist dies exemplarisch dargestellt.

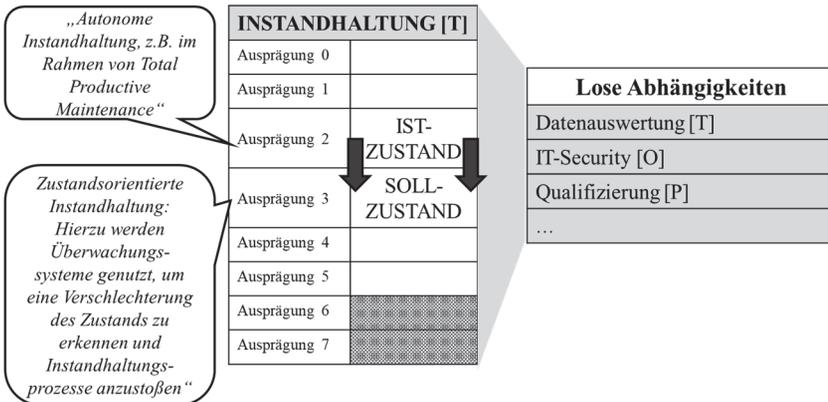


Abbildung 4: Das Prinzip der impliziten Abhängigkeit am Beispiel des Kriteriums Instandhaltung

In diesem Beispiel ist der festgelegte Soll-Zustand, die Ausprägung 3 innerhalb des Kriteriums "Instandhaltung", ausgehend vom Ist-Zustand Ausprägung 2 zu erreichen. Das Kriterium "Instandhaltung" besitzt hierbei implizite Abhängigkeiten zu weiteren Kriterien, welche das Erreichen des Zielzustandes beeinflussen können. Darunter fallen unter anderem die folgenden Reifegradmodellkriterien: "Datenauswertung", "IT-Sicherheit" sowie "Personalentwicklung und Qualifizierung", aber auch "Mensch-Maschine-Schnittstelle".

## 5. Weiterer Forschungsbedarf

### 5.1. Nischenorientierte Modelle zur Ableitung konkreter Handlungsempfehlungen

Bei Industrie 4.0 handelt es sich um eine vielschichtige und komplexe Thematik. Wie im Rahmen der Modellentwicklung festgestellt werden konnte, gestaltet sich eine Kategorisierung dieser Thematik in verschiedene Teilbereiche oder Kriterien aufgrund vieler inhaltlicher Überschneidungen der Bereiche schwierig. Folglich ist auch die Definition verschiedener Ausprägungen innerhalb dieser Teilbereiche nur auf einem recht abstrakten Niveau möglich. In Summe führt dies dazu, dass innerhalb des Reifegradmodells Unternehmens-Ist- und Soll-Zustände in verschiedenen Industrie 4.0 Kategorien erfasst und definiert werden können. Auch eine Bestimmung von Abhängigkeiten zwischen diesen Kriterien ist möglich. Wirklich konkrete Handlungsempfehlungen, welche Unternehmen bei der Transformation in Richtung Industrie 4.0 un-

terstützen, lassen sich jedoch aufgrund der benannten Komplexität bisher nicht formulieren, was auch bereits im Rahmen von Studien zum Ausdruck gebracht wurde (Schuh et al. 2017). Dies ist jedoch auch auf die Tatsache zurückzuführen, dass die Ausgangssituationen der Unternehmen, welche bei einer Nutzung eines Reifegradmodells zu Grunde liegen stark variieren. Eine aus einem Reifegradmodell der hier beschriebenen Art abgeleitete Handlungsempfehlung kann dementsprechend für einen Teil von Unternehmen relevant sein, jedoch für einen weiteren, womöglich größeren, Teil keine Aussagekraft besitzen.

Um dennoch konkrete Handlungsempfehlungen zu generieren, wäre es ein Ansatz die Komplexität der betrachteten Thematik zu reduzieren. Dies kann durch Verringerung der Größe des betrachteten Lösungsraumes erfolgen. Industrie 4.0 ist zwar generell als branchenunspezifische Thematik zu betrachten, eine Fokussierung auf eine bestimmte Branche oder einen Industriezweig, würde jedoch zur Reduktion der Komplexität beitragen. Auch die zusätzliche Ausrichtung des Reifegradmodells auf bestimmte Unternehmenstypen kann dabei förderlich sein. In diesem Kontext können auch weitere fest definierte Unternehmensmerkmale wie etwa die Mitarbeiteranzahl, der Umsatz oder die geographische Ausbreitung des Unternehmens für die Schaffung einer einheitlichen Ausgangssituation genutzt werden und zudem ebenfalls zur Komplexitätsreduktion führen. Das daraus resultierende Reifegradmodell wäre folglich nur für einen kleinen Teil von Unternehmen relevant, würde dafür jedoch in der Lage sein diesen Unternehmen, konkretere Handlungsempfehlungen bereitzustellen.

## 5.2. Berücksichtigung des Faktors Wirtschaftlichkeit

Eine wichtige Thematik im Kontext der Anwendung des entwickelten Reifegradmodells ist die Bewertung der Wirtschaftlichkeit. Diese ist ein wesentlicher Faktor bei der Festlegung des gegenwärtigen Zielreifegrads und damit für die Ableitung des Migrationspfads. Zum anderen ist die Wirtschaftlichkeit bei der Umsetzung der abgeleiteten Maßnahmen eine zentrale Größe, die bei den erforderlichen Entscheidungsprozessen berücksichtigt werden muss. Wie bereits im Kapitel 5.1 erläutert, besteht eine wesentliche Herausforderung in der Ableitung konkreter Handlungsempfehlungen. In diesem Kontext stellt sich die Frage nach der methodischen Integrierbarkeit einer Wirtschaftlichkeitsbewertung in dieses Vorgehen. Da für eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit die Quantifizierung der zu erwartenden Kosten erforderlich ist, kann eine Beurteilung folglich nur auf der Detaillierungsebene von konkreten

Maßnahmen erfolgen. Der beschriebene Ansatz eines branchenspezifischen Reifegradmodells ist ein vielversprechender Weg um konkretere Handlungsempfehlungen abzuleiten. Auch für ein derart detaillierteres Reifegradmodell müssten die Kosten für die Durchführung der einzelnen Maßnahmen losgelöst von einem realen Anwendungsfall quantifiziert werden. Dies ist mit einem sehr hohen Abstraktionsgrad verbunden, was in einer sehr geringen Übertragbarkeit auf die reale betriebliche Praxis resultiert. Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit ist ein Prozess, der individuell für jedes Unternehmen durchzuführen ist. Damit ist ein allgemeingültiges Reifegradmodell hierfür nicht der geeignete Ansatz. Um die vielschichtigen Einflüsse abzubilden die gemäß dem soziotechnischen Ansatz zu berücksichtigen sind, wird ein Vorgehensmodell benötigt, das den Prozess der Maßnahmenableitung unter Berücksichtigung der Interdependenzen standardisiert beschreibt und dessen Durchführung schrittweise unterstützt. Innerhalb dieses Vorgehensmodells können auch die vielschichtigen Anforderungen bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit abgebildet werden. Insbesondere muss hier ein standardisiertes Vorgehen zur Bewertung von Kosten und Nutzen durch den Anwender integriert werden. Dazu gilt es zu untersuchen, wie der methodische Ansatz der etablierten Nutzwertanalyse hinsichtlich der speziellen Gegebenheiten in der Industrie 4.0 erweitert werden muss. Des Weiteren gilt es zu analysieren, inwiefern das Vorgehensmodell durch ein zusätzliches Entscheidungsmodell und die dafür notwendigen Beschreibungs- und Erklärungsmodelle unterstützt werden kann. Dieses Entscheidungsmodell könnte dabei aus dem hier dargelegten Reifegradmodell sowie der Industrie 4.0-Beschreibung abgeleitet werden.

## 6. Zusammenfassung und Fazit

Für eine erfolgreiche Gestaltung des Entwicklungsprozesses hin zu Industrie 4.0 müssen Unternehmen Aspekte der drei soziotechnischen Dimensionen Technik, Organisation und Personal sowie mögliche Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen diesen Dimensionen berücksichtigen. Ein Werkzeug zur Unterstützung dieses Prozesses stellt das hier vorgestellte Reifegradmodell dar. Im Rahmen der Modellentwicklung wurden zunächst angelehnt an Mettler Anforderungen an ein Industrie 4.0-Reifegradmodell definiert und anschließend mit dem Design Science Research Ansatz angelehnt an Becker ein entsprechendes Entwicklungsverfahren ausgewählt. Das daraus resultierende Reifegradmodell enthält 46 verschiedene Industrie 4.0-Kriterien, welche auf Basis einer am Lehrstuhl für Produktionssysteme erstellten Beschreibung von Industrie 4.0 identifiziert und mindestens einer der drei soziotechnischen Dimensionen zugeordnet wurden. Dabei wurden auch vermehrt

Themen aus der Dimension Personal, wie etwa die im Unternehmen vorliegende Beteiligungskultur, der Stand und Aufbau von Kompetenzen sowie die Handhabung bei Veränderungsprozessen berücksichtigt. Im Gegensatz zu aktuellen Reifegradmodellansätzen ist in dem hier vorgestellten Ansatz neben der Erfassung und dem Monitoring von Ist- und Zielzuständen in den verschiedenen Industrie 4.0-Kriterien, auch die Beschreibung von Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zu anderen Kriterien, welche mit einem gesetzten Zielzustand zusammenhängen können, gewährleistet. Dies hat den Mehrwert, dass ein gesetztes Ziel in einem Kriterium konkreter und in seiner Gesamtheit transparenter für das Unternehmen wird. Es wird für den Anwender deutlich, ob weitere bisher unbekannte Schritte zur Erreichung des Ziels notwendig sind und ermöglicht eine genauere Abschätzung, ob dies überhaupt mit den vorhandenen finanziellen Mitteln und Ressourcen realisierbar ist. Es besteht dementsprechend die Möglichkeit das gesetzte Ziel neu zu justieren und an der aktuellen Unternehmenssituation auszurichten, was insbesondere für KMU mit oftmals begrenzten finanziellen Mitteln im komplexen Umfeld von Industrie 4.0 einen hohen Mehrwert darstellt. Nichtsdestotrotz konnte im Bereich der Reifegradmodellentwicklung weiterer Forschungsbedarf identifiziert werden. Es wurde dargelegt, welche Vorzüge ein branchenspezifisches Unterstützungswerkzeug bieten und zudem wie wirtschaftliche Aspekte bei der Entwicklung in Richtung Industrie 4.0 berücksichtigt werden können. Darüber hinaus wird das hier beschriebene Reifegradmodellkonzept in einem Softwaretool umgesetzt, um für die Anwendungsunternehmen eine einfachere Handhabung zu ermöglichen und sich im Rahmen von Industrie 4.0 ohne externe Beratung leichter orientieren zu können.

Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden teilweise im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojekts Adaption "Reifegradbasierte Migration zum Cyber-physischen Produktionssystem" (Kennziffer: 02P14Bo20) im Rahmen der Ausschreibung "Industrie 4.0 - Forschung auf den betrieblichen Hallenboden" erarbeitet. Diese wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) betreut.

## Literatur

- Anderl, R. (2015). Leitfaden Industrie 4.0. Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand. Frankfurt am Main: VDMA-Verlag.
- Bauernhansel, T., Krüger, J., Reinhart, G., Schuh, G. (2016). WGP-Standpunkt Industrie 4.0. Darmstadt: Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e.V.
- Becker, J., Knackstedt, R., Pöppelbuß, J. (2009). Entwicklung von Reifegradmodellen für das IT-Management [online]. Vorgehensmodell und praktische Anwendung. *Wirtschaftsinformatik*, 51 (3), S. 249-260.
- Bischoff, J., Taphorn, Fellbaum, M., Goloverov, A. (2015). Erschließen der der Potenziale der Anwendung von "Industrie 4.0" im Mittelstand. Studie beauftragt vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Mülheim an der Ruhr: Agiplan GmbH.
- BITKOM, VDMA, ZVEI (2015). Umsetzungsstrategie Industrie 4.0. Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0.
- Block, C., Freith, S., Kreggenfeld, N., Morlock, F., Prinz, C., Kreimeier, D., Kuhlenkötter, B. (2015). Industrie 4.0 als soziotechnisches Spannungsfeld. Ganzheitliche Betrachtung von Technik, Organisation und Personal. *Zeitschrift für den Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)*, Vol. 110 (10), S. 657-660.
- Hevner, A., March, S., Park, J., Ram, S. (2004). Design Science in Information Systems Research. *MIS Quarterly*, Vol. 28 (1), S. 75-105.
- Hirsch Kreinsen, H., Weyer, W. (2014). Wandel von Produktionsarbeit – "Industrie 4.0". Soziologisches Arbeitspapier Nr. 38. Dortmund.
- Kagermann, H., Lukas, W. D., Wahlster, W. (2011). Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. *VDI Nachrichten* (13).
- Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J. (2012). Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Berlin.
- Knackstedt, R., J. Pöppelbuß, Becker, J. (2009). Vorgehensmodell zur Entwicklung von Reifegradmodellen. *Wirtschaftsinformatik Proceedings 2009*. S. 534-544. Online verfügbar unter: <https://aisel.aisnet.org/wi2009/44>, zuletzt geprüft am 05.08.2018.
- Koch, L., Foegen, M. (2010). Vergleich CMMI und SPICE. Online verfügbar unter: [https://www.wibas.com/media/filer\\_public/2013/08/28/wibas\\_cmmi\\_spice\\_de.pdf](https://www.wibas.com/media/filer_public/2013/08/28/wibas_cmmi_spice_de.pdf), zuletzt geprüft am 05.08.2018.
- Leavitt, H. (1965). Applying organizational change in industry: Structural, technological and humanistic approaches. In: J. March (Hrsg.): *Handbook of Organizations*. Chicago, Illinois: Rand McNally.
- Lichtblau, K., Stich, V., Bertenrath, R., Blum, M., Bleider, M., Millack, A., Schmitt, K., Schmitz, E., Schröter, M. (2015). IMPULS - Industrie 4.0-Readiness, Aachen-Köln: Impuls-Stiftung des VDMA.

- Meißner, A, Glass, R., Gebauer, C., Stürmer, S., Metternich, J. (2017). Hindernisse der Industrie 4.0 – Umdenken notwendig? Zeitschrift für den Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF), Vol. 112 (9), S. 207-611.
- Mettler, T. (2010). Supply-Management im Krankenhaus. Konstruktion und Evaluation eines konfigurierbaren Reifegradmodells zur zielgerichteten Gestaltung. Göttingen: Sierke.
- Mettler, T. (2011). Maturity assessment models. A design science research approach. International Journal of Society Systems Science (IJSSS), Vol. 3 (1/2), S. 81-98.
- Nyhuis, P. (2008). Entwicklungsschritte zu Theorien der Logistik. In: P. Nyhuis (Hrsg.). Beiträge zu einer Theorie der Logistik (S. 1-18). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg,
- Rice, A. (1963). The enterprise and its environment. London: Tavistock.
- Schuh, G., Anderl, R., Gausemeier, J., Ten-Hompel, M., Wahlster, W. (2017). Industrie 4.0 Maturity Index. Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten. München: Herbert Utz Verlag.
- Schumacher, A., Erol, S., Sihn, W. (2016). A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. In: A. Nassehi und S. Newman (Hrsg.): The Sixth International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV2016), S. 161-166.
- Spath, D. (2013). Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag.
- Wiendahl, H.-H. (2008). Stolpersteine der PPS. ein sozio-technischer Ansatz für das industrielle Auftragsmanagement. In: P. Nyhuis (Hrsg.). Beiträge zu einer Theorie der Logistik (S. 274-304). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.



# Mensch, Organisation, Technik im KMU 4.0

Uwe Dombrowski, Alexander Karl, Thomas Richter, Jonas Wullbrandt

Institut für Fabrikbetriebslehre und Unternehmensforschung, TU Braunschweig

## 7. Das Spannungsfeld Mensch, Organisation und Technik in der Industrie 4.0

Spätestens mit der Hightech-Strategie der Bundesregierung hält die Industrie 4.0 Einzug in das industrielle Umfeld von KMU. Es handelt sich bei der Industrie 4.0 um eine *„echtzeitfähige, intelligente und digitale Vernetzung von Menschen, Maschinen und Objekten zum Management von Unternehmensprozessen und Wertschöpfungsnetzwerken“* (Dombrowski/Richter 2016).

Aktuelle Studienergebnisse belegen, dass insbesondere beim deutschen Mittelstand große Probleme bei der erfolgreichen Industrie 4.0-Umsetzung auftreten. Als Ursachen für diese Probleme benennen die Studienergebnisse unter anderem eine fehlende strategische Ausrichtung sowie mangelnde finanzielle und personelle Ressourcen als Hauptgründe, weshalb Bemühungen von KMU aktuell scheitern (DIHK 2015; Schröder 2016; Leyh et al. 2018).

Die Ausstattung der Produktion mit modernster Informations- und Kommunikationstechnik ist für die Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit zahlreicher Unternehmen zwar ein notwendiger Bestandteil, aber für die Realisierung zahlreicher Potenziale durch die Industrie 4.0 keine zwingende Maßnahme. Aus den Bereichen Mensch, Organisation und Technik resultiert ein Spannungsfeld, da diese Bereiche gegenseitig aufeinander einwirken und sich beeinflussen. Essenziell ist das verschwundensfreie Zusammenspiel in diesem Spannungsfeld zwischen den Bereichen Mensch, Organisation und Technik in einem vernetzten, aufeinander abgestimmten Gesamtsystem (Deuse et al. 2015; Dombrowski et al. 2017a). Die Implementierung von Industrie 4.0 kommt dort zu früh, wo dieses Spannungsfeld nicht ausreichend berücksichtigt wurde und daraus resultierend instabile Prozesse vorliegen, keine Standards existieren und grundlegende Kenngrößen fehlen.

Im Bereich der *menschlichen und organisatorischen Ebene* haben sowohl Großunternehmen als auch KMU in der Vergangenheit durch die Implementierung von Ganzheitlichen Produktionssystemen ihre Produktivität und Flexibilität in der Auftragsabwicklung erheblich steigern können. Quelle: Buch GPS - DOM Darüber hinaus konnten die Potenziale der Ganzheitlichen Produktionssysteme auch auf die Bereiche der Produktentstehung und der administrativen Prozesse übertragen werden. Mit der VDI 2870 existiert ein unternehmensspezifisches und methodisches Regelwerk, um die Unternehmensprozesse kontinuierlich am Kunden auszurichten. Es stehen damit umfangreiche Gestaltungsprinzipien mit zugehörigen Methoden und Werkzeugen zur Verfügung (VDI 2870 2012). Im Bereich der *technischen Ebene* existieren Publikationen, die Unternehmen einen guten Überblick über potenziell innovative und zukünftig relevante Technologien ermöglichen (Panetta 2017).

Es kann daher festgehalten werden, dass sowohl im Bereich der vornehmlich menschlichen und organisatorischen Ebene als auch im Bereich der technischen Ebene isoliert relevante Grundlagen für die Implementierung von Industrie 4.0-Applikationen existieren. Insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen resultieren aufgrund der nur isoliert betrachteten Themenfelder erhebliche Nachteile. Durch ihre tendenziell schwächere finanzielle Basis, können sie eigene aufwändige exemplarische Anwendungsbeispiele (Use Cases) und Technologiestudien für die Auswirkungen der Implementierung von Industrie 4.0-Applikationen in ihr soziotechnisches System oft nicht eigenständig realisieren. Mögliche Wechselwirkungen im Spannungsfeld der Bereiche Mensch, Organisation und Technik können somit nicht im Voraus identifiziert und ausreichend berücksichtigt werden. In der Folge bleiben Investitionen von KMU in kostspielige Industrie 4.0-Applikationen, wenn diese dann getätigt werden, oft bei erfolglosen Einzelimplementierungen (DIHK 2015; Schröder 2016; Leyh et al. 2018).

Dieser Beitrag thematisiert das Spannungsfeld der Bereiche Mensch, Organisation und Technik in KMU im Kontext der Industrie 4.0. Ziel dieses Beitrags ist es, auf Basis der Besonderheiten von KMU und der bestehenden soziotechnischen Erkenntnisse einen auf KMU ausgerichteten Mehrwert zur erfolgreichen Technologieauswahl und deren Implementierung zu schaffen. Dies beinhaltet die Identifizierung elementarer Voraussetzungen für eine erfolgreiche Implementierung von Industrie 4.0-Technologien im oben genannten Spannungsfeld. Der Beitrag adressiert im zweiten Kapitel zunächst die Besonderheiten der KMU. Aufbauend darauf werden diese Besonderheiten mit den bestehenden Erkenntnissen der Ganzheitlichen Produktionssysteme sowie der Industrie 4.0 verknüpft und zu einem Ganzheitlichen Produktionssystem

4.0 für KMU überführt. Durch das Aufzeigen von drei Anwendungsfälle sollen die abgeleiteten generischen Voraussetzungen für ein GPS 4.0 exemplarisch angereichert und konkretisiert werden.

## 8. Besonderheiten kleiner und mittlerer Unternehmen

In der traditionellen Managementphilosophie wird davon ausgegangen, dass kleine und mittlere Unternehmen pauschalisierend identische Prinzipien und Methoden nutzen können, wie dies auch für Großunternehmen der Fall ist (Mugler 2008). Mit ihrem Zitat „A Small Business Is Not A Little Big Business“ untermauern *Welsh* und *White* bereits im Jahr 1981, dass die Methoden von Großunternehmen aufgrund der Eigenart kleiner und mittlerer Unternehmen grundsätzlich nicht direkt erfolgswirksam anwendbar sind (Welsh/White 1981). Um zu verstehen, welche Unterschiede bei KMU tatsächlich vorliegen, ist eine genauere Abgrenzung der kleinen und mittleren Unternehmen von Großunternehmen erforderlich. Der Begriff KMU ist in der einschlägigen Literatur nicht eindeutig definiert. Im Nachfolgenden soll eine *quantitative* und *qualitative* Abgrenzung der Unternehmenstypen zueinander erfolgen (Crespo Otano 2012). Insbesondere die qualitative Abgrenzung soll die Basis legen, um die Besonderheiten des soziotechnischen Systems von KMU zu verstehen und daraus spezifische Gestaltungsempfehlungen für das KMU 4.0 in Divergenz zu Großunternehmen abzuleiten.

*Quantitative Abgrenzung von KMU:* Zur quantitativen Abgrenzung von KMU und Großunternehmen lassen sich in der Literatur unterschiedliche Grenzwerte identifizieren (European Commission 2005; Fleischer 2018; Institut für Mittelstandsforschung 2018). Neben den beiden Bezeichnungen KMU und Großunternehmen tritt hier zudem der Begriff des Mikrounternehmens als eine Art Kleinstunternehmen auf. Unabhängig von der jeweiligen Literaturquelle beziehen sich alle nachfolgenden aufgelisteten Quellen auf identische Differenzierungsmerkmale, die sich lediglich in ihrer Quantität unterscheiden. Konkret handelt es sich um die Kriterien Mitarbeiteranzahl, Umsatz und Bilanzsumme eines Unternehmens (Söllner 2014; Crespo Otano 2012). Die Abbildung 1 stellt vier unterschiedliche Quellen und deren ausgewählte qualitative Ausprägung der KMU dar.

Quelle	Mikro	Klein	Mittel	Groß
[Euro 05]	MA ≤ 9 Um oder BS ≤ 2 Mio. €	MA ≤ 49 Um oder BS ≤ 10 Mio. €	MA ≤ 249 Um ≤ 50 Mio. € BS ≤ 43 Mio. €	MA ≥ 250 Um ≤ 50 Mio. € BS ≤ 43 Mio. €
[HGB 87]		MA ≤ 50; Um ≤ 8,03 Mio. € BS ≤ 4 Mio. €	MA ≤ 250; Um ≤ 32,1 Mio. € BS ≤ 16,1 Mio. €	MA > 250 Um > 32,1 Mio. € BS ≤ 16,1 Mio. €
[BMG 08]		MA ≤ 50; Um ≤ 9,68 Mio. € BS ≤ 4,84 Mio. €	MA ≤ 250; Um ≤ 38,5 Mio. € BS ≤ 19,25 Mio. €	MA > 250; Um > 38,5 Mio. € BS > 19,25 Mio. €
[IfM 17]		MA ≤ 9; Um oder BS ≤ 1 Mio. €	MA 10 bis 499; Um oder BS 1 bis 50 Mio. €	MA ≥ 500; Um oder BS > 50 Mio. €

MA = Mitarbeiteranzahl, Um = Umsatz, BS = Bilanzsumme

□ Betrachtungsbereich

Abbildung 1: Quantitative Abgrenzung von KMU (Ahsen et al. 2010).

In der Forschung hat sich vor allem die Empfehlung für die KMU-Definition der Europäischen Kommission etabliert, die KMU als Unternehmen mit weniger als 250 Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen, einem jährlichen Umsatz von weniger als 50 Mio. EUR oder einer Bilanzsumme kleiner als 43 Mio. EUR zusammenfasst (European Commission 2005). Unter dieser KMU-Definition fallen etwa im Referenzjahr 2015 insgesamt 2.408.194 Unternehmen in Deutschland. Diese Anzahl teilt sich in 1.949.137 Mikro- bzw. Kleinstunternehmen, 372.161 kleine Unternehmen sowie 69.613 mittlere Unternehmen auf. Werden die Kleinstunternehmen aus dieser Auflistung herausgerechnet, ergibt sich für Deutschland eine Summe von 441.774 KMU. Dieser Zahl stehen zum gleichen Betrachtungszeitpunkt 17.283 Großunternehmen gegenüber. Diese Zahlen untermauern die Relevanz der KMU-spezifischen wissenschaftlichen Auseinandersetzung (statista 2017b).

**Qualitativen Abgrenzung von KMU:** Eine rein quantitative Abgrenzung kann je nach wissenschaftlicher Fragestellung nicht ausreichend sein. Im Folgenden soll daher neben der quantitativen noch eine qualitative Abgrenzung der KMU von Großunternehmen erfolgen. Kritisch anzumerken ist, dass eine klare qualitative Abgrenzung von kleinen und mittleren Unternehmen grundsätzlich nicht möglich ist. Es existieren jedoch Erfahrungswerte, die ausreichend Anhaltspunkte für eine grobe Abgrenzung von KMU zu Großunternehmen liefern. Die nachfolgende Abbildung 2 grenzt das KMU anhand von sechs Klassifizierungsbereichen voneinander ab, die danach detaillierter betrachtet werden.

Klassifizierung	Großunternehmen	KMU
① <b>Führung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Professionelles Management</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Inhaber geführt</li> <li>▪ Management im Tagesgeschäft involviert</li> </ul>
② <b>Organisation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ausgeprägte Hierarchien</li> <li>▪ Hohe Standardisierung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Flache Hierarchien</li> <li>▪ Geringe Standardisierung</li> </ul>
③ <b>Strategie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Variierend</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Spezialisiert</li> <li>▪ Kernkompetenz im Nischenbereich</li> </ul>
④ <b>Mitarbeiter</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gemischte Aufgabenverteilung</li> <li>▪ Viele Experten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wenige Akademiker</li> <li>▪ Probleme bei Akquise neuer Fachkräfte</li> </ul>
⑤ <b>Forschung &amp; Entwicklung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Langfristig orientiert</li> <li>▪ Dauerhaft institutionalisierte Abteilungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kurzfristig orientiert</li> <li>▪ Nicht dauerhaft institutionalisierte Abteilungen</li> </ul>
⑥ <b>Finanzierung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Große finanzielle Ressourcen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Begrenzte finanzielle Ressourcen</li> <li>▪ Begrenzte Finanzierungsmöglichkeiten</li> </ul>

Abbildung 2: Qualitative Abgrenzung von KMU in Anlehnung an (Pfohl 2013).

Bei der **Führung** (1) lassen sich zum Teil deutliche Unterschiede zwischen KMU und Großunternehmen identifizieren. Durchaus in KMU vorzufinden ist, dass eine Person gleichzeitig die Funktionen des Eigentümers, Geschäftsführers und Gründers ausübt (Pfohl 2013). Solche Konstellationen führen dazu, dass bei KMU durch die Führungspersönlichkeit eine starke Prägung des Unternehmens erfolgt. Grundsätzlich ist die Geschäftsführung in KMU enger in das operative Tagesgeschäft involviert und daher schneller mit strategischen Themen überlastet (Pfohl 2013). Die Geschäftsführung besitzt in der Regel vermehrt technisches Know-how und weniger Kenntnisse in der Unternehmensführung. Langfristige Planungen geraten eher in den Hintergrund. Entscheidungen und Problemlösungen erfolgen durch ein unzureichendes Informationswesen oft auf Basis von Improvisation und Intuition. Der enge Bezug zum Tagesgeschäft führt zu einer engen Zusammenarbeit über zum Teil flache Hierarchien zu den Mitarbeitern und daraus resultierenden schnellen Abstimmungen und Entscheidungswegen (Beker/Ulrich 2011; Pfohl 2013). Aufgrund der Führungspersönlichkeit sind Gruppenentscheidungen selten, da strategische Entscheidungen direkt von der Unternehmensführung beschlossen werden (Pfohl 2013; Crespo Otano 2012; Dombrowski/Karl 2016).

In Bezug auf die **Organisation** (2) profitieren KMU unternehmensintern und -extern vor allem durch die Vorteile der überschaubaren Mitarbeiteranzahl, woraus intern unter anderem eine höhere persönliche Bindung der Mitarbeiter zueinander resultiert. Hieraus ergeben sich kurze direkte Informationswege, die kaum Koordinationsprobleme her-

vorrufen. Sehr flexible und wenig standardisierte Unternehmensstrukturen führen zu einer hohen Anpassungsfähigkeit der KMU und einem nur kurzfristigeren Planungshorizont (Pfohl 2013). Darüber hinaus lässt sich über die Unternehmensgrenzen hinaus ein engmaschiges Netz zu Lieferanten und Kunden vorfinden. Aus der direkten Nähe der Organisation zum Markt und seinen Kunden resultieren auch hier schnelle informelle Kommunikationswege, wodurch Kundenwünsche in der Regel schneller berücksichtigt werden, als dies bei Großunternehmen der Fall ist (Fueglistaller 2004). Trotz der guten Ausgangsbasis für strukturelle Anpassungen liegen KMU bei der tatsächlichen Realisierung von größeren Veränderungen der Organisation hinter Großunternehmen. Dies lässt sich vor allem auf die vergleichsweise geringen Ressourcen und den damit zusammenhängenden zusätzlichen personellen Aufwand für die einzelnen Mitarbeiter zurückführen (Rosetti/Langhoff 2016; Frey 2016). Vorwiegend haben KMU eine höhere Ausprägung der Prozessorientierung gegenüber Großunternehmen (Crespo Otano 2012; Dombrowski et al. 2015a).

Bezüglich ihrer **Strategie** (3) sind KMU eher spezialisiert ausgerichtet und verfügen in einem bestimmten Nischenbereich über ausgeprägte Kernkompetenzen. Eine breite Aufstellung der Kompetenzen ist vor allem Basis der geringeren verfügbaren Ressourcen nicht möglich (Crespo Otano 2012; Dombrowski/Karl 2016).

**Personal und Mitarbeiter** (4): KMU besitzen bei der ohnehin geringen Anzahl an Mitarbeitern einen geringen Anteil an Akademikern. Grundsätzlich haben sie größere Probleme bei der Akquise neuer qualifizierter Mitarbeiter (Dombrowski/Karl 2016). KMU verfügen personell über geringe Ressourcen, was ihre Wettbewerbsstrategien im Vergleich zu Großunternehmen einschränkt (Fueglistaller et al. 2012). Infolgedessen verfügen KMU selten über eigenständige Abteilungen, die sich mit spezifischen Aufgaben, wie z. B. der Entwicklung und Implementierung neuer Technologien, auseinandersetzen (Bracht/Masurat 2002). Bei Großunternehmen sind in der Regel mehr spezialisierte Bereiche vorzufinden (Fueglistaller et al. 2012). Dementsprechend müssen sich Mitarbeiter von KMU neben ihren Aufgaben des täglichen Geschäfts auch mit kreativen provisorischen Maßnahmen beschäftigen, um eine Fabrik am Laufen zu halten. Aus diesem Grund werden Neuplanungsmaßnahmen erst beim Erreichen eines kritischen Stands, bei dem die Produktion sich beeinflusst sieht, durchgeführt (Bracht/Masurat 2002). Weiterhin sind KMU in ihren Ausgaben für Arbeitskräfte und ihren finanziellen Ressourcen eingeschränkt, was einen negativen Effekt auf Investitionsprojekte hat (Fueglistaller et al. 2012). Die Schwachstelle liegt in diesem Fall nicht bei den Mitarbeitern eines Unternehmens, sondern bei Zeit- und

Kapazitätsbegrenzungen, die als Barriere zur Umsetzung dieser Ideen auftreten (Bracht/Masurat 2002; Crespo Otano 2012; Dombrowski/Karl 2016).

Im Rahmen der **Forschung und Entwicklung** (5) sind KMU kurzfristig orientiert. Es existiert keine dauernd institutionalisierte FuE-Abteilung, wodurch vermehrt eine reaktive statt aktive Forschung stattfindet. Trotzdem können Innovationen bei KMU aufgrund der Organisationsstruktur in kurzer Zeit eine hohe Marktreife erzielen (Becker/Ulrich 2011; Dombrowski/Karl 2016).

Die **Finanzierung** (6) ist ein wichtiges Unterscheidungskriterium zu den Großunternehmen. KMU verfügen nur über limitierte finanzielle Mittel und darüber hinaus nur einen begrenzten Zugang zum Kapitalmarkt. Im Falle einer wirtschaftlichen Krisensituation können sie in der Regel auf keine Unterstützung vom Staat zurückgreifen (Pfohl 2013; Crespo Otano 2012; Dombrowski/Karl 2016).

Zusammenfassend besitzen KMU zahlreiche – und einzeln betrachtete – Wettbewerbsvorteile für die Implementierung von Industrie 4.0-Applikationen. Doch trotz der genannten guten Voraussetzungen zeigen bestehende Studienergebnisse, dass KMU diese Vorteile bei der Implementierung nicht ausschöpfen können (Schröder 2016; DIHK 2015; Leyh et al. 2018). Insbesondere KMU, die den Motor der deutschen Wirtschaft darstellen, besitzen somit eine schlechte Ausgangslage für die Einführung von Industrie 4.0, obwohl sie selbst das Nutzenpotenzial für das eigene Unternehmen als hoch bewerten. Auf Basis der erarbeiteten Erkenntnisse können zu den Bereichen Mensch, Organisation und Technik relevante Schlussfolgerungen subsumiert werden.

Im Bereich **Mensch** ist eine intensivere zeitliche und fachliche Unterstützung der Mitarbeiter in KMU für eine erfolgreiche Umsetzung von Industrie 4.0-Applikationen eher erforderlich als bei Mitarbeitern in Großunternehmen. Möglich ist dabei, dass die Unterstützung sowohl von Fachexperten als auch von einem technischen Assistenzsystem durch eine einfache Usability der Industrie 4.0-Applikation realisiert wird.

Im Bereich der **Organisation** steht die besonders positive Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der KMU einer fehlenden langfristig ausgerichteten Projektkoordination bei der Implementierung gegenüber (Reiner 2004; Frey 2016). Aufgrund dieses Defizits und der fehlenden Forschungserkenntnisse erfolgt von KMU oft eine vermehrt willkürliche Auswahl von Industrie 4.0-Applikationen. Besonders die geringe Formalisierung von Entscheidungsprozessen und die flachen Hierarchien in

KMU führen zu vorschnellen und umfassenden Projektentscheidungen, die oft auf einer mangelnden Potenzialabschätzung und unzureichenden Nutzentransparenz beruhen. Gerade kleinere Projekte scheinen aus diesem Grund für KMU eine hohe Erfolgswirksamkeit zu besitzen. Größere Projekte werden aufgrund der fehlenden strategischen Einbindung in die Unternehmensausrichtung frühzeitig verworfen. Auch die bereits gute Prozessorientierung muss weiter ausgebaut werden, da diese als Grundlage einer erfolgreichen Implementierung gilt.

Im Bereich der **Technik** stehen die hohen Investitionen und geringe Ressourcenverfügbarkeit im Zentrum der Voraussetzungen. Die thematische Komplexität und die zum Teil hohen Investitionskosten lassen speziell KMU zögern, Industrie 4.0-Applikationen umzusetzen. Hieraus lassen sich Anforderungen an geringe Projektkosten und schnelle Implementierungszeiten bei flexiblen Einsatzszenarien an die Technologie ableiten. Das Projekt muss durch begrenzte finanzielle Mittel und eine unkomplizierte Planung für KMU überschaubar bleiben.

Die skizzierten Defizite führen dazu, dass eine Realisierung der möglichen Potenziale aktuell verhindert wird. Trotz der thematisierten Besonderheiten der KMU bleibt unklar, welche konkreten Anforderungen für die erfolgreiche Implementierung erforderlich sind. Es ist daher notwendig, den Themenbereich der Industrie 4.0 in KMU eingehender zu betrachten.

## 9. Industrie 4.0 im KMU

Nachdem im vorigen Kapitel auf die spezifischen Besonderheiten eingegangen wurde, wird in diesem Kapitel zunächst auf die Grundlagen der Industrie 4.0 eingegangen. Im Anschluss erfolgt dann eine Analyse, wie an welchen Stellen KMU bei der Implementierung von Industrie 4.0 Schwierigkeiten haben.

### 9.1. Grundlagen der Industrie 4.0

Seit der Verkündigung der Industrie 4.0 auf der Hannover Messe im Jahr 2011 wird der Ansatz von Wissenschaft, Wirtschaft und Politik intensiv diskutiert und erforscht. Es wurden viele Artikel zu Industrie 4.0 veröffentlicht, in denen versucht wird, den Begriff Industrie 4.0 mit mehreren Begriffen, Definitionen und Beschreibungen zu interpretieren (Tschöpe et al. 2015). Allerdings werden in diesen Artikeln viele verschiedene Begriffe zur Beschreibung von Industrie 4.0 verwendet. Beispielsweise beschreiben Sensoren und Aktoren oder RFID (z. B. Hochfrequenz-Identifikation) und Virtual Reality verschiedene Technologien

der Industrie 4.0, die auf dem Shopfloor zur Daten- und Informationsaufnahme und -ausgabe genutzt werden können. Weitere Begriffe der Industrie 4.0, wie beispielsweise die horizontale und vertikale Integration oder die Transparenz und Flexibilität, beschreiben Merkmale von Industrie 4.0, die auf die Prozessebene eines Unternehmens wirken und die Prozessgestaltung bzw. die Eigenschaften der Prozesse beeinflussen. Die verschiedenen Begriffe, Definitionen und Beschreibungen konzentrieren sich auf verschiedene Aspekte und Ebenen der Industrie 4.0, wodurch eher Verwirrung als Klarheit erzeugt wird.

Laut einer Studie gaben jedoch 50 % der analysierten Unternehmen an, dass die Komplexität von Industrie 4.0 ein großes Hindernis für die Umsetzung von Industrie 4.0 darstellt (statista 2017a). Es wird deutlich, dass derzeit kein einheitliches Verständnis bezüglich Industrie 4.0 bei allen Stakeholdern sichergestellt werden kann. Ein explizites und konsistentes Verständnis und eine gemeinsame Sichtweise sind jedoch eine notwendige Voraussetzung für die Umsetzung von Industrie 4.0. Linguistische und konzeptionelle Ungenauigkeiten und Missverständnisse sind Hindernisse für die Umsetzung von Industrie 4.0 (Pfrommer et al. 2014). Um den genannten Hindernissen und Herausforderungen zu begegnen, wird ein einheitliches Verständnis aller Stakeholder der Industrie 4.0 benötigt. Die vorhandenen Industrie 4.0 Modelle (z. B.: RAMI (DIN SPEC 91345:2016-04 2016), SIMMI 4.0. (Leyh et al. 2016)) haben eher einen IT-Hintergrund fokussieren technische Aspekte. Bei der Implementierung von Industrie 4.0 muss ein gemeinsames Verständnis auf allen Ebenen des Unternehmens entstehen und das Modell sowohl von Mitarbeitern auf dem Shopfloor, den Mitarbeitervertretern, den Produktionsplanern und IT-Entwicklern als auch Führungskräften und Prozessingenieuren verstanden werden.

Das Grundmodell der Datenverarbeitung wird als EVA-Prinzip (Eingabe – Verarbeitung – Ausgabe) beschrieben und stellt dar, wie Daten von Computern verarbeitet werden. Die Daten werden durch Eingabegeräte, wie beispielsweise eine Tastatur oder eine Maus, in den Computer eingegeben und anschließend von diesem verarbeitet. Die Ausgabe der Daten erfolgt dann beispielsweise über einen Bildschirm oder es wird ein Druckauftrag angestoßen.

Wird dieses Prinzip auf die Datenverarbeitung und den Datenfluss in der Produktion der Zukunft übertragen, wird deutlich, dass auch in der Industrie 4.0 das EVA-Prinzip in den Grundzügen weiterhin Gültigkeit besitzt und als allgemeines generisches Modell oder Prinzip bestehen bleibt. Die Art und Weise, wie die Dateneingabe (Eingabe: E) auf dem Shopfloor, die Verarbeitung und Analyse (Verarbeitung: V) sowie die

Ausgabe und Nutzung dieser Daten (Ausgabe: A) zukünftig umgesetzt werden, wird sich im Rahmen der Industrie 4.0 jedoch drastisch ändern.

Zur Einordnung der Unternehmens-EDV und der verschiedenen in der Produktion angewandten IT-Systeme wird die Automatisierungspyramide genutzt. Diese Automatisierungspyramide ist in verschiedene Ebenen unterteilt und erlaubt eine einfache visuelle Darstellung der verwendeten EDV-Systeme in Bezug auf die Ebene der Automatisierung in der Produktion bzw. im gesamten Unternehmen. Diese Automatisierungspyramide beschreibt somit, wie Daten auf unterster Ebene, der Feldebene, aufgenommen und (teilweise) in die nächsten Ebenen weitergegeben werden (DIN EN 62264:2013). Die Daten werden nicht konsistent und einheitlich auf allen Ebenen weitergegeben und stehen somit nicht in jeder Ebene und jedem System zur Verfügung. Zukünftig werden mehr Daten aufgenommen und wachsende Ansprüche an die Verwertung der Daten gestellt. Gartner schreibt in diesem Zusammenhang von Big Data und hat dazu das 3V-Modell entwickelt. Dieses Modell beschreibt, dass das Datenvolumen (Volume) zunimmt, die Geschwindigkeit der Datenerzeugung und -verarbeitung (Velocity) steigt und sich die Datenvielfalt (Variety) ausweiten wird. (Gartner 2016) Basierend darauf ist davon auszugehen, dass die Automatisierungspyramide mit den klar abgegrenzten hierarchischen EDV-Ebenen an ihre Grenzen stoßen wird (Siepmann 2016). Im Rahmen der Industrie 4.0 und der einhergehenden vertikalen Integration werden zukünftig jedem System in Echtzeit alle relevanten Daten zur Steuerung, Regelung und Optimierung des Prozesses zur Verfügung stehen. Ermöglicht wird dies, wie oben beschrieben, durch die technischen Veränderungen wie das neue Internetprotokoll IPv6, das damit einhergehende Internet der Dinge, die Reduzierung und Vereinheitlichung der IT-Schnittstellen zu einheitlichen Standards sowie die Nutzung von Smart Devices, smarten Algorithmen und Cloud-Services.

Übertragen auf das EVA-Prinzip bedeutet dies, dass Daten zukünftig beispielsweise in der Produktion gesammelt werden. Die Dateneingabe geschieht jedoch zukünftig nicht mehr nur durch Tastaturen usw., sondern durch smarte Mensch-Maschine-Schnittstellen wie beispielsweise Datenbrillen oder Smart Watches. Zudem werden Sensoren kontinuierlich zu embedded systems und cyber-physical systems weiterentwickelt. Diese Sensoren, die an Maschinen, Produkten oder Objekten angebracht oder durch Menschen bedient werden, können somit Daten erfassen und eigenständig über das Internet der Dinge verteilen. Dies bedeutet im Wesentlichen, dass die gesammelten Daten auf dem Shopfloor, direkt und in Echtzeit über das Internet der Dinge an Cloud-Computer

übertragen werden, ohne die derzeit vorhandene Automatisierungspyramide und ihre Schnittstellen und Ebenen zu verwenden. Da alle Daten ungefiltert durch die Automatisierungspyramide jederzeit zur Verfügung stehen, wird die Datenkonsistenz im gesamten Prozess sichergestellt. Diese Daten werden dann anhand von Algorithmen, grafischen Datenbanken und der künstlichen Intelligenz analysiert und die Systeme kontinuierlich zu selbstlernenden Systemen weiterentwickelt. Anschließend werden diese Daten über das Internet der Dinge entweder direkt an Aktoren im Prozess oder an Mensch-Maschine-Schnittstellen in der Fertigung übertragen und ausgegeben. So wird der Prozess auf der Fertigungsebene entweder automatisch von diesen Daten gesteuert oder diese Daten werden dem Mitarbeiter durch die Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Verfügung gestellt, um entsprechend in der Fertigung Prozesse anpassen und übernehmen zu können (Dombrowski/Richter 2016; Dombrowski et al. 2017b; Lanza/Nyhuis 2016). Berücksichtigt man die horizontale Integration, können die Daten ebenfalls von abteilungsübergreifenden Systemen genutzt werden. Dies ermöglicht zunehmend die horizontale Integration von Abteilungen oder allen Stakeholdern wie beispielsweise Kunden und Lieferanten entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Durch die oben beschriebene smarte und digitale Vernetzung von Maschinen, Produkten, Objekten und Menschen in Echtzeit werden spezifische Eigenschaften entwickelt, die der Industrie 4.0 zugeordnet werden können und durch diese erst entstehen. Diese spezifischen Eigenschaften kreieren dann den eigentlichen Mehrwert der Industrie 4.0 für das Management von Unternehmensprozessen (Dombrowski et al. 2017c). Das beschriebene EVA-Prinzip in der Industrie 4.0 ist exemplarisch in der Abbildung 3 dargestellt.

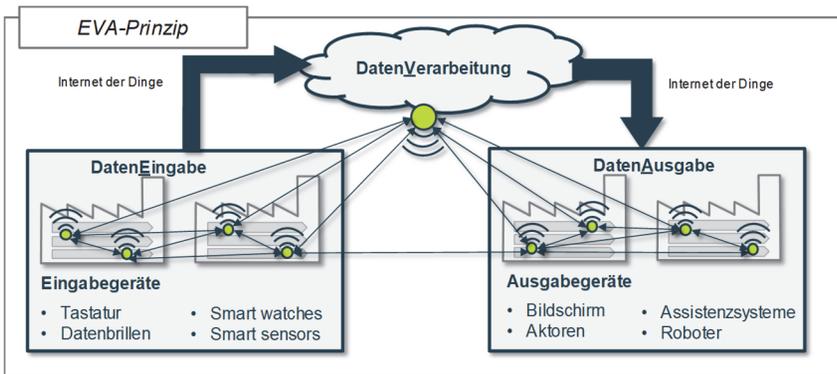


Abbildung 3: EVA-Prinzip in der Industrie 4.0.

## 9.2. Soziotechnisches System „Ganzheitliches Produktionssystem 4.0“

In der Vergangenheit haben Unternehmen Ganzheitliche Produktionssysteme (GPS) eingeführt, um effiziente und zielgerichtete Prozesse zu schaffen. So werden Prozesse und Verfahren von Fertigungsunternehmen derzeit nach Lean-Prinzipien und -Methoden gestaltet. Ein GPS kann nach VDI 2870 als „*ein unternehmensspezifisches methodisches Regelwerk zur kontinuierlichen Orientierung aller Unternehmensprozesse an dem Kunden*“ (VDI 2870 2012) beschrieben werden, und verfolgt das Ziel einer systematischen und kontinuierlichen Reduzierung von nicht wertschöpfenden Aktivitäten und die Ausrichtung aller Prozesse auf die Kundenperspektive. GPS zielen darauf ab, einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess (KVP) innerhalb des gesamten Unternehmens zu erreichen. Inzwischen haben sich Ganzheitliche Produktionssysteme (GPS) in fast allen Branchen etabliert und mittlerweile haben bereits 90 % der produzierenden Unternehmen die Prinzipien und Methoden von GPS in die Produktion implementiert (Glass et al. 2016; Staufen 2015). Spätestens mit der Veröffentlichung der VDI 2870 sind GPS somit zu einem Industriestandard geworden. Die Prozesse und Abläufe dieser Unternehmen sind oft nach den GPS-Prinzipien strukturiert und organisiert, wobei unterschiedliche unternehmensspezifisch konfigurierte Methoden des GPS zum Einsatz kommen. Ein GPS ist, ähnlich wie der Ansatz der Industrie 4.0, als ein soziotechnisches System zu verstehen (Kuhlang et al. 2014; Dombrowski/Richter 2016). Ein soziotechnisches System besteht aus einem technischen System und einem sozialen System, die in einer bestimmten Art und Weise einen Input zu einem Output verarbeiten und in Wechselwirkung zueinander stehen (Schlick et al. 2018). Strohm und Ulrich haben 1997 an der ETH Zürich basierend auf dem soziotechnischen Systemansatz eine Bewertung des soziotechnischen Arbeitssystems hinsichtlich der Ebenen Mensch - Technik - Organisation (MTO-Modell)<sup>1</sup> entwickelt (Strohm/Ulrich 1997). GPS im Sinne eines soziotechnischen Systems forcieren allerdings derzeit auf die Ebenen Mensch und Organisation - siehe Abbildung 4 - *linker Teil*. Wie bereits bei der Beschreibung der Industrie 4.0 in den vorherigen Kapiteln deutlich wird, fokussiert Industrie 4.0 eher den technischen Aspekt des soziotechnischen Systems. Diese technischen Aspekte werden dennoch in ein soziotechnisches System implementiert, wodurch ebenfalls die Ebenen Mensch und Organisation berücksichtigt werden

---

<sup>1</sup> Aufgrund der Bedeutung der Organisation wird das MTO-Modell in diesem Beitrag als MOT-Modell bezeichnet

müssen, um ein Arbeitssystem in der Industrie 4.0 ganzheitlich zu betrachten. Wie bereits beschrieben, sind GPS derzeit in vielen Unternehmen implementiert und das Produktionssystem nach den GPS-Methoden und -Werkzeugen strukturiert. Demzufolge ist ein GPS in zweierlei Hinsicht die Basis für die Implementierung von Industrie 4.0. Zum einen ist das existierende soziotechnische Produktionssystem nach GPS aufgebaut und zum anderen wird durch die Berücksichtigung eines GPS bei der Implementierung von Industrie 4.0 die Ebenen Mensch und Organisation berücksichtigt, um so ein soziotechnisches System ganzheitlich zu beschreiben. Im Zuge dessen muss ein Ganzheitliches Produktionssystem 4.0 entwickelt werden, um ein ausgeglichenes System von Mensch, Organisation und Technik herstellen zu können - siehe Abbildung 4 (Dombrowski et al. 2015b).

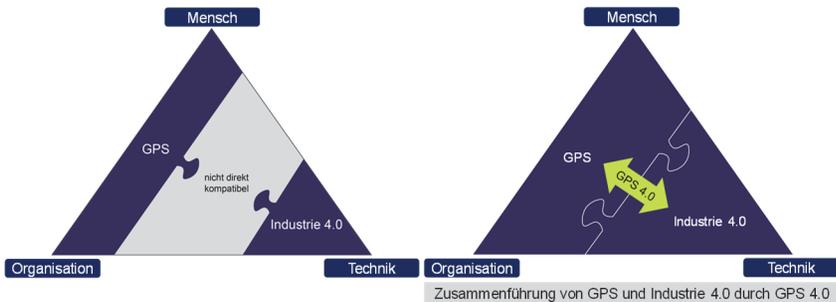


Abbildung 4: Mensch, Organisation und Technik.

Eine detaillierte Literaturanalyse zeigt, dass der Einsatz moderner Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) die Leistungsfähigkeit von GPS durch effizientere Produktions- und Logistikprozesse verbessern kann (Dombrowski et al. 2017c). Zudem wird in zwei Drittel der analysierten Artikel ausdrücklich darauf hingewiesen, dass Lean die Grundlage für Industrie 4.0 bildet. Der Ordnungsrahmen GPS (Abbildung 5) mit der durchgängigen Struktur von Zielen, Prozessen, Prinzipien, Methoden und Werkzeugen wird weiterhin für zukünftige Produktionssysteme von größter Bedeutung sein und sogar an Bedeutung gewinnen, wenn eine nutzenbringende, zielorientierte Auswahl und Implementierung von Industrie 4.0 von Unternehmen und speziell von KMU forciert wird. Dennoch ist das Datenmanagement und die Bereitstellung der erforderlichen Daten und Informationen eine Voraussetzung, um das eigentliche Industrie 4.0-Potenzial und die einhergehenden Industrie 4.0-Eigenschaften zum Management von Prozessen und

Arbeitsabläufen zu generieren. Daten werden zukünftig von verschiedenen Anwendungen und IT-Systemen ausgewertet und sowohl durch Algorithmen zur Steuerung der Prozesse als auch durch Menschen zur Entscheidungsfindung und Prozessoptimierung genutzt. Dieser Aspekt kann im GPS auf Prozessebene als Datenmanagement zusammengefasst und in den GPS-Ordnungsrahmen integriert werden. Wie beschrieben, muss Industrie 4.0 unter Berücksichtigung eines GPS implementiert werden. Die Industrie 4.0-Technologien beeinflussen die existierenden und beschriebenen Methoden und Werkzeuge eines GPS zukünftig mit differenter Signifikanz. GPS-Methoden und -Werkzeuge werden in einer Smart Factory ggf. an Bedeutung verlieren oder durch die Anwendung von Industrie 4.0-Elementen optimiert, wodurch neue Best Practices zur Umsetzung der GPS-Methoden und -Werkzeuge entstehen. Zudem werden ggf. neue Methoden und Werkzeuge entwickelt und in einem GPS 4.0-Methodenkatalog integriert. Der Ordnungsrahmen eines GPS 4.0 ist in Abbildung 5, rechte Seite, dargestellt.

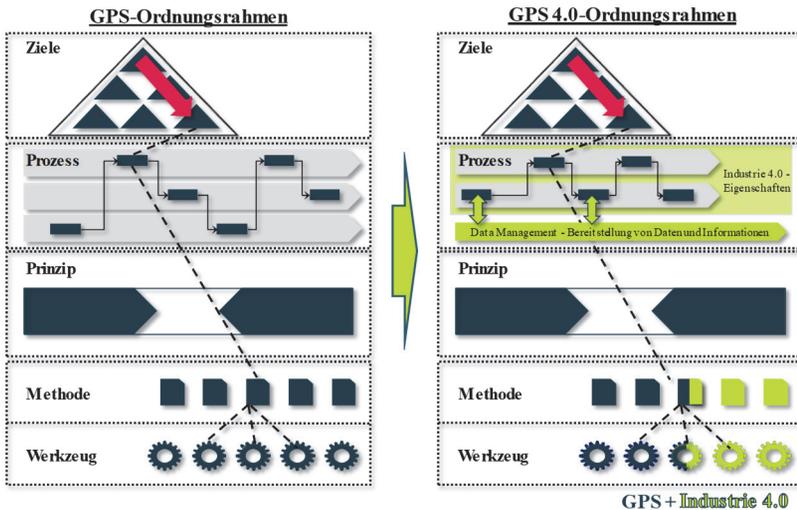


Abbildung 5: Ordnungsrahmen GPS 4.0.

### 9.3. Ganzheitliches Produktionssystem 4.0 im KMU

Wie bereits hergeleitet, bestehen Unterschiede zwischen Großunternehmen und KMU hinsichtlich Mensch, Organisation und Technik - siehe Kapitel 2. Dies hat somit auch direkten Einfluss auf die Implementie-

rung von Industrie 4.0 und stellt KMU nochmals vor besondere Herausforderungen. Basierend auf Experteninterviews und den Erfahrungen aus diversen Projekten zur Implementierung von Industrie 4.0 des Instituts für Fabrikbetriebslehre und Unternehmensforschung der TU Braunschweig, wurden Aspekte, die bei der Implementierung von Industrie 4.0 berücksichtigt werden müssen, hinsichtlich den Ebenen Mensch, Organisation und Technik für KMU analysiert. Diese werden im Folgenden exemplarisch erläutert.

***Mensch:*** Der Mensch wird in dem soziotechnischen System der Industrie 4.0 weiterhin als Prozesseigner im Mittelpunkt des Arbeitssystems stehen. Bei der Arbeit auf dem Shopfloor wird der Mensch zukünftig weniger „Handarbeit“ und mehr „Kopfarbeit“ leisten. Wie bereits beschrieben, haben speziell KMU die Besonderheit, tendenziell eher Generalisten als Spezialisten zu beschäftigen, wodurch bei der Implementierung von Industrie 4.0 speziell die **Qualifikation** und Sensibilisierung der Mitarbeiter berücksichtigt werden muss. Aus den Erfahrungen bei der Implementierung von Ganzheitlichen Produktionssystemen muss die Implementierungsorganisation berücksichtigt werden. Die mangelnden Ressourcen an GPS 4.0-Experten und die Auslastung durch das Tagesgeschäft führen dazu, dass davon auszugehen ist, dass Industrie 4.0-Technologien neben den bestehenden Aufgaben und Projekten mit den vorhandenen Ressourcen durchgeführt werden müssen. Dieser Aspekt führt dazu, dass KMU zusätzliche Schwierigkeiten haben, eine erfolgreiche Industrie 4.0-Implementierung durchzuführen.

Für die neuen Technologien und die ggf. neuen Prozesse und Abläufe müssen Mitarbeiter sensibilisiert und in die Planung miteingebunden werden, um die **Akzeptanz** bezüglich neuer Technologien zu fördern. Diese Bereitschaft zum Wandel hin zu einer Digitalisierung der Produktion bzw. die entsprechende Unternehmenskultur muss somit ebenfalls vor der Implementierung von Industrie 4.0 und Technologieauswahl bewertet werden und sollte speziell bei KMU Bestandteil des Industrie 4.0-Implementierungsprozesses sein. Sind die Mitarbeiter nicht bereit für den Wandel, müssen hier ebenfalls Maßnahmen, beispielsweise aus dem Change-Management oder der Mitarbeiterqualifizierung, durchgeführt werden, um die Sensibilisierung der Mitarbeiter zu unterstützen und die notwendige Bereitschaft zur digitalen Transformation zu stärken.

Durch die zur Verfügung stehenden Daten und der ggf. aufzunehmenden persönlichen Daten der Mitarbeiter spielt bei der Implementierung von Industrie 4.0 der **Datenschutz** eine wichtige Rolle. Dieser wird in großen Unternehmen häufig durch Kooperationen von internen Experten, Datenschutzbeauftragten und Mitarbeitervertretern sichergestellt

und ist bei der Implementierung von Industrie 4.0 explizit zu berücksichtigen. Hier stehen KMU ebenfalls vor besonderen Herausforderungen, da hier oftmals keine internen Experten vorhanden sind und somit externe Berater hinzugezogen und beauftragt werden müssen.

Industrie 4.0 soll Mitarbeiter dazu befähigen, dezentral, eigenständig Entscheidungen zu treffen. Hierbei spielt die Entscheidungsfreiheit der individuellen Mitarbeiter eine wichtige Rolle und Mitarbeitern soll zunehmend mehr **Entscheidungskompetenz** übertragen werden. Diese Mitarbeiter müssen diese Entscheidungskompetenz allerdings annehmen und darüber hinaus auch haben wollen, denn "wer entscheidet, verantwortet auch". Nichtsdestotrotz müssen Mitarbeiter alle für die entsprechende Entscheidung relevanten Daten aufbereitet zur Verfügung gestellt bekommen, um basierend auf den Daten eine Entscheidung treffen zu können. Das Unternehmen wächst somit zunehmend zu einer „*data-driven-decision-making (DDDM)*“ Organisation. Bei mittelständischen Unternehmen trifft häufig der Eigentümer die Entscheidungen, teilweise basierend auf seinem Bauchgefühl, hier könnte die Entscheidungskompetenz durch die zur Verfügung stehenden Daten verbessert werden. Entscheidungskompetenz setzt immer voraus, dass Mitarbeiter auch Entscheidungen treffen wollen. Mitarbeiter in KMU sind dies ggf. nur zu einem gewissen Maße gewohnt, weshalb es ihnen schwerfallen kann, die Entscheidungskompetenzen anzunehmen und Entscheidungen treffen zu wollen. Dies ist von der Unternehmenskultur abhängig, jedoch gilt es diesen Punkt gesondert für KMU zu berücksichtigen, da dies zu einer nicht erfolgreichen Umsetzung von Industrie 4.0 bzw. von dezentralen Entscheidungen führen kann.

**Organisation:** Im Bereich der Organisation entstehen bei der Implementierung von Industrie 4.0 bestimmte Merkmale, die auf die Gestaltung des soziotechnischen Systems Einfluss haben. Diese Merkmale müssen ebenfalls bei der Implementierung von Industrie 4.0 in KMU berücksichtigt werden. Zum einen ist im Kontext der Entwicklung eines Ganzheitlichen Produktionssystems 4.0 der derzeitige Umsetzungsstand bzw. **Reifegrad** des soziotechnischen Systems hinsichtlich **Ganzheitlichen Produktionssysteme** zu bewerten. Hier muss zunächst sichergestellt werden, dass die Prozesse nach GPS-Prinzipien gestaltet sind, oder durch Industrie 4.0 bedingte Prozessanpassungen nach GPS-Prinzipien gestaltet werden. Jedoch haben hier KMU, wie bereits im zweiten Kapitel erwähnt, im Gegensatz zu großen Unternehmen strukturelle Vorteile.

Zudem müssen die Prozesse im Unternehmen effizient gestaltet und entsprechend beschrieben sein. Sind die Prozesse nicht ganzheitlich, mit

Input, Output, Zielgrößen und Kennzahlen beschrieben und liegen keine **Prozessbeschreibungen** vor, führt dies zu Schwierigkeiten bei der Digitalisierung von Prozessen und der Implementierung eines GPS 4.0. Nur durch eine ganzheitliche Beschreibung der Prozesse kann eine zielorientierte Implementierung von Industrie 4.0 sichergestellt werden. In KMU sind diese Beschreibungen häufig nicht ausreichend, sodass hier zunächst eine ausführliche Prozessbeschreibung sichergestellt werden muss.

Bei der Implementierung von Industrie 4.0 ist zudem die **Prozessorientierung** zu beachten. Ein Prozess eine wiederkehrende Abfolge von Tätigkeiten in Vorgänger-Nachfolger-Beziehung, mit definiertem Anfangs- und Endzeitpunkt. Das Ziel eines Prozesses ist es, wertsteigernd Inputs in Outputs zu transformieren (Binner 2002). Jeder (Teil-) Prozess im Unternehmen besitzt dabei einen Kunden und einen Lieferanten (Imai 2012). Dies bedeutet, dass Prozessketten stets als Kunden-Lieferanten-Beziehung zu verstehen sind (Dombrowski/Mielke 2015). Ein Prozess ist demnach eine Folge von zielorientierten Aktivitäten, die einen messbaren Mehrwert für den Kunden generieren, die Zielerreichung des Unternehmens unterstützen und nach bestimmten Regeln durchgeführt werden (Binner 2010; VDI 2870 2012). Organisationen, welche prozessorientiert agieren, orientieren sich damit am Markt und somit an den Anforderungen und Wünschen des Endkunden. Nur durch die Prozessorientierung kann sichergestellt werden, dass Industrie 4.0 nutzenbringend und zielführend implementiert wird.

Bei der Implementierung von Industrie 4.0 muss zunächst eine **Projektorganisation zur Implementierung** erstellt und im Sinne des Projektmanagements verschiedene Gremien (beispielsweise. Projektteam, Lenkungskreis, Expertenteam etc.) gebildet werden. Die Gestaltung des Projektteams und der weiteren Gremien ist unternehmensindividuell zu konfigurieren. Nichtsdestotrotz wird empfohlen, bestimmte Rollen wie beispielsweise Industrie 4.0 Experten, Prozesseigner, Mitarbeitervertreter und IT-Spezialisten in das Projektteam zu integrieren. Des Weiteren muss individuell festgelegt werden, ob die Implementierung, in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Ressourcen, in Form einer Matrixorganisation, Projektorganisation etc. erfolgen wird. Hier bestehen speziell bei KMU Hindernisse, da sie nicht alle Rollen besetzen können und nicht ausreichend Ressourcen und Kapazitäten für die Abarbeitung der im Projekt der Industrie 4.0-Implementierung anfallenden Aufgaben haben.

*Technik*: Für Unternehmen und speziell KMU ist es wichtig, sich mit den technologischen Entwicklungen auseinanderzusetzen und als Handlungsfelder für Prozessoptimierungen und Problemlösungen zu berücksichtigen. Für Digitalisierungslösungen stehen der produzierenden Industrie dazu unterschiedlichste Technologien zur Verfügung. Eine gute erste Übersicht über die **Eignung einer Technologie** vermittelt der sogenannte Technology Hype Cycle für innovative Technologien, veröffentlicht von Gartner, einem führenden Technologie-Analysten, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** (Panetta 2017). Auf der x-Achse ist die Zeit und auf der y-Achse die Aufmerksamkeit bzw. die Erwartungen an die Technologien dargestellt. Die Grafik ordnet die Technologien ihren Lebensphasen zu, ausgehend von dem Erkennen der Technologie (technologischer Auslöser) über die Spitze der Erwartungen, das Tal der Desillusionierung und den Aufstieg zur Erleuchtung bis zum Plateau der Produktivität.

Weiterhin ist für die Technologien das Plateau der Produktivität angegeben, in dem ihre Praxisreife und die Vorteile der Technologie anerkannt und bereits verschiedene Entwicklungsstufen durchlaufen worden und mehrere Generationen auf dem Markt verfügbar sind. So ist davon auszugehen, dass die Technologien, die auf dem Plateau der Produktivität zu finden sind, ausgereift sind. Diese Technologien können somit ohne großes Risiko in Prozesse integriert und angewendet werden. Je weiter links die Technologie auf dem Hype-Cycle zu finden ist, desto weniger ausgereift ist die Technologie und desto riskanter ist die Anwendung und Applikation dieser Technologie in den Serienprozess. Diese Technologien bedürfen weiterer Forschungsaktivitäten und können nur mit erhöhtem Aufwand (ggf. zusätzliche Forschungsaktivitäten) und spezifischer Technologie Know-how implementiert werden. Zudem steigt das Risiko, dass die Technologie nicht den Erwartungen entspricht und somit keinen Nutzen für den Prozess erzeugen wird.

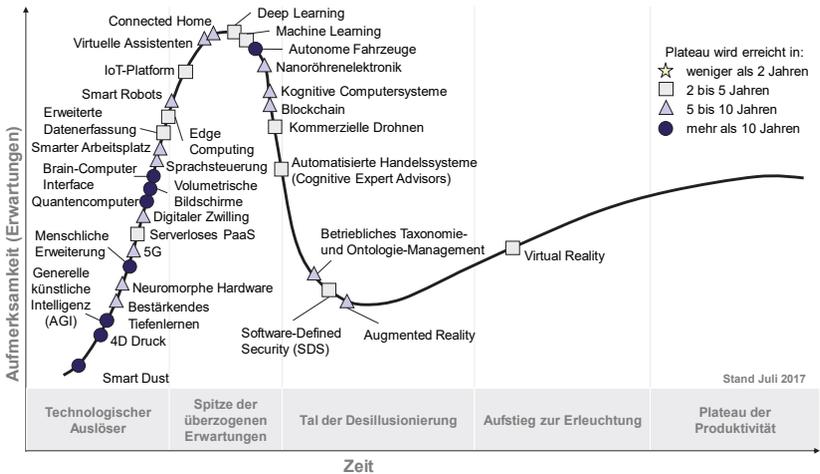


Abbildung 6: Hype-Cycle innovativer Technologien (Panetta 2017).

Aufgrund der zuvor beschriebenen spezifischen Besonderheiten und Herausforderungen kleiner und mittlerer Unternehmen sind nicht alle aufgeführten Technologien nutzenbringend für KMU zu implementieren und bei der Digitalisierung von Prozessen als Handlungsraum für KMU zu berücksichtigen. In der Wirtschaft und Industrie existieren diverse Gründe, um sich als Unternehmen mit Technologien der Industrie 4.0 auseinanderzusetzen. Diese liegen unter anderem in der Prozessoptimierung bestehender Prozesse, der Neuplanung von Prozessen und Produktionsequipment, der Fehlerbehebung durch Technologien der Industrie 4.0 und einer strategischen Entscheidung, sich mit dem Thema Industrie 4.0 zu beschäftigen und eine digitale Strategie oder digitale Roadmap zu entwickeln. Letzteres ist im Anwendermarkt häufig den großen Unternehmen vorbehalten, da die Technologien der Industrie 4.0 noch nicht erforscht und die Applikation der Technologien in die bestehenden Prozesse aufwendig ist und abhängig von der Technologie mit einem hohen Risiko verbunden ist. Dieses Risiko setzt sich aus den monetären Risiken aus Anschaffungskosten, der schwer zu prognostizierenden Potenziale und der technologischen Fähigkeit zur Applikation in einen Serienprozess (Serienfähigkeit) zusammen. Dies führt dazu, dass speziell KMU Technologien als potenzielle Handlungsfelder auswählen sollten, die ausgereift sind, sich aufwands- und risikoarm in die bestehenden Prozesse und in soziotechnische Systeme integrieren lassen. Ein weiterer wichtiger Faktor zur Auswahl von Technologien wird durch den Investitionsaufwand definiert. In Abbildung 7 wurde eine

Einteilung der Technologien der Industrie 4.0 laut Gartner Hyper Cycle exemplarisch vorgenommen.

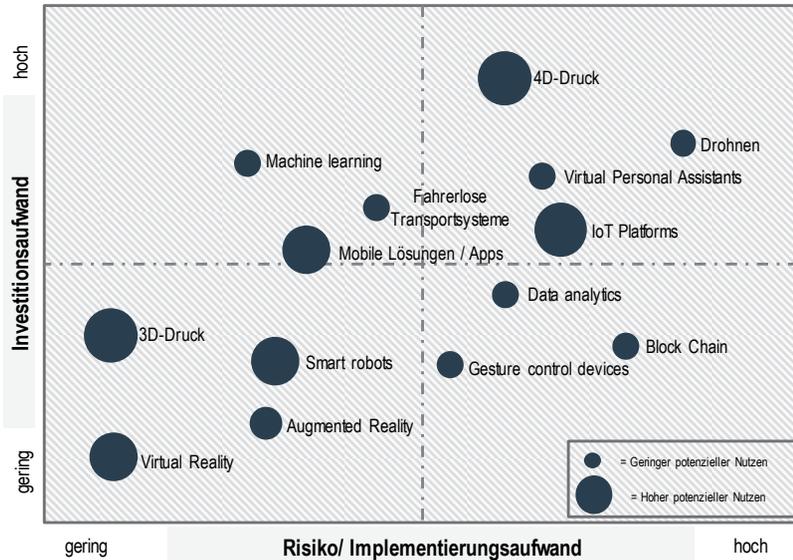


Abbildung 7: Potenzielle Technologien im Kontext der Industrie 4.0 für KMU.

Die Technologien wurden hinsichtlich Risiko, Investitionsaufwand und Nutzen bewertet. Nach dieser Bewertung und den zuvor dargelegten Ausführungen, sind die Technologien, die für KMU potenziell als Handlungsraum in Betracht gezogen werden, im Quadranten Risiko gering – Investitionsaufwand gering zu finden. Diese Auswahl kann jedoch nur als Indikator dienen, eine Bewertung der Technologien muss immer anhand der individuellen Rahmenbedingungen im Unternehmen erfolgen und bedarf einer systematischen Analyse und eines strukturierten Implementierungsvorgehens.

Neben der Technologieauswahl ist ein weiterer wichtiger Faktor bei der Implementierung von Industrie 4.0 die bestehende **IT- und Software-Infrastruktur**. KMU hinken hier meist dem auf dem Markt zur Verfügung stehenden Angeboten hinterher. Im Zuge dessen sind KMU zum einen „freier“ in der Auswahl der zukünftigen IT- und Software-Struktur. Zum anderen müssen hier ggf. zusätzliche Aufwände zur Erstellung der benötigten Infrastruktur berücksichtigt werden.

Zusätzlich zur Bewertung der Infrastruktur müssen die derzeitigen **Produktionsequipment und Maschinen** hinsichtlich der Eignung für die Industrie 4.0 berücksichtigt werden. Bei einer Brown-Field-Planung kommen hier ggf. ebenfalls zusätzliche Aufwände für Retro-Fit-Lösungen und Adaptieraufwände hinzu.

Der wohl wichtigste Aspekt, der sowohl Großunternehmen, als auch KMU daran hindert, Industrie 4.0 zu implementieren, ist die **IT-Sicherheit**. Hier müssen spezielle IT-Sicherheitskonzepte erstellt und umgesetzt werden. Auch hier haben KMU wenig Erfahrung und teilweise wenig Expertenwissen, was wiederum zu einem Hindernis hinsichtlich der Industrie 4.0-Implementierung führt.

## 10. Anwendungsbeispiele GPS 4.0 im Kontext KMU

Bisher konnten konkrete Defizite von KMU auf Basis ihrer Besonderheiten identifiziert und darauf aufbauend Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Eine exakte Technologieempfehlung und deren genaue soziotechnische Integration in das Unternehmen sind nicht möglich. Das GPS 4.0 ist immer individuell an die Rahmenbedingungen von KMU anzupassen. Um dennoch konkrete Möglichkeiten aufzuzeigen, sollen nachfolgend exemplarisch drei aktuelle Anwendungsbeispiele vorgestellt werden, die an aktuellen Forschungsbereichen des Instituts für Fabrikbetriebslehre und Unternehmensforschung an der TU Braunschweig angelehnt sind. Die Beispiele decken die Bereiche Smart Robots, Virtual Reality und Fahrerlose Transportsysteme (FTS) ab und sollen die Integration in das soziotechnische System von KMU verdeutlichen.

### 10.1. Anwendungsbeispiel 1: Smart Robots

Ursprünglich war der Einsatz von Robotern ausschließlich für hochautomatisierte Arbeitsabläufe vorgesehen. Für KMU bedeutete es in der Regel ein Verzicht auf diese Technologien, da sie im Widerspruch zu der notwendigen Flexibilität und vorhandenen finanziellen sowie personellen Ressourcen dieser Unternehmen standen (Matthias et al. 2013). So verlangte der Einsatz von Robotern qualifiziertes Fachpersonal, das mit der Roboterprogrammierung in C oder C++ bzw. für neue Roboter in Java vertraut sein musste.

Spätestens seit der Verbreitung von neuen Robotertechnologien im Zuge der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) entstehen neue Möglichkeiten der Integration von Robotern in die Produktions- und Montageprozesse. Bei der Mensch-Roboter-Kollaboration führen Mensch und Roboter Arbeitsschritte in einem Produktionsprozess gemeinsam

durch. Der Roboter assistiert dabei dem Mitarbeiter bei der Durchführung der Arbeit. Es findet eine Zusammenarbeit in einem gemeinsamen Arbeitsraum statt, bei der beide Kollaborationspartner spezifische Fähigkeiten optimal in einen gemeinsamen Produktionsprozess einbringen können. Das Aufweichen der strikten Arbeitstrennung führt zu neuen Anwendungsbereichen der Robotik, aber auch zu neuen sicherheitstechnischen Herausforderungen (Dombrowski et al. 2017d).

Im Center of Excellence for Lean Enterprise 4.0 wird am Institut für Fabrikbetriebslehre und Unternehmensforschung an der TU Braunschweig der Einsatz von MRK-Robotern erprobt. Hierbei wird unter anderem der Einsatz des MRK-Roboter Franka Emika für kleinere, wenig automatisierte Produktions- und Montagearbeitsplätze fokussiert. Es handelt sich somit um Einsatzgebiete, die auch bei vielen KMU vorherrschen. Entscheidende Kriterien für den hohen soziotechnischen Fit der neuen MRK-Roboter liegen für KMU in den geringen Kosten der Erstimplementierung sowie der intuitiven Programmierumgebung. Während die durchschnittlichen Kosten für die Implementierung klassischer industrieller Roboterzellen bei ca. 400.000 EUR liegen, beläuft sich der vergleichbare Umfang bei einem Franka Emika auf ca. 50.000 EUR<sup>2</sup>. In den Gesamtkosten enthalten ist die Anschaffung der Hardware für unter 10.000 EUR. Die Integration des Roboters in das soziotechnische System von KMU stellt sich im Anwendungsbeispiel als äußerst geeignet heraus. Im Versuchslabor hat die erstmalige Implementierung von Aufbau und Anlieferung bis zur ersten Inbetriebnahme in einem Anwendungsfall bei einem Mitarbeiter ohne Robotikkenntnisse weniger als zwei Stunden gedauert. Die Programmierung des Roboters erfolgt durch eine intuitive Schnittstelle, die über ein beliebiges mobiles Endgerät in einer Browseroberfläche aufgerufen werden kann. Anpassungen der Programmierung können durch diese Benutzerschnittstelle direkt durch den Werker vorgenommen werden. Die Anbindung des Roboters in das Unternehmensnetzwerk erlaubt es, die getätigte Programmierung sofort auf weitere Roboter zu übertragen. Zur Integration der Technik in die flexiblen Produktionsprozesse in KMU ist der Roboter im Anwendungsfall auf einen fahrbaren Rollwagen aus Aluminiumprofilen montiert und kann dadurch je nach Auftragslage und dem resultierenden Produktionsprogramm flexibel an beliebige Arbeitsstationen verschoben werden, an denen er durch einen Schnellverschluss arretiert wird. Am Arbeitsplatz verfügt der Roboter über insgesamt sieben Freiheitsgrade und kann unterschiedlichste Werkzeuge mit einer Nutzlast von bis zu 3 kg

---

<sup>2</sup> Der Gesamtkostenvergleich umfasst die Kosten für Roboterhardware, Installation, Programmierung und Mitarbeitertraining, Wartung, Werkzeuge und Betriebskosten.

bedienen. Die maximale Reichweite von 800 mm ist mit dem Griffbereich eines Mitarbeiters vergleichbar, wodurch am Arbeitsplatz keine größeren Anpassungen für den Roboter erforderlich sind. Mit seinen Drehmoment-sensoren in allen sieben Achsen kann der Roboter ohne einen Schutzzaun direkt mit dem Mitarbeiter zusammenarbeiten, wodurch die Flexibilität der Aufgaben- und Einsatzbereiche sehr stark erhöht wird. Der Greifer des Franka Emika ist kraftgesteuert und kann eine Kraft von bis zu 75 N aufbringen, ist dabei jedoch so sensibel, dass eine Verletzung des Menschen ausgeschlossen ist.

## 10.2. Anwendungsbeispiel 2: Virtual Reality (VR)

Ähnlich wie der kostspielige Robotereinsatz (vgl. Anwendungsbeispiel 1) war auch der Einsatz von VR-Anwendungen jahrelang nahezu ausschließlich Großunternehmen vorbehalten. KMU konnten auch hier aufgrund hoher Implementierungskosten und der hohen Obsoleszenz finanzieller Ressourcen die Erstinvestition und laufende Unterhaltung einer Cave Automatic Virtual Environment (CAVE) nicht für ihre Planungsprozesse einsetzen. Mit der CAVE können unterschiedliche Planungsbeteiligte in den aktuellen Planungsstand eintauchen und diesen gemeinsam diskutieren. Die Notwendigkeit, als Planungsbeteiligte ausschließlich mit 2D-Layoutplänen zu arbeiten, war nicht erforderlich. Aufgrund fehlender Fachabteilungen, beispielsweise im Bereich der Fabrik- und Produktionsplanung, war die nicht vorhandene dreidimensionale Aufbereitung aktueller Planungsstände besonders kritisch, da Planungsfehler erst sehr spät identifiziert wurden, woraus hohe Änderungskosten resultierten. Die CAVE fungierte neben der reinen immersiven Darstellung als Kommunikationsinstrument zwischen Planungsinvolverten.

Neue technologische Entwicklungen im Bereich der Head-Mounted-Displays ermöglichen heutzutage kostengünstige virtuelle Darstellungen. Hieraus resultieren neue Einsatzgebiete der VR-Technologien. Ein großes Defizit für KMU war lange Zeit die fehlende softwaretechnische Unterstützung der Hardware. Die Softwarelandschaft in KMU ist grundsätzlich sehr heterogen aufgebaut. Kostenintensive Gesamtlösungen waren aufgrund der nicht erforderlichen umfangreichen Programmfeatures und hohen Investitions- und Wartungskosten für KMU nicht erwünscht.

Damit KMU von den neuen technologischen Entwicklungen im Bereich der VR profitieren, ist eine Schnittstelle zwischen den bestehenden Softwareapplikationen erforderlich. Am Institut für Fabrikbetriebslehre und Unternehmensforschung kommt im VR-Labor eine sogenannte VR-Brücke zum Einsatz. Bei dieser VR-Brücke handelt es sich um eine

Schnittstellensoftware, für die kein Konvertieren der Daten zur VR-Darstellung notwendig ist. Dank der Open-GL-Basis ist die Software flexibel einsetzbar. Die Grafikdaten werden unmittelbar aus der CAD-Anwendung auf der Grafikkarte abgegriffen und mit Daten von Tracking- und Bewegungsinformationen angereichert. Die Brücke extrahiert die Grafikdaten direkt aus der laufenden Anwendungssoftware und portiert diese in eine VR-Umgebung. Dies ermöglicht eine perspektivische Berechnung an das Sichtfeld des Betrachters. Auf technischer Ebene erfolgt der Einsatz der VR-Brücke dabei auf Basis unterschiedlicher Stufen. Zunächst startet wie gewohnt die bestehende Anwendung der KMU. Für die Unternehmen ist dadurch keine kostspielige zusätzliche CAD- oder Planungssoftware erforderlich. Mithilfe der VR-Brücke werden die Grafikdaten des Programms erfasst, aus der laufenden Applikation kopiert und verschlüsselt via TCP übermittelt. Auf Basis der Konfigurations-, Grafik- und ggf. zusätzlicher Tracking-Daten erfolgt die dreidimensionale Darstellung, die von der VR-Brücke an die VR-Brille gesendet wird. KMU können mit diesem zentralen Baustein bestehende Anwendungen beibehalten und trotzdem von der VR-Darstellung profitieren.

### 10.3. Anwendungsbeispiel 3: Fahrerlose Transportsysteme (FTS)

Logistische Transporttätigkeiten wurden früher stets durch den Menschen und unter Zuhilfenahme von Hilfsmitteln, wie Handgabelhubwagen oder Gabelstaplern, ausgeführt. Heute hingegen werden im Zuge des voranschreitenden technologischen Wandels vermehrt hochautomatisierte, teils vollautonome Transportsysteme eingesetzt. Eine Technologieklasse, die sich bereits seit einigen Jahren in verschiedenen Branchen und Märkten etabliert hat, jedoch stets weiterentwickelt wird, ist die Gruppe der automatisierten Flurförderzeuge.

Bei diesen Transportlösungen, die häufig unter dem Begriff "Fahrerloses Transportsystem (FTS)" bekannt sind, handelt es sich gemäß VDI-Richtlinie 2510 um „*innerbetriebliche, flurgebundene Fördersysteme mit automatisch gesteuerten Fahrzeugen, deren primäre Aufgabe der Materialtransport, nicht aber der Personentransport ist*“ (VDI 2510). Die Definition verdeutlicht, dass FTS nicht als bloße Automatisierung von herkömmlichen Flurförderzeugen anzusehen sind, sondern als Gesamtsystem betrachtet werden müssen.

Die Einführung eines solchen Gesamtsystems in ein bestehendes Arbeitssystem von KMU geht somit weit über die bloße Beschaffung eines

automatisierten Transportfahrzeugs hinaus. Gemäß der soziotechnischen Herangehensweise, die in Kapitel 3 beschrieben wurde, sind bestehende Materialbereitstellungsprozessabläufe zunächst zu hinterfragen und nach den Prinzipien von GPS zu optimieren, ehe das technische System eingeführt werden kann. Somit wird sichergestellt, dass die Technologie einen Zielbeitrag im Sinne des gesamten Wertschöpfungsprozesses liefert. Zusätzlich ist die Wandlungsbereitschaft bei den Menschen, die gemeinsam mit dem System arbeiten und mit ihm interagieren sollen, herzustellen. Dazu ist bei den vornehmlich geringqualifizierten Mitarbeitern in KMU also besonderer Wert auf die Schaffung der Akzeptanz gegenüber dem Fahrerlosen Transportsystem zu legen.

Unter Berücksichtigung der vorangehend dargestellten Kosten-Risiko-Matrix (siehe Abbildung 7) im Handlungsfeld Technik ist die gute Eignung von FTS in KMU vorrangig dadurch zu begründen, dass Flurförderzeuge in verschiedenen Automatisierungsstufen bereits seit vielen Jahren am Markt etabliert sind und dadurch eine gewisse Reife erreicht haben. Dies spricht im Umkehrschluss für eine hohe technologische Fähigkeit zur Applikation in einem Serienprozess und damit für ein geringeres Implementierungsrisiko für KMU. Betrachtet man die verschiedenen Navigationsverfahren, mit denen FTS gesteuert bzw. geleitet werden können, so zeigt sich, dass keines der Verfahren einer hochtechnologischen IT-Landschaft bedarf. Neben dem Prinzip der „realen Leitlinien“, die beispielsweise in Form induktiver oder optischer Leitlinien im Hallenboden vorkommen, eignen sich in KMU insbesondere die Systeme, die einer virtuellen Leitlinie folgen (Hompel et al. 2007). So wurden in der Vergangenheit häufig Lösungen implementiert, bei denen jede Fahrweganpassung mit der aufwändigen Neuverlegung eines Fahrdrates im Boden verbunden war. Heutzutage werden häufig lasernavigierte Systeme verwendet, die durch ihre Flexibilität in der Positionsbestimmung überzeugen. Solche Systeme werden beispielsweise über selbstklebende reflektierende Folien umgesetzt, die an bestehenden Wänden, Regalen oder Maschinen befestigt werden. Die Reflexion eines ständig rotierenden Laserstrahls, der vom Fahrzeug ausgeht, wird von einer Diode erfasst und in Form von Positionsdaten durch den Fahrzeugrechner relativ zu den Reflektoren ermittelt. Weicht das Fahrzeug von seinem errechneten Fahrkurs ab, korrigiert der Fahrzeugrechner diese Abweichung und das Fahrzeug verbleibt stets auf seinem vordefinierten Fahrweg. Dieses Prinzip lässt sich flexibel im gesamten Produktionssystem ausweiten. Weiterhin ist die gute Eignung von FTS für KMU dadurch zu begründen, dass sich die Systeme schnittstellenunabhängig in bestehende Arbeitssysteme integrieren lassen. So besteht keine Notwendigkeit für die Anbindung vorhandener Lagerverwaltungs- oder

ERP-Systeme an die Leitsteuerung. Beispielhaft können vorhandene Lagerbereiche oder Materialstellplätze in KMU mit einfachen optischen Sensoren ausgestattet und überwacht werden. Über die vorhandene speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) des FTS, an die die Sensoren angebunden werden, wird dadurch die Kommunikation zwischen der physischen und der virtuellen Welt sichergestellt.

Die beschriebenen Erkenntnisse beruhen auf den praktischen Erfahrungen, die das Institut für Fabrikbetriebslehre und Unternehmensforschung im Rahmen von Forschungsk Kooperationen zusammen mit Unternehmen aus der produzierenden Industrie gesammelt hat.

## 11. Zusammenfassung

In den vorangegangenen Kapiteln konnte dargestellt werden, dass KMU aufgrund ihrer Besonderheiten im Gegensatz zu Großunternehmen vor spezifischen Herausforderungen stehen (vgl. Kapitel 2). Eine genauere Klassifizierung dieser Besonderheiten in Bezug auf die Implementierung von Industrie 4.0-Technologien in KMU konnte durch eine genauere Betrachtung der Industrie 4.0-Grundlagen unter Berücksichtigung der Ganzheitlichen Produktionssysteme im dritten Kapitel erfolgen. Es zeigte sich, dass für eine erfolgreiche Implementierung immer die Bereiche Mensch, Organisation und Technik zusammen erforderlich sind. Die zielgerichtete und systemische Abstimmung dieser Bereiche führt zu einem erheblichen Mehrwert; das Ganzheitliche Produktionssystem 4.0 entsteht.

Aus den Analysen und den Erkenntnissen der Anwendungsbeispiele wurde deutlich, dass die Implementierung von Industrie 4.0-Technologien immer anhand der unternehmensindividuellen Rahmenbedingungen erfolgen muss. Aus diesem Grund bedarf die Implementierung von Industrie 4.0-Technologien eines systematischen Vorgehens inklusive der detaillierten Analyse der Ist-Prozesse. Im Zuge dessen wird derzeit am Institut für Fabrikbetriebslehre und Unternehmensforschung in Kooperation mit dem Institut für Forschung und Transfer (RIF e.V.) das Forschungsprojekt ***Ganzheitliche Produktionssysteme 4.0 für kleine und mittlere Unternehmen – GaProSys 4.0***<sup>3</sup> bearbeitet. Ziel des Projektes ist es, die Wechselwirkungen von Industrie 4.0 und Ganzheitlichen Produktionssystemen zu analysieren und ein systematisches Modell zur Implementierung von Industrie 4.0-Technologien im

---

<sup>3</sup> Das IGF-Vorhaben 19840 N der Forschungsvereinigung Gesellschaft für Verkehrs- betriebswirtschaft und Logistik e. V. (GVB), Wiesenweg 2, 93352 Rohr, wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IFG) gefördert.

Kontext Ganzheitlicher Produktionssysteme zu entwickeln. Erste Forschungsergebnisse werden aktuell in dem projektbegleitenden Ausschuss erarbeitet, in dem zahlreiche KMU mitwirken.

## Literatur

- Ahsen, A. von, Heesen, M., Kuchenbuch, A. (2010). Grundlagen der Bewertung von Innovationen im Mittelstand. In: A. Ahsen (Hrsg.): Bewertung von Innovationen im Mittelstand (S. 1–38). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Becker, W., Ulrich, P. (2011). Mittelstandsforschung: Begriffe, Relevanz und Konsequenzen. Mittelstand und Mittelstandsforschung, Vol. 3. Stuttgart: Kohlhammer Verlag.
- Binner, H. F. (2002). Prozessorientierte TQM-Umsetzung (2. Auflage). Hanser Lehrbuch. München: Hanser Verlag.
- Binner, H. F. (2010). Handbuch der prozessorientierten Arbeitsorganisation: Methoden und Werkzeuge zur Umsetzung (4. Auflage). REFA-Fachbuchreihe Unternehmensentwicklung. München: Hanser Verlag.
- Bracht, U., Masurat, T. (2002). Die vergessenen Fabriken: Schlafende Potentiale für innovative Planungen bei KMU systematisch mit modernen IT-Instrumenten wecken. Wt Werkstattstechnik Online, Vol. 92 (4), S. 154–158.
- Crespo Otano, I. (2012). Ganzheitliche Produktionssysteme für kleine und mittlere Unternehmen. Dissertation, 2012. Schriftenreihe des IFU: Vol. 23. Aachen: Shaker Verlag.
- Deuse, J., Weisner, K., Hengstebeck, A., Busch, F. (2015). Gestaltung von Produktionssystemen im Kontext von Industrie 4.0. In: A. Botthof, E. Hartmann (Hrsg.): Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0. Berlin: Springer Vieweg Verlag.
- DIHK. (2015). Wirtschaft 4.0: Große Chancen, viel zu tun: Das IHK-Unternehmensbarometer zur Digitalisierung. Deutscher Industrie- und Handelskammertag. Berlin, Brüssel.
- DIN EN 62264 (2013). Integration von Unternehmens-EDV und Leitsystemen. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag
- DIN SPEC 91345:2016-04 (2016). Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0). Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag.
- Dombrowski, U., Grundei, J., Melcher, P. R., Schmidtchen, K. (2015a). Studie zum Stand der Umsetzung der Prozessorganisation in deutschen Unternehmen. Hannover: Gesellschaft für Organisation (gfo).
- Dombrowski, U., Richter, T. (2016). Supplementing Lean Production Systems with Information and Communication Technologies. Proceedings of the Flexible Automation and Intelligent Manufacturing Conference, FAIM 2016, S. 654–661.

- Dombrowski, U., Richter, T., Ebentreich, D. (2015b). Auf dem Weg in die vierte industrielle Revolution: Ganzheitliche Produktionssysteme zur Gestaltung der Industrie 4.0-Architektur. *Zeitschrift Für Organisation*, Vol. 84 (3), S. 157–163.
- Dombrowski, U., Karl, A. (2016). Systematic Improvement of Supplier Integration within the Product Development Process. *Procedia CIRP*, Vol. 57, S. 392–397.
- Dombrowski, U., Kuhlant, P., Wullbrandt, J. (2017a). Die Veranstaltungsreihe GPS-Symposium. In: U. Dombrowski und P. Kuhlant (Hrsg.): *Mensch - Organisation - Technik im Lean Enterprise 4.0: Tagungsband zum 10. Braunschweiger Symposium für Ganzheitliche Produktionssysteme* (1. Auflage, S. 15–40). Aachen: Shaker Verlag.
- Dombrowski, U., Mielke, T. (2015). *Ganzheitliche Produktionssysteme: Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen*. VDI-Buch. Berlin: Springer Vieweg.
- Dombrowski, U., Richter, T., Krenkel, P. (2017c). Interdependencies of Industrie 4.0 & Lean Production Systems: A Use Cases Analysis. *Procedia Manufacturing*, Vol. 11, S. 1061–1068.
- Dombrowski, U., Richter, T., Krenkel, P. (2017b). Wechselwirkungen von Ganzheitlichen Produktionssystemen und Industrie 4.0. *ZWF Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Vol. 112 (6), S. 430–433.
- Dombrowski, U., Stefanak, T., Krenkel, P. (2017d). Aspekte der Fabrikplanung für die Ausrichtung auf Industrie 4.0. In G. Reinhart (Hrsg.), *Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Hanser Verlag.
- European Commission. (2005). *The new SME definition: Report from the commission. On the implementation of the commission recommendation (2003/361/EC) of 6 May 2003 concerning the definition of micro, small and medium-sized enterprises*. Brüssel.
- Fleischer, H. (2018). *Handelsgesetzbuch: Mit Einführungsgesetz, Publizitätsgesetz und Handelsregisterverordnung : Textausgabe* (62. Auflage, Stand: 7. Dezember 2017, Sonderausgabe). dtv Beck-Texte im dtv: Vol. 5002. München: dtv Verlag.
- Frey, U. (2016). *Vertrauen durch Strategie: Strategien in KMU einfach entwickeln und damit Vertrauen schaffen*. Wiesbaden: Springer Gabler Verlag.
- Fueglistaller, U. (2004). *Charakteristik und Entwicklung von Klein- und Mittelunternehmen (KMU)*. St. Gallen: KMU HSG Verlag.
- Fueglistaller, U., Müller, C. A., Müller, S., Volery, T., Fust, A. (2012). *Entrepreneurship: Modelle - Umsetzung - Perspektiven; mit Fallbeispielen aus Deutschland, Österreich und der Schweiz* (3. Auflage). Wiesbaden: Gabler Verlag.
- Gartner Inc. (2016). *Big Data: IT Glossary*. Online verfügbar unter: <https://www.gartner.com/it-glossary/big-data>, zuletzt geprüft am 05.08.2018.
- Glass, R., Seifermann, S., Metternich, J. (2016). The Spread of Lean Production in the Assembly, Process and Machining Industry. *Procedia CIRP*, Vol. 55, S. 278–283.
- Hompel, M., Schmidt, T., Nagel, L. (2007). *Materialflusssysteme: Förder- und Lagertechnik* (3. Auflage). Intralogistik. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

- Imai, M. (2012). *Gemba kaizen: A commonsense approach to a continuous improvement strategy* (2nd ed.). New York: McGraw Hill. Online verfügbar unter: <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy1310/2012021160-b.html>, zuletzt geprüft am 27.07.2018.
- Institut für Mittelstandsforschung. (2018). *KMU-Definition des IfM Bonn*. Online verfügbar unter: <http://www.ifm-bonn.org/definitionen/kmu-definition-des-ifm-bonn/>, zuletzt geprüft am 27.07.2018.
- Kuhlang, P., Edtmayr, T., Sunk, A., Hrach, M., Sihl, W. (2014). Steigerung der personalen und organisationalen System- und Methodenkompetenz durch Weiterentwicklungen des Wertstromdesigns. *Industrie Management*, Vol. 30 (30), S. 25–30.
- Lanza, G., & Nyhuis, P. (2016). Menschzentrierte Regelkreise in der Industrie 4.0. In: T. Bauernhansl und U. Dombrowski (Hrsg.): *Einfluss von Industrie 4.0 auf die Fabriken und die Fabrikplanung* (1. Auflage, S. 24–25). Braunschweig.
- Leyh, C., Schäffer, T., Forstnhäusler, S. (2016). SIMMI 4.0 – Vorschlag eines Reifegradmodells zur Klassifikation der unternehmensweiten Anwendungssystemlandschaft mit Fokus Industrie 4.0. *Multikonferenz Wirtschaftsinformatik (MKWI)*, 2016, S. 981–992.
- Leyh, C., Bley, K., Ott, M. (2018). Chancen und Risiken der Digitalisierung – Befragungen ausgewählter KMU. In: J. Hofmann (Hrsg.): *Edition HMD. Arbeit 4.0 - Digitalisierung, IT und Arbeit: IT als Treiber der digitalen Transformation*. Wiesbaden: Springer Verlag.
- Matthias, B., Ding, H., Miegel, V. (2013). Die Zukunft der Mensch-Roboter Kollaboration in der industriellen Montage. *Internationales Forum Mechatronics*.
- Mugler, J. (2008). *Grundlagen der BWL der Klein- und Mittelbetriebe* (2. Auflage). Wien: facultas.wuv Univ.-Verlag.
- Panetta, K. (2017). Top Trends in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2017. Online verfügbar unter: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/top-trends-in-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2017/>, zuletzt geprüft am 27.07.2018.
- Pfohl, H.-C. (2013). Abgrenzung der Klein- und Mittelbetriebe von Großbetrieben. In: H.-C. Pfohl und U. Arnold (Hrsg.): *Management und Wirtschaft Praxis: Vol. 44. Betriebswirtschaftslehre der Mittel- und Kleinbetriebe: Größenspezifische Probleme und Möglichkeiten zu ihrer Lösung* (4. Auflage.). Berlin: Schmidt Verlag.
- Pfrommer, J., Schleipen, M., Usländer, T., Epple, U., Heidel, R., Urbas, L., Beyerer, J. (2014). Begrifflichkeiten um Industrie 4.0 – Ordnung im Sprachwarrarr. Karlsruhe. Fraunhofer IOSB, RWTH Aachen, Siemens AG, TU Dresden. Online verfügbar unter: [akme-a2.iosb.fraunhofer.de/EatThisGoogleScholar/d/2014\\_Begrifflichkeiten%20um%20Industrie%204.0%20-%20Ordnung%20im%20Sprachwarrarr.pdf](http://akme-a2.iosb.fraunhofer.de/EatThisGoogleScholar/d/2014_Begrifflichkeiten%20um%20Industrie%204.0%20-%20Ordnung%20im%20Sprachwarrarr.pdf), zuletzt geprüft am 27.07.2018.
- Reiner, D. (2004). *Strategisches Wissensmanagement in der Produktentwicklung: Methoden und Prozesse für kleine und mittlere Unternehmen*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.

- Rosetti, K., Langhoff, T. (2016). Kompetenzstrukturmodelle in KMU. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (GVA) (Hrsg.): GfA-Frühjahrskongress: Vol. 62. Arbeit in komplexen Systemen: Digital, vernetzt, human?! (S. 1–6). Dortmund.
- Schlick, C., Bruder, R., Luczak, H. (2018). Arbeitswissenschaft (4. Auflage). Berlin: Springer Vieweg Verlag.
- Schröder, C. (2016). Herausforderungen von Industrie 4.0 für den Mittelstand. Gute Gesellschaft - soziale Demokratie # 2017plus. Bonn.
- Siepmann, D. (2016). Industrie 4.0 – Fünf zentrale Paradigmen. In: A. Roth (Hrsg.): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0 (S. 35–46). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Söllner, R. (2014). Die wirtschaftliche Bedeutung kleiner und mittlerer Unternehmen in Deutschland. Statistisches Bundesamt, Wirtschaft Und Statistik, S. 40–51.
- Statista. (2017a). Industrie 4.0 in Deutschland. Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/studie/id/21467/dokument/industrie-40-in-deutschland-statista-dossier/>, zuletzt geprüft am 27.07.2018.
- Statista. (2017b). Kleine und mittlere Unternehmen (KMU) in Deutschland: Dossier. Statistische Bundesamt.
- Staufen AG. (2015). 25 Jahre Lean Management: Lean Gestern, Heute und Morgen (Vol. 2015).
- Strohm, O., Ulrich, E. (1997). Unternehmen arbeitspsychologisch bewerten. Ein Mehrebenenansatz unter Berücksichtigung von Mensch, Technik und Organisation. In: E. Ulrich (Hrsg.): Schriftenreihe Mensch, Technik, Organisation. Zürich: Hochschulverlag.
- Tschöpe, S., Aronska, K., Nyhuis, P. (2015). Was ist eigentlich Industrie 4.0? Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Vol. 110 (3), S. 145–149.
- VDI 2510 (2013). Fahrerlose Transportsysteme (FTS). VDI-Richtlinie 2510. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI 2870 (2012). Ganzheitliche Produktionssysteme - Grundlagen, Einführung und Bewertung. VDI-Richtlinie, 2870: Beuth Verlag.
- Welsh, J., White, J. F. (1981). A Small Business Is Not a Little Big Business. Harvard Business Review, Vol. 59 (4), S. 18–32.

# Reifegradbestimmung als Vorstufe der Industrie 4.0-Strategieentwicklung

Egon Müller, Mandy Tawalbeh, Hendrik Hopf

Professur Fabrikplanung und Fabrikbetrieb, Institut für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme (IBF), Technische Universität Chemnitz

*Die mit dem Schlagwort Industrie 4.0 einhergehende Digitalisierung prägt zunehmend den Arbeitsalltag von Unternehmen jeglicher Größe. Für die Zukunftsfähigkeit eines Unternehmens gilt es, eine Strategie zu entwickeln, die sich an den Marktbedürfnissen - hohe Dynamik, Kundenindividualität, Serviceorientierung - ausrichtet. Dies gelingt nur auf der Kenntnis des Status Quo: Wo steht mein Unternehmen aktuell im Kontext von Industrie 4.0? Für diese Beurteilung wird der Reifegrad ermittelt und das Unternehmen in den Bereichen Organisation, Arbeit, Produkt und Prozess auf einer Skala von manueller Produktion bei Reifegrad 0 bis hin zur autonomen Produktion bei Reifegrad 4 eingestuft. Mithilfe dieses Wissens gelingt die Ableitung von zielorientierten Maßnahmen und der Entwicklung einer übergreifenden Strategie zur Einführung von Industrie 4.0-Ansätzen, durch die sich der Reifegrad der verschiedenen Bereiche signifikant verbessert. In diesem Zusammenhang bleibt stets der Mensch im Fokus, der durch die innovativen Ansätze von Industrie 4.0 in seiner Arbeit unterstützt werden soll.*

## 1. Motivation und Zielstellung

Im privaten Umfeld sind Smartphone, Tablet und Smart Watch mittlerweile unentbehrlich; Sprachassistenten wie Alexa und App-gesteuerte Haushaltsgeräte erleichtern unseren Alltag. Dieser Trend lässt sich auch im Produktions- / Fabrikumfeld erkennen, indem nach ständiger Verbesserung von Produktions-, Informations- und Kommunikationsstrukturen sowie dem Einsatz von innovativen High-Tech-Lösungen gestrebt wird (Rauen et al. 2015). Diese Entwicklung wird unter dem Begriff Industrie 4.0 zusammengefasst, deren Treiber aus den zusammenwirkenden Marktanforderungen, Organisationsformen und neuen Technologien bestehen. Die Marktanforderungen nach Internationalisierung/Globalisierung und der Aufweichung der Wertschöpfungsketten

dienen der Realisierung erhöhter Kundenindividualität und Serviceorientierung bei gleichzeitig immer kürzer werdenden Innovations- und Produktlebenszyklen. Mithilfe von Organisationsformen wie offenen Systeme, Smart Factory und neuen Interaktionen zwischen Mensch und Maschine wird der Rahmen für neue Technologien wie cyber-physische Systeme und intelligente Maschinen, Internet of Things und Big Data bzw. Cloud Computing geschaffen (Zanker 2016). Dabei gilt der Mensch als Befähiger in der digitalen Produktions- und Arbeitswelt, den es in seiner alltäglichen Beschäftigung zu unterstützen gilt.



Abbildung 1: Komponenten von Industrie 4.0.

Industrie 4.0 bietet zahlreiche Potenziale in Form von Produktinnovationen, produktbezogenen Dienstleistungen und optimierten Produktionsprozessen für große wie für kleine und mittlere Unternehmen (kurz: KMU). Da Industrie 4.0 nicht nur eine bestimmte Technologie, Prozedur oder Struktur ist, sondern eine Vielzahl unterschiedlicher Lösungsansätze beschreibt, bedarf es einer zielorientierten Auswahl der zu implementierenden Lösungen im Vorfeld, um präventiv ein unvorteilhaftes Kosten-Nutzen-Verhältnis zu vermeiden (Rauen et al. 2015).

Um Verbesserungsansätze, bisher nicht ausgeschöpfte Potenziale und Startpunkte für Industrie 4.0 und die damit einhergehende Digitalisierung zu identifizieren, kommen Industrie 4.0-Reifegradmodelle zum Einsatz (Feig et al. 2017). Diese Reifegradmodelle verfolgen alle dasselbe

Ziel: die zeitpunktbezogene Einordnung des Unternehmens bzw. einzelner Unternehmensbereiche in den Kontext von Industrie 4.0. Mit dem Wissen über den aktuellen Stand entsteht Transparenz über Defizite und Stärken. Resultierend lässt sich ein Maßnahmenplan bis hin zu einer übergreifenden Strategie zur Verbesserung der Unternehmensposition im Kontext von Industrie 4.0 generieren (Hanschke 2018).

Die Mehrheit der Reifegradmodelle analysiert neben den Wertschöpfungsprozessen und Produkten die digitalen Geschäftsmodelle (Rauen et al. 2015, Hochschule Neu-Ulm 2018). Der Faktor Mensch rückt zumeist in den Hintergrund. Jedoch steht die Befähigung des Menschen im Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Chemnitz im Zentrum des Industrie 4.0-Gedankens als auch des gesamten unternehmerischen Geschehens (vgl. Abbildung 1), weshalb dieser auch in den Reifegradmodellen unbedingt zu berücksichtigen ist (Müller & Hopf 2017). Persönliche Einstellungen und Kompetenzen sind dabei ebenso wichtig wie innovationsfördernde Managementstrukturen, welche einen begünstigenden oder hemmenden Effekt auf die Innovations- und Weiterentwicklungsfähigkeit des Unternehmens und dessen Mitarbeiter verzeichnen (Borrell 2016).

Die allumfassende Bestimmung des Industrie 4.0-Reifegrades schafft Transparenz über die aktuellen Unternehmensstrukturen als Ausgangspunkt für die Strategieentwicklung zur schrittweisen Einführung von Industrie 4.0.

Insbesondere KMU werden damit befähigt, sich einer Herausforderung wie Industrie 4.0 hoher Komplexität mit ihren begrenzten Kapazitäten schrittweise zu nähern. Wettbewerbsfähigkeit und Marktposition des Unternehmens stabilisieren sich mithilfe einer zielgerichteten Industrie 4.0-Strategie, die auf den Bedürfnissen, Restriktionen und Möglichkeiten des Unternehmens aufbaut. Die Entwicklung einer unternehmensspezifischen Strategie erfolgt entweder intern im Unternehmen - wodurch ein Mangel an Objektivität auftreten kann - oder durch Unterstützung eines externen Moderators, der den Entwicklungsprozess methodisch steuert.

## 2. Industrie 4.0 mit neuen Herausforderungen für den Mittelstand

Der Mittelstand stellt für Deutschland die tragende Säule im regionalen, nationalen und internationalen Wirtschaftsgeschehen dar. Über 3,6 Millionen und damit über 99% aller deutschen Unternehmen in Deutschland zählen zu kleinen und mittleren Unternehmen. Der Mittelstand nimmt die Rolle des Wirtschaft- und Beschäftigungsmotor

Deutschlands ein und ist geprägt von Flexibilität, schneller Anpassungsfähigkeit an den Markt, kurzen Entscheidungswegen und der Nähe zum Kunden. Er verkörpert damit Stabilität, Innovation und Fortschritt im In- und Ausland (BVMW 2018).

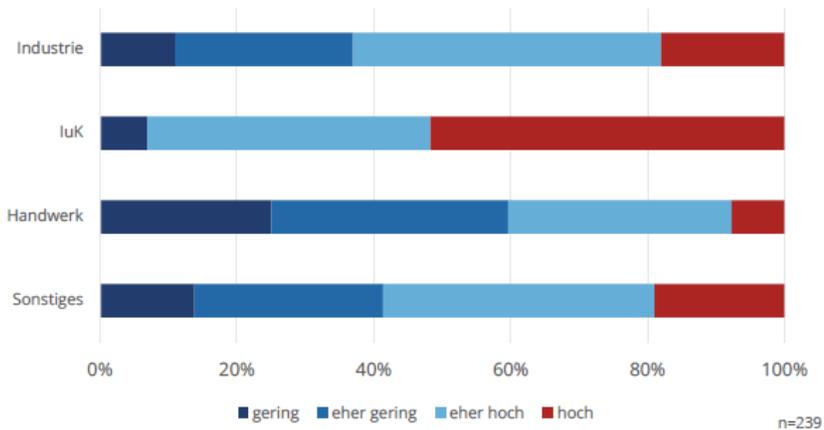


Abbildung 2: Stellenwert der Digitalisierung nach Wirtschaftszweig (n=239) (TU Chemnitz 2018).

Seit nunmehr fast zehn Jahren sieht sich der Mittelstand mit neuen Herausforderungen konfrontiert, die den Arbeitsalltag grundlegend beeinflussen und nachhaltig verändern. Stetig wachsender globaler Wettbewerbsdruck, internationale Wertschöpfungsketten, kürzere Produktlebenszyklen und der voranschreitende technologische Wandel sind nur einige der Herausforderungen, die zu bewältigen sind. Hinzu kommen immer mehr kundenindividuelle Produkte und Lösungen, welche angeboten werden müssen, um das sich stetig wandelnde Nachfrageverhalten der Kunden befriedigen zu können. Nicht zu vergessen - der demografische Wandel und der resultierende Mangel an Fachkräften. Die Anforderungen an den Mittelstand und somit auch an dessen Flexibilität und Effizienz steigen stetig an und werden zur täglichen Herausforderung (Wolff, Göbel 2018).

Zusammenfassend gilt, dass der globale Wettbewerb, der steigende Service am Kunden und die allgemein vorherrschende Ressourcenverknappung den Mittelstand dazu zwingen, neue Wege zu gehen und Effizienzsteigerungen sowie Digitalisierung in den Betrieben weiter voranzutreiben. Die Bedeutung der Digitalisierung ist in Abbildung 2 visualisiert. Mit dem Vollzug der vierten Industriellen Revolution (Industrie 4.0) werden die eben beschriebenen Herausforderungen aufgegriffen und

mithilfe von technischen und technologischen Lösungen für KMU handhabbar gemacht (Ludwig et al. 2015). Besonders für KMU ist es entscheidend, die technologische Reife und Implementierbarkeit von potenziell geeigneten Industrie 4.0-Lösungen im Vorfeld zu überprüfen, um deren wirtschaftlichen und prozessorientierten Mehrwert zu beurteilen. Andernfalls führt es zu Hemmnissen bei der technologischen Umsetzung von Industrie 4.0, was sich auf das Fehlen einer umfassenden Strategie bzw. einem geplanten Vorgehen des Managements zurückführen lässt (Schröder 2016). Die tatsächlichen Gründe für die Einführung digitaler Technologien, wurde im Rahmen der Bedarfsanalyse ebenfalls erfasst (vgl. Abbildung 3) (TU Chemnitz 2018).

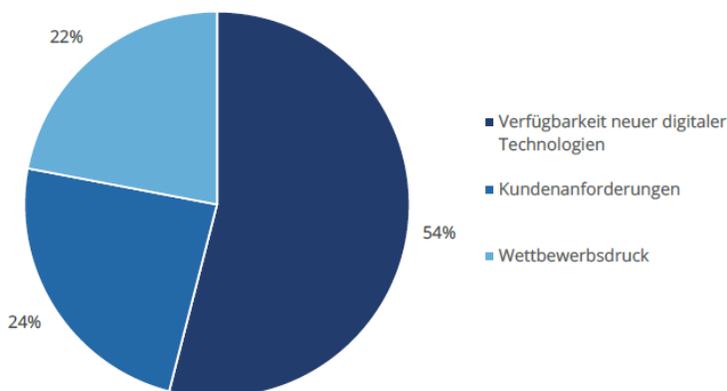


Abbildung 3: Einführungsgrund von digitalen Technologien (n=94) (TU Chemnitz 2018).

Die zunehmende Vernetzung von Maschinen/Anlagen und Produkten mithilfe von Information- und Kommunikationstechnologien untereinander als auch mit dem Menschen ist der zentrale Ansatzpunkt von Industrie 4.0 und der damit einhergehenden Digitalisierung. Mit dieser Vernetzung gelingt die Erfassung von Maschinen- und Anlagendaten, welche anschließend für einen neuen, gewinnbringenden Kontext aufbereitet werden. Die Datenaufbereitung erhöht die Transparenz im Produktions- und Organisationsumfeld z. B. hinsichtlich potenzieller Auswirkungen in der Produktion, notwendiger Ressourcenbedarf sowie Bedarfe und Anforderungen an die innerbetriebliche Organisation. Gleichzeitig erfolgt eine Echtzeitoptimierung der Wertschöpfung (Ludwig et al. 2015) und die Prozessabläufe werden mehr und mehr durch den Einsatz von intelligenten Systemen automatisiert und optimiert.

Dabei nimmt der Mensch zukünftig eine eher untergeordnete Rolle im aktiven Produktionsgeschehen ein. Die sogenannte Smart Factory verfolgt jedoch nicht das Ziel, den Menschen komplett aus dem Unternehmen zu drängen. Der Mensch soll vielmehr eingesetzt werden, wo er wirklich benötigt wird und seine Kompetenzen in das wirtschaftliche Geschehen einbringen kann. Besonders in KMU sichern Mitarbeiter mit ihrer jahrelangen Erfahrung und dem daraus resultierenden Arbeitsvermögen den wirtschaftlichen Erfolg des Unternehmens. Jedoch ist es unabdingbar, dass die Mitarbeiter ihr Wissen und ihre Expertise dem Unternehmen zur Verfügung zu stellen, um eine optimale Mensch-Maschine-Kooperation herbeizuführen. Der Mensch wird schließlich auch zukünftig wichtigster Bestandteil im gesamten cyber-physischen Produktionssystem darstellen.

Die Automatisierung zieht vorrangig in Bereichen mit einfachen, sich stetig wiederholenden Tätigkeiten ein. Die damit verbundenen Arbeitsplätze wandeln sich aufgrund neuer Geschäftsmodelle und resultierenden Tätigkeitsbereichen. Folglich steigt der Bedarf an Weiterqualifizierung und Sensibilisierung bereits vorhandener als auch neuer Mitarbeiter im Kontext von Industrie 4.0.

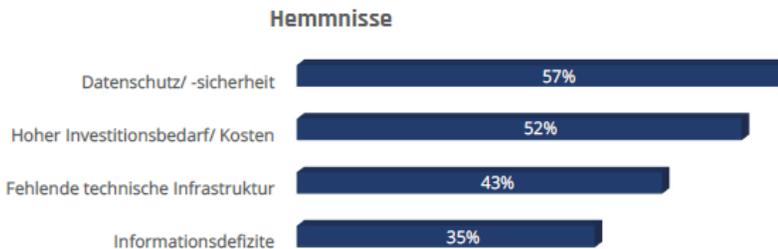


Abbildung 4: Digitalisierungshemmnisse (n=239) (TU Chemnitz 2018).

Viele KMU haben großes Interesse an Industrie 4.0 und gehen bereits erste Schritte in Richtung Digitalisierung und Automatisierung. Trotz großer wirtschaftlicher Potenziale agieren dennoch viele Unternehmen zurückhaltend. Generell gilt, dass Industrie 4.0 keine grundlegende Neuerung ist und die effiziente Produktion nach wie vor das zentrale Ziel darstellt. Die zugrundeliegenden Planungsalgorithmen benötigen dieselben Daten, auf denen auch die bisherigen Planungen basieren (Wolff/Göbel 2018). Datenkonsistenz entlang der Wertschöpfungsprozesse im Unternehmen sowie über die Unternehmensgrenzen hinweg stellt die Grundvoraussetzung für den Einsatz verschiedener IT-Systeme

dar. Erst damit können Unternehmensbereiche - wie Beschaffung, Produktion und Vertrieb - Daten austauschen und diese interaktiv in Echtzeit nutzen. Fehlende Standards und Normen für den Datenaustausch aber auch Unsicherheiten hinsichtlich unbefugten Datenzugriffen zählen zu den Hemmnisfaktoren genauso wie rechtliche Fragen nach Dateneigentum und Datenschutz.

Eine weitere Herausforderung für KMU besteht darin, Investitionen für die notwendige Infrastruktur und entsprechende IT-Systeme zu tätigen. Nicht selten werden fehlende Schnittstellen oder unzureichende Datenformate zur Herausforderung bei der Implementierung in die bereits vorhandene IT-Infrastruktur. Die Flexibilität und Adaptierbarkeit von technischen Systemen sowie die frühzeitige Erarbeitung entsprechender Wartungs- und Instandhaltungskonzepte sind auch zukünftig unabdingbar (Ludwig et al. 2015).

### 3. Industrie 4.0 - Reifegradmodelle

Viele Unternehmen sind bemüht mit Industrie 4.0 sowohl auf technologischer als auch auf strategischer Ebene voranzugehen. Dabei liegt der Fokus mehr auf den technologischen Besonderheiten und Innovationen (Müller, Chen & Riedel 2017) als auf deren Vorteilhaftigkeit im individuellen Unternehmensgeschehen. Ziellose Innovationen in neuartige Technologien und Industrie 4.0-Ansätze verzeichnen keinen Mehrwert, wenn kein Bezug zu den Produktions-, Service- oder Managementprozessen existiert. Aus der Chance "Industrie 4.0" resultiert damit schnell ein kostenintensives Risiko für das Unternehmen - insbesondere ein strategisches/unternehmerisches Risiko (Borell 2016, Feig TBI 2017). Deshalb ist es ratsam, sich mit einer mittel- bis langfristigen Strategie dem Thema Industrie 4.0 zu nähern. Im ersten Schritt gilt es zu identifizieren, wo sich das Unternehmen im Kontext von Industrie 4.0 (vgl. Abbildung 5) befindet. Dazu dienen Reifegradmodelle, die mit gezielten Fragen die organisatorischen und technologischen Begebenheiten im Unternehmen bzw. in einzelnen Unternehmensbereichen untersuchen (Hanschke 2018).

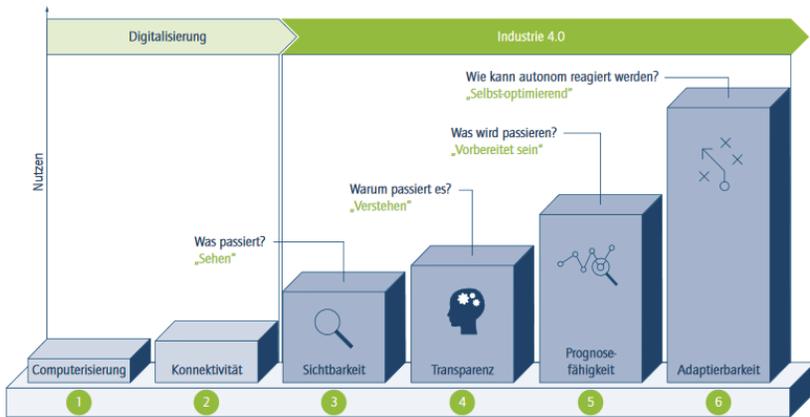


Abbildung 5: Entwicklungsstufen entlang Industrie 4.0 (Schuh et al. 2017).

Eine umfangreiche Studie zu den inhaltlichen Anforderungen eines Reifegradmodells für Industrie 4.0 wurde von Schuh et al. (2017) veröffentlicht mit dem Titel „Industrie 4.0 Maturity Index - die digitale Transformation von Unternehmen gestalten“. Dieser methodische Modellansatz basiert auf den in Abbildung 5 dargestellten 6 Entwicklungsstufen, die ein Unternehmen auf dem Weg zu Industrie 4.0 einnimmt. Für jedes Modell erfolgt eine individuelle Auslegung der Entwicklungsstufen zur Eingruppierung des Unternehmens, was in nachstehender Abbildung 6 beispielhaft dargestellt ist.

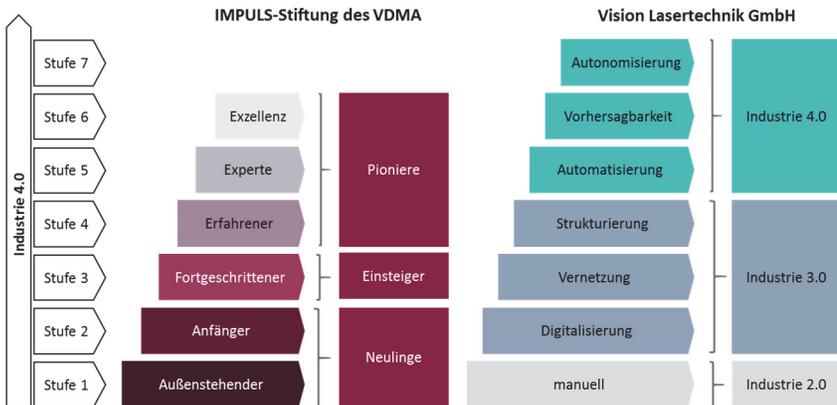


Abbildung 6: Alternative Entwicklungsstufen von Industrie 4.0 (Lichtblau et al. 2015, Becker 2018).

Reifegradmodelle gibt es in zahlreichen Variationen, Umfang und Detailgrad von unterschiedlichen Institutionen und Anbietern. Eine Auswahl etablierter Reifegradmodelle wird folgend beschrieben und ist in Tabelle 1 hinsichtlich der Umsetzung gegenübergestellt.

Der Fokus der einzelnen Reifegradmodelle variiert stark in Abhängigkeit vom Ersteller hinsichtlich der abgefragten Themenbereiche, Antwortoptionen und Auswertungsmöglichkeiten, was zu stark differenzierten Ergebnissen führt.

### Reifegradmodelle auf Basis des Werkzeugkasten Industrie 4.0

Der Werkzeugkasten Industrie 4.0 des Verbandes Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA) ist Bestandteil des Leitfadens zur „Industrie 4.0-Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand“. Dabei werden insbesondere die Bereiche Produktion und Produkte hinsichtlich der Entwicklungsstufen untersucht. Die Besonderheit ist, dass die Anwendungsebenen auf jeweils fünf technologische, aufeinander aufbauende Entwicklungsstufen heruntergebrochen werden. D.h., die Beurteilung erfolgt an konkreten technologischen Umsetzungen zur Steigerung der Objektivität und Vergleichbarkeit. Die Anwendbarkeit verbessert sich für Nutzer, die kein Fachwissen im Bereich Industrie 4.0 aufweisen. Dies ist insbesondere dann notwendig, wenn die Reifegradmodelle selbstständig im Unternehmen bzw. online realisiert werden. Eine weitere Verständnisförderung ermöglichen die Visualisierungen in dem Werkzeugkasten Industrie 4.0, die dem Nutzer visuelle Eindrücke zur Ausprägung der einzelnen Kriterien geben (Rauen et al. 2015).

Die IHK München und Oberbayern bieten einen Test zur Bestimmung des digitalen Reifegrades des Unternehmens an, der sich modular aus vier Bereichen zusammensetzt: Smart Products, Smart Manufacturing, Smart Organization und Smart Technology. Dieses Reifegradmodell orientiert sich an dem Leitfaden Industrie 4.0 des VDMA (IHK München und Oberbayern 2018).

### Umfangreiche Online-Selbstchecks

Das Mittelstand 4.0 Kompetenzzentrum NRW veröffentlichte den Quick Check Industrie 4.0. Für den generellen Überblick existiert ein Check mit 15 Fragen, der die verschiedenen Themenbereiche kurz untersucht. Sind detaillierte Analysen gewünscht, bietet das Kompetenzzentrum NRW noch 9 weitere Fragebögen mit bis zu 10 Fragen zu folgenden Themenbereichen: Digitales Geschäftsmodell, Produktentstehung und -entwicklung, IT-Systeme, Qualitäts- und Prozessmanagement, Produktionssteuerung und -regelung, interne Logistik, Supply-Chain-Management und Mensch-Maschine-Interaktion. Online bekommt der Nutzer

seine aktuelle Situation mit ersten Handlungsmaßnahmen aufgezeigt und wie sich das Unternehmen im Vergleich zu ähnlichen Unternehmen aufstellt (Hicking 2018).

In dem Industrie 4.0-Readiness-Modell der IMPULS-Stiftung des VDMA werden die sechs Dimensionen Mitarbeiter, Strategie und Organisation, Smart Factory, Smart Operations, Smart Products und data-driven Services untersucht. Im Vergleich zu anderen Modellansätzen sind hierbei die Kompetenzen der Mitarbeiter sowie die Implementierung von Innovationsmanagement berücksichtigt. Die Eingruppierung der Unternehmen gestaltet sich detaillierter, indem in sechs Stufen unterschieden wird (Lichtblau et al. 2015).

Der Industrie 4.0-Reifegrad-Test der Vision Lasertechnik GmbH, bluebiz OHG und UNIORG Gruppe stuft die Unternehmen sogar in sieben Stufen ein. Fokus liegt auf den Bereichen Forschung und Entwicklung, Produktion, Logistik und Lagerverwaltung, Verwaltung und Administration, Vertrieb und Kundenservice. Die Umsetzung der Technologien und organisatorischen Begebenheiten erfolgt mit einer subjektiven Skala von „weiß ich nicht“ bis „trifft voll und ganz zu“. Der Selbstscheck liefert jedoch nur eine allgemeine Einordnung in diese sieben Stufen. Es werden keinerlei konkrete Stärken oder Schwächen analysiert und in dem Online-Tool ausgewertet. Der Nutzer erhält eine detaillierte Auswertung erst nach persönlicher Kontaktaufnahme (Becker 2018).

### Kollaborative Ansätze zur Industrie 4.0 - Reifegradbestimmung

Die H&D international Group bietet eine Reifegradanalyse an, die sich mit den fünf grundlegenden Elementen im Unternehmen beschäftigt: Wandel der Kundenbedürfnisse, Wandel der Prozesse, Wandel der Technologien, Wandel der Menschen und Wandel der Unternehmensausrichtung. Der Fokus liegt hierbei auf technologischen Aspekten, insbesondere den vielfältigen IT-Bausteinen für Industrie 4.0. Dabei wird eine kooperative Prozessaufnahme und -analyse durchgeführt, um Optimierungspotenziale zu identifizieren. D.h. es gibt keine Möglichkeit, online selbstständig sein Unternehmen zu testen (H&D International Group 2018).

Einen ähnlichen kooperativen Ansatz verfolgen das Mechatronik Cluster und die FH Oberösterreich. Dabei werden innerhalb eines Startworkshops Strategie und Ziele des Unternehmens definiert sowie Applikationsfelder und Verantwortlichkeiten festgelegt. Die eigentliche Datenerhebung und Bewertung des IST-Reifegrades erfolgt mithilfe von Interviews mit Fachexperten; dabei wird ebenfalls der angestrebte

SOLL-Reifegrad definiert. Diese gesammelten Ergebnisse werden in einem Abschlussworkshop konsolidiert und mit konkreten Umsetzungsvorschlägen untersetzt (Brunner/Jodlbauer 2018).

Die RWTH Aachen stellt einen Ansatz für ein Industrie 4.0-Audit vor. Dieser orientiert sich an einem Reifegradmodell; dient jedoch der Entwicklung einer unternehmensspezifischen Industrie 4.0-Roadmap bzw. -Strategie. Damit steht die Identifikation und Steuerung von Aktivitäten zur Steigerung der Industrie 4.0 im Fokus. Konkret wurde dieser Ansatz für den Auftragsabwicklungsprozess in produzierenden Unternehmen entwickelt (Reuter et al. 2016).

### Umsetzung der Reifegradmodelle

Unabhängig von dem methodischen Konzept des Reifegradmodells erfolgt dessen Realisierung zumeist online oder in einer kooperativen Form im Unternehmen. Zusätzlich können die verschiedenen Ansätze hinsichtlich ihrer Themenbereiche differenziert werden in - Ansätze mit allgemeinen Industrie 4.0 spezifischen Aspekten, mit technologischen Aspekten oder mit Orientierung am Wertschöpfungsprozess (Kese 2017).

Reifegradmodell	Institution	Umsetzung	Bestimmung des Reifegrades mit:
Werkzeugkasten Industrie 4.0	VDMA	kollaborativ	Technologien
Leitfaden Industrie 4.0	IHK München und Oberbayern	online	Technologien
Quick Check	Kompetenzzentrum NRW	online	Technologien
Industrie 4.0-Readiness-Modell	IMPULS-Stiftung des VDMA	online	Technologien
Industrie 4.0-Reifegrad-Test	Connected Production	online	ordinaler Skala
Industrie 4.0-Readiness	H&D international Group	kollaborativ	vor-Ort-Analyse
Reifegradmodell Industrie 4.0	OÖ Wirtschaftsagentur GmbH, FH OÖ	kollaborativ	Workshop

Tabelle 1: Durchführung von Industrie 4.0 - Reifegradmodellen.

Neben den vorgestellten Reifegradmodellen existieren zahlreiche weitere Ansätze, insbesondere auch Selbstchecks, die dem Nutzer innerhalb kürzester Zeit ein Ergebnis liefern.

Dazu zählt unter anderem das Analysetool über den digitalen Reifegrad eines Unternehmens der Hochschule Neu-Ulm und minnosphere. Dieses Modell basiert auf zehn Fragen, die sich zum einen mit der Einschätzung des Status Quo als auch mit dem geplanten Stand innerhalb der nächsten drei Jahre befassen. Dabei wird das Unternehmen in fünf Entwicklungsstufen in den Kontext von Industrie 4.0 eingeordnet und mit anderen Unternehmen gleicher Kategorie verglichen (Hochschule Neu-Ulm 2018).

Der Digitalisierungsindex der Telekom ist ebenfalls ein Werkzeug, mit welchem in kürzester Zeit (ca. 15 Minuten) eine erste Selbsteinschätzung gelingt. Der Fokus liegt auf einer branchenbezogenen Auswertung der Ergebnisse zu den Bereichen Beziehungen zu Kunden, Produktivität im Unternehmen, digitales Angebot und Geschäftsmodelle sowie IT- und Informationssicherheit und Datenschutz. Die Stärken und Schwächen des Unternehmens werden dabei in Relation der zuvor definierten Branche und Branchengrößenklasse ausgewertet (Deutsche Telekom AG 2018).

Schumacher (2018) untersuchte die Anwendbarkeit der verschiedenen Industrie 4.0-Reifegradmodelle im Praxiskontext, was in Abbildung 7 zu sehen ist.



Abbildung 7: Defizite existierender Industrie 4.0-Reifegradmodelle (Schumacher 2018, S. 17).

Der Weiterentwicklungsbedarf wird aus dieser Umfrage sehr deutlich, insbesondere um die praxisnahe Anwendung verbessern und den Unternehmen konkrete Ergebnisse für die nächsten Schritte aufzeigen.

Auch der Faktor Mensch muss mehr in den Fokus gerückt werden (Schumacher 2018).

#### 4. Entwicklung eines ein allumfassenden Industrie 4.0-Reifegradmodells

##### 4.1 Anforderungen an ein allumfassendes Industrie 4.0-Reifegradmodell

Das zu entwickelnde Industrie 4.0-Reifegradmodell soll dem Nutzer sowohl online zur Verfügung gestellt werden, um Selbsteinschätzung zu realisieren. Zusätzlich gilt es, die optionale Bestimmung des Reifegrades innerhalb eines interaktiven Workshops im Unternehmen durchzuführen. Der universelle Einsatzbereich bedingt eine zielorientierte Umsetzung und Auswertungslogik. Anforderungen an das Industrie 4.0-Reifegradmodell ergeben sich folgendermaßen:

- Berücksichtigung der allumfänglichen Komplexität, indem alle Industrie 4.0-relevanten Dimensionen eines Unternehmens untersucht werden;
- Technologieorientierte und visualisierte Ausgestaltung der Antwortoptionen;
- Fokussierung des Menschen im Arbeits- und Produktionsprozess;
- Online- Ergebnisse im Vergleich zu ähnlichen Unternehmen;
- Online-Ergebnisse mit Fokussierung der Stärken und Schwächen.

Zusätzlich sind die Bedürfnisse der Zielgruppe des Reifegradmodells - den kleinen und mittleren Unternehmen - zu berücksichtigen. Aus diesem Grund ist eine entsprechende Formulierung als auch Aufbereitung z. B. in grafischer Form entscheidend, um das Verständnis zu fördern. Zum Beispiel Visualisierungen, wie sie im Werkzeugkasten Industrie 4.0 vorkommen, unterstützen die Anwendbarkeit des Reifegradmodells.

##### 4.1 Konzeptionierung des Industrie 4.0-Reifegradmodell

Aus der Vielzahl existierender Reifegradmodelle haben sich drei Ansätze - Werkzeugkasten Industrie 4.0 (Rauen et al. 2015), Quick Check (Hicking 2018), Industrie 4.0-Readiness-Modell (Lichtblau et al. 2015) - im Rahmen der Literaturrecherche herauskristallisiert, die insbesondere

die Anforderung an die technologieorientierte Ausgestaltung der Antwortoptionen erfüllen.

		Werkzeugkasten Industrie 4.0 (VDMA)	Quick Check (Kompetenzzentrum NRW)	Industrie 4.0- Readiness- Modell (IMPULS- Stiftung)
Dimensionen	Produkt	●	●	●
	Prozess	●	●	●
	Strategie	○	●	●
	Mensch	○	◐	◐
	Recht	○	○	◐

Tabelle 2: Betrachtungsbereiche der favorisierten Reifegradmodelle.

Die in Tabelle 2 dargestellten Reifegradmodelle lassen sich nicht nach ihrem Detaillierungsgrad, Branchenneutralität und Ergebnisqualität differenzieren; jedoch unterscheiden sie sich hinsichtlich ihrer Betrachtungsbereiche.

Zudem verdeutlicht diese Gegenüberstellung, dass keines der untersuchten Reifegradmodelle die Untersuchung der allumfänglichen Komplexität hinsichtlich Industrie 4.0 in einem Unternehmen sicherstellt. Der Weiterentwicklungsbedarf wird sichtbar.

Bei der Entwicklung eines geeigneten Reifegradmodells wird auf die sich bereits etablierten Ansätze zurückgegriffen. Insbesondere die Bereiche Produkte und Produktion/Prozesse wurden aus dem Werkzeugkasten Industrie 4.0 größtenteils unverändert beibehalten und lediglich hinsichtlich Formulierung sowie Visualisierung angepasst. Neben den Wertschöpfungsprozessen existieren zahlreiche nicht-wertschöpfende Arbeitsabläufe, die die Unternehmenskultur bestimmen und damit die Mitarbeiter in ihren Handlungen und Einstellungen maßgeblich determinieren. Folglich liegt der Fokus der Weiter- bzw. Neuentwicklung des Reifegradmodells auf den organisatorischen Strukturen zur Schaffung der humanitären Voraussetzungen für Industrie 4.0.

Der Hintergedanke dabei ist, dass Innovationen, High-Tech-Lösungen, Informations- und Kommunikationstechnologien in den Unternehmensprozessen bzw. -strukturen verankert sein müssen. Folglich bedarf

es auch bei der Reifegradbestimmung der Betrachtung von Querschnittsdisziplinen wie Innovations-, Projekt- und Lean Management sowie Produktionsplanung und-Steuerung.

Zusätzlich zu den Unternehmensstrukturen erfolgt die Analyse der Arbeitsweise mit Fokus auf dem Mitarbeiter selbst. Hierbei werden zwei Perspektiven eingenommen:

- (1) Welche Einstellung/Meinung haben die Mitarbeiter zu Industrie 4.0?
- (2) Wie gestaltet sich der Kompetenzausbau bzw. -aufbau?

Grundsätzlich muss beachtet werden, dass ohne den Mitarbeiter kein erfolgreiches wirtschaftliches Agieren gewährleistet werden kann. Daher sind ebenfalls Meinungen, Einstellungen sowie kulturelle Besonderheiten nicht vernachlässigbar. Dabei beschreibt der Reifegrad Industrie 4.0, wie die Mitarbeiter zu dem Thema Industrie 4.0 stehen. Dies impliziert gleichzeitig ihre Bereitschaft, sich in neuen Bereichen weiter zu qualifizieren. Kompetenzaufbau wird zukünftig ein erfolgsentscheidender Faktor, da zahlreiche neue Qualifikationen aus den neuen Technologien resultieren. Die Umverteilung des Kompetenzbedarfs gilt es durch entsprechende Qualifizierung und Neueinstellung auszugleichen, um die zufriedenstellende Einbindung der Mitarbeiter in das unternehmerische Geschehen sicherstellen zu können.

Das entwickelte Reifegradmodell des Mittelstand 4.0 Kompetenzzentrums Chemnitz (vgl. Abbildung 8) besteht aus vier Basisschecks, welche der grundlegenden Beurteilung der Unternehmensbereiche Produkte, Prozesse, Strategie und Organisation sowie Arbeit dienen. Für die Bestimmung des Reifegrades in den Basis-Checks sind keine speziellen Kenntnisse zwingend notwendig, sodass Mitarbeiter unterschiedlicher Qualifikation der Bewertung annehmen können.

Zur vollständigen Berücksichtigung der Komplexität sind aktuell zwei weitere Checks in Entwicklung: Fachcheck Recht/Sicherheit und Fachcheck Usability. Hierbei geht es um eine tiefgründige Bewertung des Unternehmens in den beiden Fachbereichen, welche für die Bewertung eine Spezialistenperspektive bedingen.

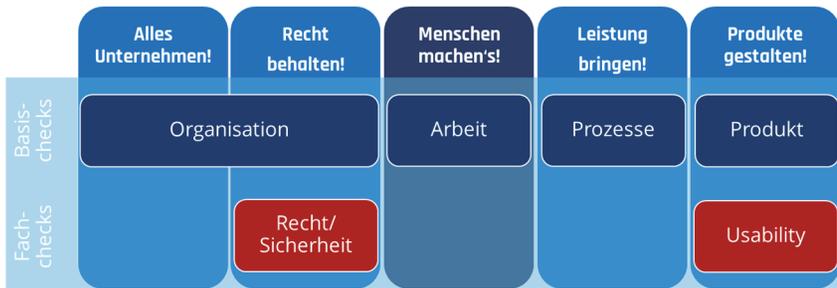


Abbildung 8: Konzept der Basis- und Fachchecks des Industrie 4.0-Reifegrades.

Sowohl die Basischecks als auch die Fachchecks können jeweils nach Bedarf einzeln oder in Kombination durchgeführt werden. Ziel dabei ist, eine bausteinbasierte Auswertung zu generieren, d.h. die einzelnen Bereiche werden jeweils separat ausgewertet und anschließend erfolgt die Konsolidierung der Daten aller durchgeführten Checks, um schlussendlich eine gesamtzeitliche Bewertung des Industrie 4.0 Reifegrad zu erhalten.

In Anlehnung an die anderen existierenden Reifegradmodelle erfolgt ebenfalls eine Auswertung im Vergleich zu anderen Unternehmen ähnlicher Branchen bzw. Unternehmensgrößen.

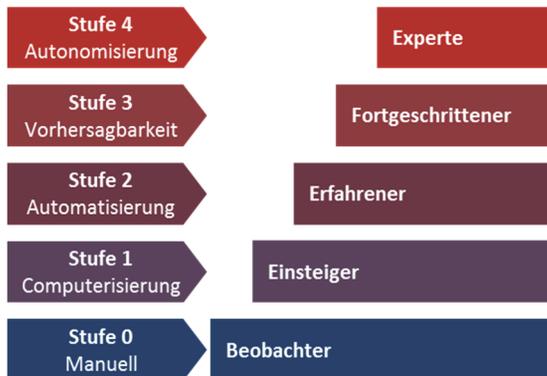


Abbildung 9: Auswertung der Industrie 4.0-Basischecks.

Die Unternehmen je ausgefüllten Check einer der 5 Entwicklungsstufen (Vgl. Abbildung 9) zugeordnet. Gleichzeitig werden die Stärken und Schwächen in den einzelnen Bereichen aufgezeigt, welche die Ausgangs-

punkte für die Weiterentwicklung zu Industrie 4.0 darstellen. Die eigenständige Nutzung der Reifegradmodelle ermöglicht jedoch nur eingeschränkt eine umfangreiche Unterstützungsleistung bei der weiteren Ableitung von Industrie 4.0-Lösungen sowie einer übergreifenden Strategie.

## 5. Strategieentwicklung für Industrie 4.0

Mithilfe des Reifegradmodells wird ein Unternehmen aktuell im Kontext von Industrie 4.0 eingruppiert. Der Ist-Zustand des Unternehmens liegt damit vor. Um mit diesen Daten jedoch zielorientiert umzugehen, bedarf es weiterer Analysen zur Festlegung eines geeigneten Maßnahmenplans bzw. einer übergeordneten Industrie 4.0-Strategie, denn Industrie 4.0 nimmt vielfältige Facetten ein (vgl. Abbildung 10).

Dadurch gelingt einerseits die Optimierung der bestehenden Abläufe und Produkte. Andererseits können ebenfalls bislang ungenutzte Potenziale ausgeschöpft werden, indem neue Geschäftsmodelle entwickelt und aufgebaut werden. Ob in dem Rahmen neue Produkte, neue produktbezogene Dienstleistungen oder deren Kombination aus dem Industrie 4.0-Gedanken wachsen, ist irrelevant. Jedes (neue) Geschäftsmodell setzt seine strategische Verankerung im Unternehmen voraus.

Insbesondere im Rahmen bei der Strategieentwicklung hat sich gezeigt, dass die selbstständige Beurteilung bzw. das selbstständige Ausfüllen der Reifegradmodelle in Form eines Online-Tools wenig erfolgreich ist. Hintergrund ist, dass die Unternehmer von KMU kein/wenig Detailwissen bzw. Fachwissen im Bereich Industrie 4.0 aufweisen und damit lediglich auf einer sehr vereinfachten Art und Weise die Reifegradmodelle ausfüllen können. Dieser Effekt kann durch einen neutralen Moderator ausgeglichen werden. Der Moderator übernimmt die Aufgabe des Fachexperten im Bereich Industrie 4.0, sodass bei der Bestimmung des Ist-Reifegrades zusätzliche Erläuterungen bzw. Beschreibungen für die einzelnen Ausprägungen der Technologien möglich sind und eine zielorientierte Diskussion gelingt.

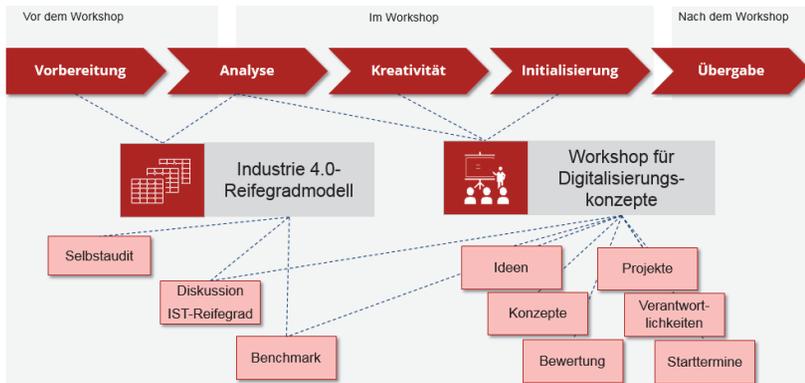


Abbildung 10: Methodik zur reifegradbasierten Industrie 4.0-Strategieentwicklung.

Konkretes Hinterfragen von bestimmten Vorgehensweisen und Prozessschritten ermöglicht eine genauere Einschätzung, sodass zusätzliche Perspektiven integrierbar sind. Gemeinsam erfolgt die Identifikation von Stärken und Schwächen, welche durch eine zusätzliche Analyse von Ursachen und Hintergründen erweiterbar ist. Anschließend gilt es, mit einem Team aus dem Unternehmen potentielle Ansätze für Industrie 4.0-Lösungen mithilfe von Kreativitätstechniken zu erarbeiten. Die Bewertung der einzelnen Lösungsideen erfolgt durch eine Priorisierung im Unternehmenskontext bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Effekte auf den Industrie 4.0-Reifegrad. Es sollen Maßnahmen priorisiert werden, die mit minimalem Aufwand maximalen Effekt mit sich bringen. Ein möglichst vorteilhaftes Kosten-Nutzen-Verhältnis ist das oberste Ziel bei der Industrie 4.0 Strategieentwicklung im Mittelstand. Nur dann ist Industrie 4.0 wirklich eine Chance, die die wirtschaftliche Situation des Unternehmens begünstigt.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Die aktuelle wirtschaftliche Lage der KMU ist von einer guten, florierenden Auftragslage geprägt und die Unternehmer blicken auch weiterhin zuversichtlich in die nahe Zukunft. Gut gefüllte Auftragsbücher, volle Terminkalender und operative Herausforderungen im Tagesgeschäft prägen den Alltag des klassischen Unternehmers. Doch wo bleibt da die Zeit sich über Zukunftsperspektiven und das Geschäft von Morgen Gedanken zu machen? Welche Weichen müssen bereits heute gestellt werden, um zukünftig wettbewerbsfähig zu sein?

Genau an diesem Punkt setzen die Industrie 4.0-Reifegradmodelle an, welche den Unternehmen die Möglichkeit geben, sich im Kontext von

Industrie 4.0 selbst einzuschätzen sowie diese Rolle im Vergleich zu anderen Unternehmen der Branche zu sehen. Das Thema Industrie 4.0 beschäftigt sich im Vordergrund mit technologischen Innovationen, Kommunikations- und Informationsstrukturen sowie neuen Geschäftsmodellen und intelligenten Produkten. Dabei geht oftmals der Faktor Mensch verloren, wie es auch in den meisten untersuchten Industrie 4.0-Reifegradmodellen der Fall ist. Aus diesem Grund bedarf es der Integration von menschenbezogenen Aspekten, die die Einführung von Industrie 4.0 hemmen bzw. unterstützen. Das Mittelstand 4.0 Kompetenzzentrum Chemnitz entwickelt auf Basis der 3 favorisierten Reifegradmodelle - Werkzeugkasten Industrie 4.0, Quick Check, Industrie 4.0-Readiness-Modell - die vier Basischecks zur Bewertung des Industrie 4.0-Reifegrades hinsichtlich Produktion/Prozesse, Produkte, Arbeit und Organisation/Strategie.

Diese Basischecks können separat oder in Kombination durchgeführt werden und zeigen die Ausprägungen von Industrie 4.0 in den einzelnen Bereichen als auch übergreifend auf. In den weiteren Bestrebungen erfolgt die Entwicklung von Fachchecks hinsichtlich Recht und Sicherheit sowie Usability. Das Thema Recht und Sicherheit bezogen auf Daten wird in den existierenden Reifegradmodellen nur am Rande erwähnt. Die Bedeutung ist jedoch - insbesondere mit der Einführung der DSGVO durch eine zunehmende Sensibilisierung der Bevölkerung - immer größer geworden. Aus diesem Grund wird ein eigenständiges Reifegradmodell angestrebt. Eine analoge Vorgehensweise wird für den Themenbereich Usability verfolgt. Hierbei soll einerseits die Usability im Wertschöpfungsprozess und andererseits die Usability der Produkte untersucht werden, um die Bedürfnisse von Mitarbeitern bzw. Kunden auch zukünftig bestmöglich befriedigen zu können.

Auf Basis des resultierenden Reifegrades gelingt die Entwicklung einer Strategie zur Einführung von Industrie 4.0. Dafür eignet sich ein durch einen neutralen Moderator geleiteter Workshop im Unternehmen, um mithilfe gezielter Diskussionen neue Ideen, Maßnahmen und Projekte abzuleiten. Die entstehende Strategie zur schrittweisen Einführung von Industrie 4.0 orientiert sich an den Bedürfnissen des Unternehmens und berücksichtigt gleichzeitig begrenzte Kapazitäten sowie finanzielle Mittel. Die mittel- bis langfristige Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit und des wirtschaftlichen Erfolgs kann mithilfe einer solchen Industrie 4.0-Strategie erzielt werden, was insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen entscheidend ist.

## Literatur

- Becker, P. (2018): Industrie 4.0 Reifegrad-Test. Abgerufen von: <http://www.connected-production.de/industrie-4-0-reifegrad-test/#step2>
- Borell, N. (2016): Das Industrie 4.0 Arbeitsbuch: Sind Digitalisierung, Industrie 4.0 und Disruption unterschiedliche Dinge?. Hamburg: tredition.
- Brunner, M., Jodlbauer, H. (2018): REIFEGRADMODELL INDUSTRIE 4.0. Abgerufen von: [https://www.mechatronik-cluster.at/fileadmin/user\\_upload/Cluster/MC/MC-Downloads/Reifegrad.pdf](https://www.mechatronik-cluster.at/fileadmin/user_upload/Cluster/MC/MC-Downloads/Reifegrad.pdf)
- BVMW (2018): Der Mittelstand ist Garant für Stabilität und Fortschritt. Abgerufen von: <https://www.bvmw.de/themen/mittelstand/zahlen-fakten/>
- Deutsche Telekom AG (2018): Wie digital ist ihr Unternehmen?. Abgerufen von: <https://www.digitalisierungsindex.de/>
- Feig, K., Bojko, M., Döhler, S., Merkel, A., Göhlert, N., Riedel, R., Zeidler, G. (2017): Systematische Ermittlung von Industrie 4.0-Potenzialen für KMU der Textilbranche auf dem Weg zur Textilfabrik der Zukunft. In: Müller, Egon (Hrsg.): futureTEX Basisvorhaben Smart Factory - Entwicklung von Prozessen und Strukturen für den Aufbau von Smart Factories in der Textilindustrie und Ableitung von typischen Industrie 4.0 Anwendungen: Schlussbericht. - Chemnitz : TU Chemnitz, S. 95 - 103. - Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme; Heft 126.
- Feig, K., Bojko, M., Göhlert, N., Riedel, R., Müller, E. (2017): Bewertungsmodell zur Potenzialermittlung von Industrie 4.0-Technologie. In: Müller, Egon (Hrsg.): Arbeitswelten 4.0 – Chancen, Herausforderungen, Lösungen. 16. Tage des Betriebs- und Systemingenieurs – TBI2017. Chemnitz: TU Chemnitz, Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, Sonderheft 23, S. 281-289.
- H&D International Group (2018): Industrie 4.0 readiness - Intelligente Wertschöpfung durch Industrie 4.0. Abgerufen von: <https://www.hud.de/industrie-4-0>
- Hanschke, I. (2018): Digitalisierung und Industrie 4.0 - einfach und effektiv: Systematisch und lean die Digitale Transformation meistern. München: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- Hicking, J. (2018): Industrie 4.0 gestalten: Konzipieren - Ist mein Unternehmen schon reif für die Digitalisierung? Was sind meine nächsten Schritte?. Abgerufen von: <https://www.digital-in-nrw.de/de/unsere-angebote/konzipieren>.
- Hochschule Neu-Ulm, minnosphere (2018): Hochschule für angewandte Wissenschaften Neu-Ulm. Abgerufen von: <http://reifegradanalyse.hs-neu-ulm.de/>
- IHK München und Oberbayern (2018): Digitalisierung im Mittelstand - Leitfaden Industrie 4.0. Abgerufen von: <https://ihk-industrie40.de/>
- Kese, D. (2017): Industrie 4.0-Reifegradmodelle. Abgerufen von: [https://www.arbeitswissenschaft.net/uploads/tx\\_news/Tool\\_I40\\_Reifegradmodelle.pdf](https://www.arbeitswissenschaft.net/uploads/tx_news/Tool_I40_Reifegradmodelle.pdf)

- Lichtblau, K., Stich, V., Bertenrath, R., Blum, M., Bleider, M., Millack, A., Schmitt, K., Schmitz, E., Schröter, M. (2015): Industrie 4.0-Readiness. Aachen, Köln: IMPULS-Stiftung des VDMA.
- Ludwig, T., Kotthaus, C., Stein, M., Durt, H., Kurz, C., Wenz, J., Doublet, T., Becker, M., Pipek, V., Wulf, V. (2015): Arbeiten im Mittelstand 4.0 - KMU im Spannungsfeld des digitalen Wandels. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Mittelstand 4.0 Kompetenzzentrum Chemnitz (2018): Bedarfsanalyse - Stand der Digitalisierung im sächsischen Mittelstand. Ergebnisse - Schlussfolgerungen - Bedarfe - Unterstützungsangebote.
- Müller, E., Chen, X., Riedel, R. (2017): Challenges and Requirements for the Application of Industry 4.0: A Special Insight with the Usage of Cyber-Physical System. In: Chinese Journal of Mechanical Engineering, S. 1-8.
- Müller, E., Hopf, H. (2017): Competence Center for the Digital Transformation in Small and Medium-Sized Enterprises. In: Procedia Manufacturing, 11, Elsevier, S. 1495-1500.
- Rauen, H., Andert, R., Fleischer, J. (2015): Leitfaden Industrie 4.0 - Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand. Frankfurt am Main: VDMA Verlag GmbH.
- Reinhart, G. (2017): Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- Reuter, C., Gartzten, T., Prote, J.-P., Fränken, B. (2016): Industrie-4.0-Audit. VDI-Z Integrierte Produktion. Abgerufen von: <https://www.vdi-z.de/2016/Ausgabe-06/Forschung-und-Praxis/Industrie-4.0-Audit>
- Schröder, C. (2016): Herausforderungen von Industrie 4.0 für den Mittelstand. Abgerufen von: <http://library.fes.de/pdf-files/wiso/12277.pdf>
- Schuh, G., Anderl, R., Gausemeier J., ten Hompel, M., Wahlster, W. (Hrsg.) (2017): Industrie 4.0 Maturity Index. Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten (acatech STUDIE), München: Herbert Utz Verlag.
- Schumacher, J. (2018): Wissen ist Trumpf - was der Digitalisierung noch im Wege steht. Ergebnisse der Perfect Production Umfrage in 2017 zur Nutzung von Industrie 4.0-Modellen, Productivity 1/2018, S. 16-18.
- Wolff, D., Göbel, R. (Hrsg.) (2018): Digitalisierung-Segen oder Fluch - Wie die Digitalisierung unsere Lebens-und Arbeitswelt verändert. Berlin: Springer.
- Zanker, S. (2016): Industrie 4.0 - Wie wirklich ist die Wirklichkeit. Eine Einstellungsmessung zur Zukunft der Arbeit im Kontext von Industrie 4.0 bei Beschäftigten des produzierenden Gewerbes aus dem Wirtschaftsraum Augsburg. Masterarbeit: FOM Hochschule für Oekonomie & Management, Studienzentrum Augsburg.



# Industrie 4.0 Assessment - Bewertungsmodell zur Identifikation und Priorisierung von Industrie 4.0 Umsetzungsmaßnahmen in KMUs

Dominik T. Matt<sup>1,2</sup>, Marco Unterhofer<sup>1</sup>, Erwin Rauch<sup>1</sup>, Michael Riedl<sup>2</sup>, Riccardo Brozzi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Industrial Engineering and Automation, Freie Universität Bozen;

<sup>2</sup>Fraunhofer Italia Research s.c.a.r.l., Bozen

## 1. Die Rolle von KMUs in der digitalen Transformation

### 1.1. Industrie 4.0 als Eckpfeiler und Ausgangspunkt für die digitale Transformation der Unternehmen

Die evolutionäre technische und technologische Weiterentwicklung im industriellen Umfeld seit der industriellen Revolution Anfang des 19. Jahrhunderts kann zusammenfassend auch als Versuch des Menschen beschrieben werden, immer komplexer werdende künstliche Systeme zu erschaffen, die ihn in zunehmenden Maße bei der Ausführung produktiver Tätigkeiten unterstützen oder ersetzen. Sektorenübergreifende steigende Automatisierungsgrade<sup>1</sup> machen deutlich, dass dies mit der Zeit immer besser gelang. Gleichzeitig lässt sich beobachten, dass die Komplexität der dazu notwendigen Systeme zur Steuerung und Regelung steigt (Mazzetto et al. 2016, Efthymiou et al. 2016).

Die Entwicklungsstufen automatisierter Systeme sind gekennzeichnet von einer zunehmenden Integration mechanischer, elektronischer und informationstechnischer Komponenten. Auf dem Stand der Technik haben kommerziell verfügbare Lösungen im Automatisierungsbereich das Level A5 - Evaluation nach Black (2003) erreicht (vgl. Abbildung 1), d.h. sie reagieren auf Umgebungseinflüsse und sind bis zu einem bestimm-

---

<sup>1</sup> unter dem Begriff Automatisierungsgrad wird in diesem Kontext vereinfachend die vorausgehende Mechanisierung und begleitende Digitalisierung der intelligenten Automatisierung von Produktionsprozessen zusammengefasst.

ten Grad in der Lage ihr eigenes Verhalten zu optimieren. In den Forschungslaboren wird verbreitet an den darauf aufbauenden Stufen gearbeitet. Selbst lernende Systeme, die in der Lage sind ihr Verhalten erfahrungsbasiert anzupassen, stehen dementsprechend im Fokus angewandter Forschung. Nach dem Modell von Black (2003) entspricht dies einem Grad der Automation auf Level A(6) oder A(7) (vgl. Abbildung 1).

Grad der Automation – Ersatz menschlicher Fähigkeiten

Level A1	Level A2	Level A3	Level A4	Level A5	Level A6	Level A7	Level A8	Level A9
ENERGY	DEXTERITY	DILIGENCE	JUDGMENT	EVALUATION	LEARNING	REASONING	CREATIVITY	DOMINANCE
Ersatz physischer Arbeit						Ersatz Intellektueller Arbeit		

Abbildung 1: Grad der Automation (vgl. Black (2003)).

Insbesondere die Entwicklung nachhaltiger Konzepte zur Zusammenarbeit von Mensch und Maschine in Form von Assistenzsystemen sind ein wichtiger Erfolgsfaktor erfolgreicher Technologieintegration in Unternehmen. Die wesentlichen Herausforderungen, die sich aus technologischer Sicht dabei stellen sind (Mazzetto et al. 2016):

- die Auswertung einer immensen Datenflut zur Filterung und Auswahl der wesentlichen Informationen und der darauf aufbauenden unmittelbaren Ableitung von Schlussfolgerungen;
- die Optimierung der Vernetzung von Informationen und Komponenten in verteilten Systemen über geeignete Kanäle;
- die unmittelbare Ergänzung der sensorischen Leistungsfähigkeit des Menschen durch das Erfassen, Modifizieren, Bündeln und Darstellen in Echtzeit von Informationen.

Diese Aspekte kennzeichnen inhaltlich viele der aktuell durchgeführten sogenannten "Industrie-4.0"-Initiativen und Projekte. Die Fragestellungen, wie sich eine effiziente und flexible Automation der Losgröße 1 realisieren lässt, verschieben sich also immer weiter in Richtung angewandter Informationstechnik, wie auch aus der oben angeführten Charakterisierung unterschiedlicher Automationsgrade ersichtlich wird. Für viele Unternehmen stellt dies eine Umstellung der bisher verwendeten Denkmuster und Vorgehensweisen dar. Während in der Vergangenheit die punktuelle Einführung digitaler Technologie beispielsweise im Marketing oder in der Kommunikation eine häufig anzutreffende Strategie war, mit der sich Unternehmen der Herausforderung Digitalisierung

stellen, geht im Moment der Trend eher zu einem ganzheitlichen Herangehen. Man spricht in diesem Kontext von der gleichzeitigen horizontalen und vertikalen Digitalisierung der Unternehmen (Rossi 2017). Als horizontal wird in diesem Kontext die Digitalisierung entlang des Produktlebenszyklus, insbesondere der Kette vom Lieferanten über den Hersteller bis zum Kunden, verstanden. Als vertikal wird die Digitalisierung über die Grenzen der unternehmensinternen Geschäfts- und Fachbereiche hinweg bezeichnet. Dies stellt im gleichen Moment eine Herausforderung und Chance für die Unternehmen dar, da eine ganzheitliche Herangehensweise deutlich komplexer ist, aber auf der anderen Seite auch mehr Vorteile verspricht. Industrie 4.0 als produktionstechnologisch orientierte Ausprägung der digitalen Transformation von Unternehmen kann als Ausgangspunkt für Umsetzungsprojekte einen risikoarmen Einstieg in eine angepasste Digitalisierungsstrategie bilden, insbesondere in der heutigen Situation, in der es gilt als First-Follower von den Erfahrungen der anderen zu lernen. Auf der anderen Seite kann eine zielgerichtete Realisierung in mehreren Umsetzungsstufen einen wichtigen Beitrag zur nachhaltigen Implementierung bieten, wenn bereits kurz- bis mittelfristig erzielbare Effizienzvorteile und Kostenreduktion zur Finanzierung weiterer und umfangreicherer Investitionen in Industrie 4.0 Konzepte verwendet werden (MacDougall 2014, Spath et al. 2013).

### 1.2. Notwendigkeit für Industrie 4.0 und den digitalen Wandel in klein- und mittelständischen Unternehmen

In größeren Unternehmen sind umfassende Digitalisierungsinitiativen bereits häufig in die zentrale Unternehmensstrategie integriert, hingegen haben kleinere Unternehmen oft Probleme die Industrie-4.0-Paradigmen in die Praxis umzusetzen (Dassisti et al. 2017, Schmeiss/Dopfer 2017, OECD 2018). Es lässt sich beobachten, dass die Verankerung der Digitalisierungsaspekte in der Unternehmensstrategie dazu führt, dass in einem ersten Schritt häufig interne Produktionsprozesse, z.B. hinsichtlich durchgängiger Informationsflüsse oder der Arbeitsaufteilung zwischen Mensch und Maschine genauso wie die generelle Positionierung entlang der ganzen Wertschöpfungskette überdacht und angepasst werden. Genauso wie größere Unternehmen ist für kleinere Unternehmen die Anpassung ihrer Unternehmensstrategie an oben genannte Entwicklungen zukünftig eine wichtige Voraussetzung um auf überregionalen Märkten wettbewerbsfähig zu bleiben, d.h. die zu erwartenden Effizienzvorteile den z.T. größeren Mitbewerber, die in ihrer digitalen Transformation einen Schritt voraus sind, möglichst schnell auszuglei-

chen oder gar umzudrehen. Alleine schon aufgrund der begrenzten finanziellen Möglichkeiten kleinerer Unternehmen ist eine kurzfristige First-Follower-Reaktion notwendig. In einer aktuellen Studie stellt die OECD vergleichend die Produktivitätskennwerte von KMU und Großunternehmen im produzierenden Gewerbe gegenüber (OECD 2018). Größere Unternehmen haben insbesondere in einem investitionsintensiven Umfeld, wie dem produzierenden Gewerbe, Produktivitätsvorteile aufgrund von Skaleneffekten. Während der Unterschied in der Produktivität zwischen kleinen Unternehmen und großen Unternehmen laut OECD in den letzten Jahren eher zurückgeht, hat sich der Unterschied in der Produktivität zwischen großen Unternehmen und sehr kleinen Unternehmen seit der Krise im Jahr 2007-08 sogar leicht vergrößert. Die Studie stellt gleichzeitig auch fest, dass die digitale Transformation unabhängig von der Größe eines Unternehmens Wachstumsmöglichkeiten bietet, die bis zu einem gewissen Punkt unabhängig von der Anzahl zusätzlich eingestellter Mitarbeiter oder der Investition in Anlagen ist, also insbesondere Chancen für kleinere Unternehmen bietet bestehende Lücken zu verkleinern oder zu schließen.

Tabelle 1 belegt die wichtige Rolle kleiner und sehr kleiner Unternehmen als Rückgrat der europäischen Wirtschaft mit aktuellen Kennzahlen und zeigt die Hebelwirkung, welche passende Implementierungskonzepte für kleinere und mittlere Unternehmen haben können.

	<b>Micro</b>	<b>Small</b>	<b>Medium</b>	<b>Large</b>	<b>Total</b>
Anzahl Unternehmen [tsd.]	22232	1392	225	45	23894
Anteil aller Unternehmen	93,0%	5,8%	0,9%	0,2%	100%
Anzahl der MA [tsd.]	41669	27982	23398	46665	139714
Anteil aller Beschäftigten	29,8%	20,0%	16,7%	33,4%	100%
Wertschöpfung [Mrd. EUR]	1482	1260	1288	3065	7095
Anteil der Gesamtwertschöpfung	20,9%	17,8%	18,2%	43,2%	100%

Tabelle 1: Kennzahlen zu Anzahl, Beschäftigung und Wertschöpfung von KMU und Großunternehmen für das Jahr 2016 [EU-28, ohne Finanzsektor] (Muller et al. 2017).

## 2. Methodik zur Einführung von Industrie 4.0 in KMUs

Die praktische Erfahrung zeigt, dass ein methodisches Vorgehen zum Wissenstransfer Technologie intensiver Themen von der Forschung in die Praxis im Kontext kleiner und mittlerer Unternehmen helfen kann passende und wirksame Industrie 4.0 Initiativen für das produzierende Gewerbe zu implementieren (Riedl et al. 2016). Dies gilt insbesondere für die Startphase dieser Initiativen, in der kleine Unternehmen stark von externer zielgerichteter Unterstützung profitieren können (Kochan/Mischke 2017) um den typischen Herausforderungen, wie begrenztes Wissen zum Potenzial von I4.0 (Sommer 2015), fehlende Kompetenzprofile der Mitarbeiter und eingeschränkte IT Kompetenz oder technisches Wissen effizient zu begegnen (Dassisti et al. 2017, Gabriel/Pessl 2016).

Abbildung 2 zeigt ein von Matt et al. (2018) entwickeltes methodisches Vorgehen zur Einführung von Smart Factory Ansätzen in kleinen und mittleren Unternehmen.

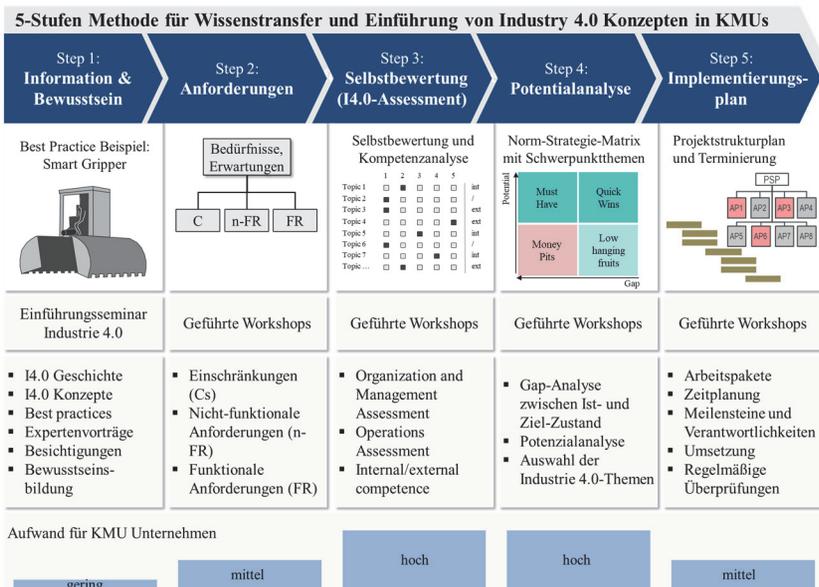


Abbildung 2: Fünfstufiges Vorgehensmodell für Wissenstransfer und Einführung von I4.0 Konzepten bei KMU (Matt et al. 2018).

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte des oben gezeigten Vorgehensmodells kurz zusammengefasst.

*Schritt 1 - Information & Bewusstsein:* Im Kontext von Industrie 4.0 besteht im Moment eine hohe konzeptuelle Diversität und gleichzeitig existieren unterschiedliche Definitionen von wichtigen Inhalten. Für Unternehmen, die sich zum ersten Mal diesem Themenkomplex nähern bedeutet dies einen hohen Aufwand sich zurecht zu finden und bestehende Informationsdefizite abzubauen. Im besten Falle dienen passende Anwendungsfälle, die im Rahmen von Workshops oder Seminaren erläutert und gezeigt werden dazu die theoretischen Konzepte auf die Realität des Unternehmens zu projizieren.

*Schritt 2 - Anforderungen:* Um die Rahmenbedingungen für die ersten Umsetzungsschritte und die Machbarkeitsuntersuchung zu definieren, müssen zu Beginn die Wünsche, Bedürfnisse und Anforderungen der beteiligten Stakeholder im Unternehmen festgelegt werden. Wenn möglich, sollten bereits in diesem Schritt die Anforderung möglichst konkret und messbar festgehalten werden. Zur Kategorisierung der Anforderungen kann Axiomatic Design als Methode verwendet werden. Auf Basis der funktionalen Anforderungen und möglicher Lösungen erfolgt eine systematische top-down Detaillierung der Problemstellung.

*Schritt 3 - Selbstbewertung:* Aufbauend auf den definierten Anforderungen und Rahmenbedingungen gilt es im Unternehmen zu einer objektiven Selbstbeurteilung der Ausgangssituation zu kommen, d.h. insbesondere die Fragen zu beantworten welche Industrie 4.0 Konzepte bereits in welchem Ausmaß implementiert wurden. Im Zuge dieser Bewertung wird auch ein Zielzustand definiert, welcher individuell auf das Unternehmen abgestimmt werden kann. Neben Erfassung von Ist- und Soll-Zustand wird auch das Potenzial der Industrie 4.0 Konzepte bewertet, da diese in Abhängigkeit von Größe oder Tätigkeitsbranche variieren kann.

*Schritt 4 - Potentialanalyse:* in diesem Schritt wird abgeschätzt, welcher Aufwand zur Realisierung des Industrie 4.0 Konzepts notwendig ist. Anhand der Anforderungen und der Ausgangssituation des Unternehmens ergeben sich für einzelne Aspekte Unterschiede zwischen dem vorhandenen Kompetenzlevel und dem gewünschten bzw. benötigten. Gleichzeitig muss dies in Relation zum individuellen Potenzial eines Themenbereichs oder Ansatzes für das Unternehmen gesetzt werden.

*Schritt 5 - Implementierungsplan:* Auf Basis der Potentialanalyse werden geeignete Handlungsschwerpunkte definiert und weiter vertieft.

Der Implementierungsplan umfasst weiterhin die einzelnen Umsetzungsschritte im Sinne einer individuellen Roadmap inklusive der beteiligten Teams, Meilensteine und Verantwortlichkeiten.

Zur Planung und späteren Umsetzung maßgeschneiderter Projekte einer I4.0-Initiative ist eine objektive Bewertung der individuellen Ausgangssituation und der Möglichkeiten und Voraussetzungen des einzelnen Unternehmens wichtige Voraussetzung für eine erfolgreiche Implementierung (Lichtblau et al. 2015). Auf Basis dieser Überlegungen wächst im wissenschaftlichen und industriellen Umfeld im Moment der Bedarf und die Nachfrage nach einem systematischen Ansatz bzw. geeigneten Werkzeugen oder Methoden zur Reifegradbestimmung für I4.0-Initiativen (Pessl et al. 2017).

In der Literatur finden sich diesbezüglich verschiedene Ansätze, die einerseits die Bereitschaft (engl. readiness) (Lichtblau et al. 2015, PwC 2016, Fh ISI 2015) und andererseits den Reifegrad (engl. maturity level) (Kanne et al. 2017, Ernst & Young 2018, Forrester Research 2016, Schuhmacher et al. 2016, Schuh et al. 2017) von Unternehmen hinsichtlich tiefgreifender technologischer und organisatorischer Veränderungen untersuchen.

Ein Unterschied liegt folglich im Zeitpunkt, wann beide Ansätze eingesetzt werden. Reifegradmodelle setzen folglich eher bei weiter fortgeschrittenen Entwicklungsstufen und darauf aufbauend einem höheren intern verfügbaren Erkenntnisstand innerhalb der Unternehmen an. Respektive lassen sich diese beiden Ansätze den Schritten 3 und 4 des oben angeführten methodischen Ansatzes zuordnen. Gleichwohl existieren weitere Forschungsansätze und Vorgehensmodelle, die eher auf die Anforderungen und Randbedingungen großer Unternehmen zugeschnitten sind, sowie Ansätze die zwar die Gegebenheiten kleinerer und mittlerer Unternehmen in den Mittelpunkt stellen, die inhaltliche Abgrenzung allerdings weiter fassen und allgemein auf das Thema Innovation in Unternehmen fokussieren (Rammer/Frietsch 2015, Spithoven et al. 2013).

Tabelle 2 zeigt eine Auswahl der gefundenen Ansätze in der Literatur. Obwohl die gefundenen Ansätze verschiedene Charakteristika und Komplexitätsgrade aufweisen, sind die verwendeten Dimensionen und Untersuchungselemente ("items") ähnlich.

<b>Tool</b>	<b>Autoren</b>	<b>Struktur</b>
IMPULS – Industrie 4.0 Readiness	VDMA, RWTH Aachen, IW Consult	6 Dimensionen und 18 Items.
Industry 4.0 – Digital Operations Self-Assessment	PricewaterhouseCoopers	6 Dimensionen und 33 Items.
Benchmarking Readiness I4.0	Fraunhofer ISI	3 Dimensionen und 9 Items.
I4.0 Reifegradmodell	FH-Oberösterreich	3 Dimensionen und 13 Items.
I4.0 Maturity Model	Fraunhofer Austria; Vienna University of Technology	9 Dimensionen und 62 Items.
The Digital Maturity Model 4.0	Forrester Research	4 Dimensionen und 28 Items.
The Digital Maturity Check	EY	7 Dimensionen und 14 Items.
Achieving Digital Maturity	Deloitte	5 Dimensionen und 35 Items.
Digitalisation Index	Telekom-techconsult	4 Dimensionen und 56 Items
Digital Maturity Assessment Test	Ericsson	7 Dimensionen und 7 Items.

Tabelle 2: Existierende Tools zur Selbstbewertung.

### 3. I4.0 Assessment - Orientierungshilfe für KMUs zur Identifikation und Priorisierung von Umsetzungsmaßnahmen

Die in Kapitel 2.2 beschriebene Methode zur Einführung von Industrie 4.0 in KMUs verwendet in Schritt 3 ein reifegradbasiertes Bewertungsmodell zur Selbstbewertung (I4.0 Assessment) des Unternehmens. In diesem Kapitel wird die Struktur sowie die Funktionsweise dieses I4.0 Assessments näher beleuchtet.

#### 3.1. Identifikation von möglichen Industrie 4.0 Konzepten als Bewertungsgrundlage

Zur Entwicklung eines Industrie 4.0 Bewertungsinstruments gilt es zunächst die zu Grunde liegenden Industrie 4.0 Konzepte zu identifizieren. In dieser Arbeit wurde hierfür eine systematische Literaturanalyse durchgeführt. Das Adjektiv "systematisch" bezieht sich dabei auf eine klar strukturierte Abfolge von Einschluss- und Ausschlusskriterien für die durchzuführende Literaturanalyse, um möglichst alle relevanten Aspekte abzudecken.

Der erste Schritt der SLA umfasst die *Festlegung der Forschungsfrage*. Nach dem Prinzip von Liao et al. (2017) besteht soll mit der Forschungsfrage eine explizite und konkrete Zielformulierung geschaffen werden:

*"Welche Industrie 4.0 Konzepte gibt es derzeit in der internationalen wissenschaftlichen Literatur?"*

Der zweite Schritt der SLA beinhaltet die *Festlegung des Rahmens und der Methodik* für die systematische Literaturanalyse. In Anlehnung an die Forschungsarbeit von Liao et al. (2017) werden drei Überprüfungsprinzipien festgelegt und berücksichtigt, um die Subjektivität der Analyse auf ein Minimum zu reduzieren (Tranfield et al. 2003):

- Einschluss- und Ausschlusskriterien;
- Objektive Überprüfungsstrategie;
- Datenerhebung mit Beweisen.

Es wurden neun Einschlusskriterien und zwei Ausschlusskriterien festgelegt, deren Merkmale in Tabelle 3 dargestellt werden.

Das erste Einschlusskriterium bildet die (E1) *Datenbank (DB)*. In unserer Recherche wurde SCOPUS (Elsevier) aufgrund ihrer Vollständigkeit als Datenbank für die Recherche ausgewählt. Zur Identifizierung von Industrie 4.0 bezogenen wissenschaftlichen Arbeiten wurde als (E2) *Suchbegriff (SB)* das Schlüsselwort "Industry 4.0" definiert. Die Qualität der Datenbankausgabe wird durch das dritte Einschlusskriterium sichergestellt, welches die Relevanz des (E3) *Quellentyps (QT)* unter Betracht zieht. Dabei werden ausschließlich in Fachzeitschriften ("journals") veröffentlichte Forschungsarbeiten berücksichtigt, welcher der (E4) *Dokumentart (DA)* "article", "review" oder "articles in press" entsprechen. Das Kriterium (E5) *Deckungsperiode (DP)* definiert den Zeitraum der Recherche und untersucht Arbeiten, welche im Zeitraum von 2011 (Aufkommen des Begriffs Industrie 4.0) bis 2017 veröffentlicht wurden und das Kriterium (E6) *Sprache (S)* inkludiert Arbeiten in Englischer Sprache. Auch wenn der Suchbegriff bereits als Filter wirkt, wird durch das Kriterium (E7) *Themenbereich (TB)* eine zusätzliche Präzisierung ermöglicht. Die ausgewählten Themenbereiche für unsere Recherche umfassen dabei ein breites Spektrum: Ingenieurwissenschaften, Informatik, Wirtschaft, Management und Rechnungswesen, Materialwissenschaften, Sozialwissenschaften, Entscheidungswissenschaften, Energie, Wirtschaft, Ökonometrie und Finanzen und Psychologie vertreten sind. Abschließend wurde auf Basis eines manuellen Screenings die inhalts-

bezogene Relevanz der gefundenen Artikel bewertet. Als inhaltliche Einschlusskriterien wurden daher nur (E8) *Sehr Relevante (SR)* bzw. (E9) *Mittelmäßig Relevante (MR)* Artikel berücksichtigt. Als Ausschlusskriterien wurden folgende Attribute definiert: Dokumente mit (A1) *Unzureichender Vollständigkeit des Quelltyps (VQT)* wurden nicht weiter berücksichtigt. Auf Basis des manuellen inhaltsbezogenen Screenings wurden (A2) *Nicht Relevante (NR)* Arbeiten ebenfalls ausgeschlossen.

<b>Kriterien</b>	<b>Beschreibung der Kriterien</b>
<b>Einschlusskriterien</b>	
E1 - Datenbank (DB)	Scopus von Elsevier
E2 - Suchbegriffe (SB)	Suchbegriff "Industry 4.0"
E3 - Quellentyp (QT)	Fachzeitschriften (Journals)
E4 - Dokumentart (DA)	article, review, articles in press
E5 - Deckungsperiode (DP)	2011 - 2017
E6 - Sprache (S)	International Arbeiten in Englischer Sprache
E7 - Themenbereich (TB)	Engineering, Computer Science, Business, Management and Accounting, Materials Science, Social Sciences, Decision Sciences, Energy, Economics, Econometrics and Finance, Multidisciplinary und Psychology
E8 - Mäßig relevant (MR)	Wissenschaftliche Arbeiten, die nur annähernd Industrie 4.0 Konzepte anführen.
E9 - Sehr relevant (SR)	Forschungsarbeiten, die explizit Industrie 4.0 Konzepte beschreiben.
<b>Ausschlusskriterien</b>	
A1 - Vollständigkeit des Quelltyps (VQT)	Wissenschaftliche Arbeiten die keine Vollständigkeit aufweisen werden nicht betrachtet.
A2 - Nicht relevant (NR)	Wissenschaftliche Arbeiten ohne Schwerpunkt auf Industrie 4.0.

Tabelle 3: Übersicht der Ein- und Ausschlusskriterien für die SLA.

Die zweite Maßnahme zur Minimierung der Subjektivität umfasst eine *objektive Überprüfungsstrategie*. Diese wurde in der Phase des manuellen Screenings der gefundenen Arbeiten angewandt. Hierfür wurden

die Arbeiten zunächst von zwei Forschern unabhängig voneinander gesichtet. In Situationen, die durch einen Mangel an Konsens gekennzeichnet waren, übernimmt ein dritter unparteiischer Forscher die Rolle des Entscheidungsträgers über die Relevanz (NR, MR oder SR).

Das dritte Überprüfungsprinzip wird als *Datenerhebung mit Beweisen* bezeichnet. Dies bedeutet, dass für die Erhebung bestimmter Daten, die subjektive Beurteilungen erfordern, auch die ursprünglichen unterstützenden Textbeschreibungen des Artikels als Notizen in die Datenbank aufgenommen werden. Die Umsetzung der angeführten Maßnahme gewährleistet die Vollständigkeit und erleichtert das Verständnis der ausgewählten Dokumente (Liao et al. 2017). Hierfür wurden Textauschnitte, welche die Bewertung der Relevanz beim manuellen Screening unterstützt haben in der Datenbank den jeweiligen Artikeln zugeordnet.

Die Durchführung der SLA auf Basis der vorher definierten Kriterien und Überprüfungsprinzipien ergab ausgehend von einer Gesamtanzahl an 733 Publikationen insgesamt 102 relevante Publikationen, wobei 27 sehr relevant sind und 75 mittelmäßig relevant sind.

Diese identifizierten Arbeiten stellen die Grundlage für eine anschließende inhaltliche Analyse ("content analysis") dar, aus der einzelnen Industrie 4.0 Konzepte entnommen werden konnten. Die inhaltliche Analyse ergab insgesamt 42 Industrie 4.0 Konzepte, die als Basis für das Selbstbewertungsmodell angewandt wurden. Das breite Spektrum der identifizierten Konzepte erfordert die Strukturierung in mehrere Ebenen bzw. Dimensionen. In einer ersten Dimensionsebene wurden die Konzepte wie folgt klassifiziert:

- *Operation* (Konzepte für die Produktion und operative Abläufe)
- *Organiation* (Konzepte für organisatorische und managementorientierte Abläufe)
- *Socio-Culture* (Konzepte bezogen auf die Unternehmenskultur und mitarbeiterbezogene Themen)
- *Technology* (daten- und prozessorientierte Technologien).

In einer zweiten Dimensionsebene wurden insgesamt 21 Kategorisierungseinheiten identifiziert. Tabelle 5 fasst die identifizierten Industrie 4.0 Konzepte samt Dimensionsebene I und II in alphabetischer Reihenfolge dar.

<b>Nr</b>	<b>Dim. Ebene I</b>	<b>Dimensionsebene II</b>	<b>Industrie 4.0 Konzept</b>
1	Operation	Agile Manufacturing Systems	Agile Manufacturing System
2			Self-Adapting Manufacturing Systems
3			Continuous and Uninterrupted Material Flow Models
4			Plug and Produce
5		Monitoring & Decision Systems	Decision Support Systems
6			Integrated and Digital Real-Time Monitoring Systems
7			Remote Monitoring of Products
8		Big Data for Production	Production Data Analytics
9		Production Planning and Control	ERP / MES Integration
10	Organization	Business Models 4.0	Digital Product-Service Systems
11			Servitization and Sharing Economy
12			Digital Add-on or Upgrade
13			Digital Lock-In
14			Freemium
15			Digital Point of Sales
16		Innovation strategy	Open Innovation
17		Strategy 4.0	Industry 4.0 Roadmap
18		Supply Chain Management 4.0	Sustainable Supply Chain Design
19	Collaboration Network Models		
20	Socio-Culture	Human Resource 4.0	Training 4.0
21		Work 4.0	Role of the Operator
22		Culture 4.0	Cultural Transformation
23	Technology	Big Data	Cloud Computing
24		Communication & Connectivity	Digital and Connected Workstations
25			E-Kanban
26			Internet of Things and Cyber-Physical Systems

27		Cyber Security	Cyber Security
28		Deep Learning, Machine Learning, Artificial Intelligence	Artificial Intelligence
29			Object Self Service
30		Identification and Tracking Technology	Identification and Tracking Technology
31		Additive Manufacturing	Additive Manufacturing (3D-Printing)
32		Maintenance	Predictive Maintenance
33			Tele-Maintenance
34		Robotics & Automation	Automated Storage Systems
35			Automated Transport Systems
36			Automated Manufacturing & Assembly
37			Collaborative Robotics
38			Smart Assistance Systems
39		Product Design and Development	PDM and PLM
40		Standards 4.0	CPS Standards
41		Virtual Reality, Augmented Reality and Simulation	VR and AR
42			Simulation

Tabelle 5: Dimensionsebenen der identifizierten Industrie 4.0-Konzepte.

### 3.2. Reifegradbasierte Entwicklung des Bewertungsmodells

Auf Basis der identifizierten Industrie 4.0 Konzepte wird im Folgenden die Entwicklung des reifegradbasierten Selbstbewertungsmodells für die Identifikation und Priorisierung von Umsetzungsmaßnahmen in KMUs beschrieben.

Für das Bewertungsmodell wurden für jedes der 42 Industrie 4.0 Konzepte entsprechende Reifegrade in fünf Abstufungen definiert. Die Wahl für ein fünfstufiges Verfahren wurde auf der Basis ähnlicher Bewertungs- und Reifegradmodelle getroffen (Schumacher et al. 2016; Zheng/Ming 2017). Zum Unterschied zu anderen Modellen verwendet das hier dargestellte Bewertungsmodell keine allgemeine Likert-Skala aus fünf Stufen, sondern orientiert sich vielmehr am VDMA-Werkzeugkasten für Industrie 4.0 bei Produkten und in der Produktion (VDMA,

2015), welcher die Abstufungen anhand konkreter Maßnahmen oder technischen Lösungen darstellt und damit für den Praktiker einfacher in seiner Anwendung ist. Dies zumal es für Praktiker in KMUs häufig sehr schwierig ist zu bewerten, inwieweit auf einer Skala von 1 bis 5 das jeweilige Konzept bereits eingeführt wurde. Es ist viel einfacher zu bewerten ob bspw. die Produktidentifikation rein auf Basis eines Barcodes durchgeführt wird oder ob bspw. ein RFID-Tag hierfür verwendet wird.

Neben der Kurzbeschreibung des jeweiligen Reifegrads wurde im Bewertungssystem jeweils auch ein Beispiel integriert. Der gewählte Ansatz hat zum Ziel, die Verständlichkeit für den Praktiker aus KMUs zu erhöhen und daher auch die Aussagefähigkeit des Bewertungsergebnisses zu maximieren.

Abbildung 3 zeigt beispielhaft einen Auszug aus den Reifegraden der identifizierten Industrie 4.0 Konzepte.

INDUSTRY 4.0 CONCEPT	Maturity Level 1	Maturity Level 2	Maturity Level 3	Maturity Level 4	Maturity Level 5
Remote Monitoring of Products	Products are not monitored <i>/Products are not monitored after delivery</i>	Spotwise Product Checks <i>/Products are monitored spotwise by the customer or a sales agent or a technician</i>	Periodic Product Checks <i>/Products are monitored by the manufacturer through periodic condition checks</i>	Remote Product Monitoring <i>/Products are digitally monitored by the manufacturer through remote access</i>	Remote Product Control <i>/Products are monitored and controlled through remote access</i>
Big Data Analytics	No data analytics <i>/no use of existing data</i>	Manual Data Analytics of existing data <i>/minimal use of existing data based on Excel or similar</i>	Big Data Projects <i>/collect data in a structured way and perform big data analytics projects through external experts</i>	Big Data Analytics Tools <i>/collect and analyze production and logistics data for process optimization with big data analytics tools</i>	Internal Big Data Analytics Experts <i>/collect and analyze production and logistics data for process optimization through skilled internal experts (production data analysts)</i>
ERP/MES	no ERP system	ERP system <i>/ERP system implemented</i>	ERP and PPC system <i>/Production Planning and Control system used for material requirement planning</i>	MES implementation <i>/MES system or similar implemented but not integrated with ERP</i>	ERP / MES Integration <i>/ERP and MES are integrated and communicate with each other</i>
Digital Product-Service Systems	only physical product	Maintenance business models <i>/maintenance services sold together with product</i>	Product Service System <i>/extended services sold together with product</i>	Digital Product-Service Systems <i>/digital services sold together with the product</i>	Web/Cloud-based Product-Service Architectures <i>/digital services available on via web, app or cloud</i>
Servitization and Sharing Economy	Ownership based business model <i>/Customer buys physical product (Ownership)</i>	Leasing based business model <i>/Customer pays the leasing rate to get ownership</i>	Rental based business model <i>/Customer pays a rental rate (no ownership intended)</i>	Servitization model <i>/customer pays for the service</i>	Sharing Economy platform model <i>/customers share access to products or services with other customers</i>

Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung von Industrie 4.0 Konzepten und Reifegraden.

Im Rahmen der Selbstbewertung gibt das Unternehmen eine Bewertung des aktuellen Stands bezüglich der Umsetzung von Industrie 4.0 Konzepten anhand der Auswahl eines der oben gezeigten Reifegrade an (*Firms I4.0 Score*). Zudem gibt das Unternehmen auch einen Reifegrad an, den es in mittelfristiger Zukunft gerne erreichen würde und auch realistisch in der Umsetzbarkeit sieht (*Target Score*).

Als drittes wird das Unternehmen gebeten eine Abschätzung bezüglich der Bedeutung bzw. des Potenzials (*Importance*) des jeweiligen Industrie 4.0 Konzeptes abzugeben. Diese Abschätzung wird auf Basis einer

ebenfalls 5-stufigen Likert Skala durchgeführt und ist notwendig, da nicht jedes der gelisteten Industrie 4.0 Konzepte für das individuelle Unternehmen von Bedeutung ist. Während bspw. die Rückverfolgbarkeit der Produkte für bestimmte Unternehmen und Branchen (Automobilsektor, Nahrungsmittelsektor) unumgänglich und von größter Bedeutung ist, kann dieser Punkt in anderen KMUs eine weit weniger wichtige Rolle spielen.

Insofern wird die Abschätzung des Potentials dazu genutzt, um den Unterschied zwischen Ist- und Soll-Zustand (*Gap*) zu berechnen und damit die Grundlage für die Priorisierung der Umsetzungsmaßnahmen der einzelnen Industrie 4.0 Konzepte zu schaffen.

Abbildung 4 zeigt einen Ausschnitt des auf MS Excel basierenden Selbstbewertungs-Tools mit den vom KMU auszufüllenden Feldern.

1 = "Maturity Level 1"  
2 = "Maturity Level 2"  
3 = "Maturity Level 3"  
4 = "Maturity Level 4"  
5 = "Maturity Level 5"

1 = "not at all important"  
2 = "slightly important"  
3 = "important"  
4 = "fairly important"  
5 = "very important"

Maturity Level 5	Firms I4.0 score	Target Level	Importance
<b>Remote Product Control</b> <i>/Products are monitored and controlled through remote access</i>	3	3	1
<b>Internal Big Data Analytics Experts</b> <i>/professional application of big data analytics through skilled internal experts (production data analysts)</i>	4	4	3

Abbildung 4: Auszufüllende Felder seitens der KMUs im Selbstbewertungs-Tool.

Abbildung 5 zeigt ein Beispiel der Ergebnisvisualisierung basierend auf Bewertungsergebnissen einer erfolgten Pilotanwendung in der Industrie.

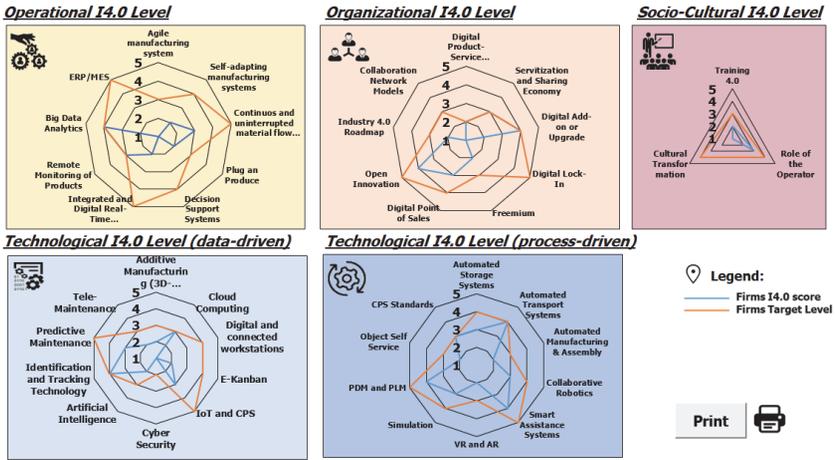


Abbildung 5: Visualisierung der Bewertungsergebnisse aus dem I4.0-Assessment.

Zur Priorisierung der Industrie 4.0-Konzepte und damit zur Definition der Umsetzungsmaßnahmen wird im Selbstbewertungs-Tool automatisch eine Rangfolge auf Basis des ermittelten Potenzials erstellt (siehe Abbildung 6).

⬅ Back
🖨 Print
💾 Save
📧 Send

Rank	I4.0 Concept	I4.0 Potential
1	Agile manufacturing system	5
2	Plug and Produce	5
3	Digital Product-Service Systems	5
4	Industry 4.0 Roadmap	5
5	Training 4.0	5
6	Additive Manufacturing (3D-Printing)	5
7	Identification and Tracking Technology	5
8	ERP/MES	4
9	Digital Add-on or Upgrade	4
10	Open Innovation	4

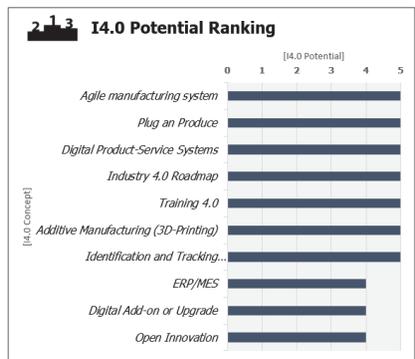


Abbildung 6: Visualisierung des abgeschätzten Potenzials der Industrie 4.0 Konzepte.

Beide Kriterien, nämlich das Gap und das identifizierte Potenzial werden schließlich wie in Abbildung 2 aufgezeigt in einer Normstrategie-Matrix zusammengeführt, um die Auswahl von Umsetzungsmaßnahmen von Industrie 4.0 Konzepten zu erleichtern und auch zeitlich einordnen

zu können (kurzfristig vs. mittelfristig umsetzbare I4.0 Konzepte). Abbildung 7 zeigt schematisch die Matrix mit folgenden Normstrategien in Abhängigkeit des jeweiligen Quadranten in der Darstellung:

- Quick-Wins (hohes Potenzial - geringes Gap)
- Must Have (hohes Potenzial - hohes Gap)
- Low Hanging Fruits (geringes Potenzial - geringes Gap)
- Money Pits (geringes Potenzial - hohes Gap).

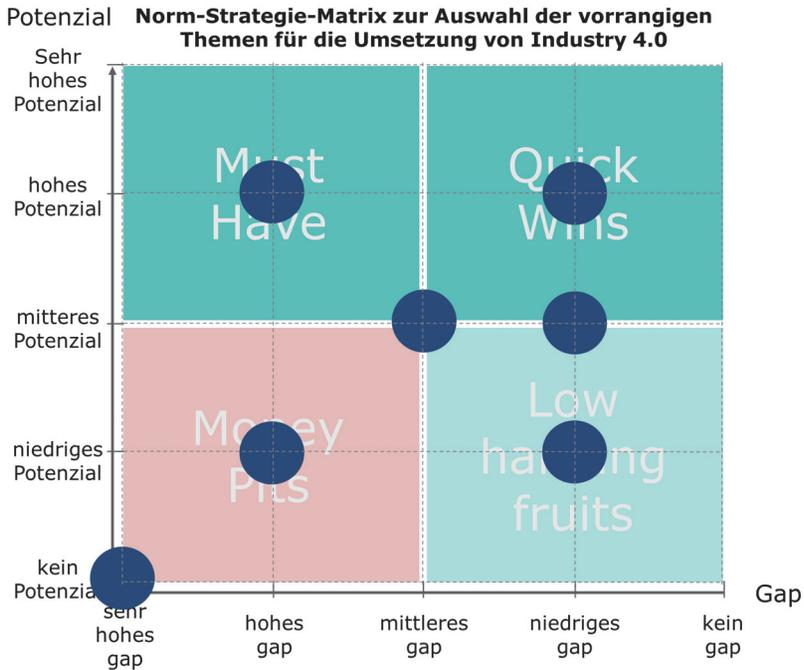


Abbildung 7: Normstrategie-Matrix zur Definition von Umsetzungsmaßnahmen.

In Abhängigkeit der Position der analysierten Industrie 4.0 Konzepte wird im Anschluss definiert ob und in welchem Ausmaß sowie in welchem Zeitfenster Umsetzungsmaßnahmen definiert werden.

## 4. Zusammenfassung

Während große Unternehmen sich bereits seit längerer Zeit mit der Einführung von Industrie 4.0 auseinandersetzen fehlt es derzeit noch an spezifischen und für KMU zugeschnittenen Werkzeugen zur systematischen Unterstützung. In diesem Kapitel wurde daher eine Methodik mit fünf Schritten vorgestellt, welche KMUs in der Umsetzung von Industrie 4.0 Projekten unterstützen soll. Der Fokus in diesem Beitrag liegt dabei vor allem auf der Phase der Selbstbewertung des Unternehmens und der darauf aufbauenden Potenzialanalyse zur Identifikation und Priorisierung von Umsetzungsmaßnahmen. Hierzu hat das Forschungsteam ein sogenanntes "I4.0 Assessment" Tool entwickelt, welches bereits in mehreren Pilotanwendungen in KMUs aus den Vereinigten Staaten, Italien sowie der Slowakei in der Praxis getestet wurde. Basis für das Tool sind 42, in einer systematischen Literanalyse identifizierten, Industrie 4.0 Konzepte.

## 5. Danksagung



Dieses Projekt wurde aus dem Forschungs- und Innovationsprogramm Horizon 2020 der Europäischen Union im Rahmen der Marie Skłodowska-Curie-Fördervereinbarung Nr. 734713 gefördert.

## Literatur

- Black, J.T., Hunter, S.L. (2003). Automation and Autonomation. In J.T. Black und S.L. Hunter (Hrsg.): *Lean Manufacturing Systems and Cell Design*, Society of Manufacturing Engineers, ISBN: 978-1-62104-019-4, S. 273-290.
- Dassisi, M., Panetto, H., Lezoche, M., Merla, P., Semeraro, C., Giovannini, A., Chimienti, M. (2017). Industry 4.0 paradigm: The viewpoint of the small and medium enterprises, In: 7th International Conference on Information Society and Technology, ICIST 2017 Kopaonik, Serbien 12.-15. März 2017, S. 50–54.
- Efthymiou, K., Mourtzis, D., Pagoropoulos, N., Papakostas, N. & Chryssolouris G. (2016). Manufacturing systems complexity analysis methods review. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 29 (9), S. 1025-1044, DOI: 10.1080/0951192X.2015.1130245.
- Ernst & Young (2018). Digital Maturity Check. [Online]. Online verfügbar unter: <https://digitalmaturitycheck.ey.com/>, zuletzt geprüft am 20.06.2018.
- Fh ISI - Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2015). Internet-based self-assessment instrument Industrie 4.0 for Baden-Württemberg. Fraunhofer-

Gesellschaft. Online verfügbar unter: <http://www.industriebenchmarking.eu/readiness>, zuletzt geprüft am 20.06.2018.

Forrester Research (2016). The Digital Maturity Model 4.0.

Gabriel, M., Pessl, E. (2016). Industry 4.0 and suitability impacts. critical discussion of suitability aspects with a special focus on future of work and eco-logical consequences. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara - International Journal of Engineering*, S. 131-136.

Kane, G. C., Palmer, D., Phillips, A. N., Kiron D. & Buckley. N. (2017). Achieving Digital Maturity. Adopting your company to a changing world. MIT SIOan Management Review and Deloitte University Press.

Kochan, D., Mischke, R. (2017). Advanced Manufacturing and Industrie 4.0 for SME. Newtech, 5th International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies, Belgrade, Serbien, 5-9 Juni 2017.

Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E., & Ramos, L. (2017). Past, present and future of Industry 4.0-a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*, Vol. 55 (12), S. 3609-3629.

Lichtblau K., Stich, V., Bertenrath, R., Blum, M., Bleider, M., Millack, A., Schmitt, A., Schmitz, E. & Schröter, M. (2015). Industrie 4.0 - Readiness. Aachen: Stiftung für den Maschinenbau, den Anlagenbau und die Informationstechnik (VDMA).

MacDougall, W. (2014). Industrie 4.0 - Smart Manufacturing for the Future. Berlin: Trade & Invest.

Matt, D.T., Rauch, E., Riedl, M. (2018). Knowledge Transfer and Introduction of Industry 4.0 in SMEs - A Five Step Methodology to introduce Industry 4.0. In: R. Brunet-Thornton und F. Martinez (Hrsg.): *Analyzing the Impacts of Industry 4.0 in Modern Business Environments*. Hershey, PA: IGI Global. doi:10.4018/978-1-5225-3468-6.ch013, S.256-282.

Mazzetto, F., Riedl, M., Sacco, P. (2016). Sistemi informativi aziendali ed agricoltura di precisione. In: R. Casa (Hrsg.): *Agricoltura di Precisione*, Edizioni Agricole di Business Media srl, Milano, 2016, S. 9-42.

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D., & Prisma Group. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *PLoS medicine*, Vol. 6 (7), e1000097.

Muller, P., Ramada, P., Julius, J., Herr, D., Gagliardi, D., Marzocchi, C. et al. (2017). Annual Report on European SMEs 2016/2017: Focus on self-employment - Working Paper. European Union. 2017 Nov.

OECD (2018). Strengthening SMEs and entrepreneurship for productivity and inclusive growth. OECD Ministerial Conference on Small and Medium-sized Enterprises. 22-23. Februar, Mexico. Key Issue Paper.

- Pessl, E., Sorko & Mayer, B. (2017). Roadmap Industry 4.0 - Implementation Guideline for Enterprises. *International Journal of Science, Technology and Society*. Vol. 5 (6), S. 193-202.
- PwC - PricewaterhouseCoopers. (2016). *Industry 4.0 - Digital Operations Self-Assessment*.
- Rammer, C. & Frietsch, R. (2015). *Global Champions und Hidden Champions: Internationale Konzerne und KMU im Innovationswettbewerb*. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe.
- Riedl, M., Garcia, D., Rauch, E., Matt, D. T. (2016). *Industrie 4.0: Wissenstransfer von der Forschung in die Praxis*. In: C. M. Schlick (Hrsg.): *Megatrend Digitalisierung – Potenziale der Arbeits- und Betriebsorganisation*. Berlin: Gito mbh Verlag, S. 111-129.
- Rossi, M., Lombardi, M. (2017). *La Fabbrica Digitale - Guida all'industria 4.0. Tecniche Nuove*, Milano.
- Schmeiss, J., Dopfer, M. (2017). *Die digitale Geschäftsmodell-Transformation - Chancen, Risiken und Strategien für den deutschen Mittelstand*. *Mittelstand-Digital. Wissenschaft trifft Praxis*. *Digitale Geschäftsmodelle: Erfolgsfaktoren und Praxisbeispiele*. Bad Honnef: Begleitforschung Mittelstand-Digital WIK, S.7-13.
- Schuh, G., Anderl, R., Gausemeier, J., ten Hompel, M. & Wahlster, W. (2017). *Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation*. München: Herbert Utz Verlag.
- Schumacher, A., Erol, S. & Sihni, W. (2016). A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Procedia CIRP*, Vol. 52, S. 161-166.
- Sommer, L. (2015). *Industrial Revolution - Industry 4.0: Are German Manufacturing SMEs the First Victims of this Revolution?*. *Journal of Industrial Engineering and Management*, Vol. 8 (5), S. 12-32.
- Spath, D., Ganschar, O., Gerlach, S., Hämmerle, M., Krause, T. & Schlund, S. (2013). *Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0*. Fraunhofer IAO (Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation), Stuttgart.
- Spithoven, A., Vanhaverbeke W. & Roijakkers, N. (2013). *Open innovation practices in SMEs and large enterprises*. *Small Business Economics*. Vol. 41 (3), S. 537-562.
- Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). *Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review*. *British Journal of Management*, Vol., 14 (3), S. 207-222.
- VDMA (2015). *Leitfaden Industrie 4.0 - Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand*. *VDMA Forum für Industrie 4.0*, Frankfurt a. Main, ISBN 978-3-8163-0677-1.
- Zheng, M., & Ming, X. (2017). *Construction of cyber-physical system-integrated smart manufacturing workshops: A case study in automobile industry*. *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 9 (10), S. 1-17.

# Produktivitätsanalyse 4.0

Analyse der Arbeitsproduktivität zur Gestaltung von Produktionssystemen

Constantin Grabner, Robert Glöckner, Nils Barck, Hermann Löd-  
ding

Institut für Produktionsmanagement und -technik, Technische Univer-  
sität Hamburg

## 1. Einleitung

Industrie 4.0 ist gegenwärtig das Schlagwort für die fortschreitende digitale Transformation im Produktionsumfeld. Die zunehmende Vernetzung, die wachsende Verfügbarkeit mobiler Endgeräte und neue Technologien, wie z. B. Augmented Reality, ermöglichen es, bestehende Prozesse grundlegend neu zu gestalten (Anderl 2015). Bislang bleibt dieses Potential für Produktivitätsanalysen jedoch weitgehend ungenutzt.

Derzeit können meist nur Spezialisten Produktivitätsanalysen durchführen. Dadurch sind sie aufwändig und teuer und kommen nur selten zum Einsatz. In der Praxis sind Verbesserungsmaßnahmen daher nur selten das Ergebnis einer systematischen Analyse, was dazu führen kann, dass sich nicht der erwünschte Erfolg einstellt. Aufgrund der fehlenden Einbindung der Betroffenen und der hohen Komplexität erfahren die Ergebnisse zudem häufig nur geringe Akzeptanz bei den Mitarbeitern. Darüber hinaus fehlen in gängigen Produktivitätsanalysen eindeutige Bezüge zwischen den Ergebnissen und den Gestaltungsfeldern von Produktionssystemen. Sie eignen sich daher nur beschränkt, um zielgerichtet Verbesserungsmaßnahmen herzuleiten und zu beurteilen.

Um diesen Problemen zu begegnen, stellt der Beitrag eine Produktivitätsanalyse vor, die sich an den Gestaltungsfeldern von Produktionssystemen orientiert. Der Beitrag gliedert sich wie folgt: Der Stand der Technik stellt bewährte Methoden zur Produktivitätsanalyse und ein allgemeines Modell der Arbeitsproduktivität vor. Die Vorstellung des Vorgehens für die Produktivitätsanalyse ist Gegenstand von Abschnitt 3. Anschließend werden der Aufbau und die Funktionsweise einer Web-Applikation für Analysen im Produktionsumfeld erläutert (Abschnitt 4).

Zur Evaluierung des Konzepts dient eine praktische Anwendung in einem Industrieunternehmen (Abschnitt 5). Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

## 2. Stand der Technik

### 2.1. Arbeitsproduktivität und ihre Verbesserung

Die Produktivität eines Arbeitssystems beschreibt das Verhältnis von Output zu Input. Entsprechend bezieht die Arbeitsproduktivität die Gutteile-Ausbringung (Output) auf die bezahlte Arbeitszeit (Input), vgl. z. B. (Bokranz/Landau 2006, Sumanth 1984).

$$\text{Arbeitsproduktivität} = \frac{\text{Gutteile}}{\text{bezahlte Arbeitszeit}} \quad (1)$$

Produzierende Unternehmen konkurrieren in den drei Zieldimensionen Zeit, Kosten und Qualität. Die Arbeitsproduktivität ist die zentrale Stellgröße des Produktionsmanagements, um den Personalkostenanteil der Stückkosten zu beeinflussen. Insbesondere Unternehmen mit einem hohen Anteil manueller Tätigkeiten haben daher ein großes Interesse daran, die Arbeitsproduktivität zu steigern.

Damit die Verbesserung der Arbeitsproduktivität nicht zulasten der Mitarbeiter geschieht, ist es für Unternehmen unerlässlich, kontinuierlich an der Verbesserung der Produktionsabläufe zu arbeiten. Dazu existiert eine Vielzahl von Gestaltungsfeldern (vgl. Abschnitt 2.3). Für Verbesserungsmaßnahmen steht jedoch nur eine begrenzte Menge an Ressourcen zur Verfügung. Um diese möglichst zielgerichtet einzusetzen, ist es für Unternehmen vorteilhaft, ein systematisches Produktivitätsmanagement aufzubauen.

Das Produktivitätsmanagement umfasst alle organisatorischen Maßnahmen, um die Produktivität zu steigern. Es setzt sich aus folgenden Kernfunktionen zusammen: Produktivitätsplanung, managementbasierte Steuerung, Produktivitätskontrolle, Produktivitätscontrolling und Umsetzungen zur Produktivitätsverbesserung (Dorner 2014). Jede dieser Funktionen benötigt Informationen, um ein zielgerichtetes Vorgehen sicherzustellen.

Ein wesentlicher Teil dieser Informationen entsteht mit Hilfe von Produktivitätsanalysen. Für die Produktivitätsplanung ist eine regelmäßige Analyse erforderlich, um realistische Zielvorgaben bestimmen zu können, relevante Handlungsfelder zu erkennen und zielgerichtet Verbesserungsmaßnahmen herzuleiten. In der Steuerung ist die kontinuierliche

Analyse der Produktivität die Voraussetzung, um korrigierende Entscheidungen zu treffen. Ein Soll/Ist-Vergleich zur Bewertung des Erfolgs von Verbesserungsmaßnahmen und der Aufbau eines unterstützenden Reporting-Systems sind ohne eine strukturierte Analyse der Produktivität nicht möglich.

## 2.2. Produktivitätsanalysen

Die gängigsten Produktivitätsanalysen in der Industrie sind Zeitstudien nach der REFA-Systematik und das Methods-Time Measurement (MTM).

Ziel der REFA-Zeitaufnahme ist es, mit Hilfe der Messung und Auswertung von Ist-Zeiten Planzeiten zu bestimmen. Ein in der REFA-Methodik geschulter Mitarbeiter beobachtet dafür den Arbeitsablauf, führt dabei fortwährend Zeitmessungen durch und bewertet das Leistungsangebot (REFA 1997). Dieses Vorgehen befähigt Unternehmen, Planzeiten zu bestimmen und Abweichungen davon festzustellen. Doch weder die Planzeiten noch mögliche Abweichungen davon bieten konkrete Hinweise auf relevante Handlungsfelder zur produktiveren Gestaltung des Produktionssystems. Die Fokussierung auf die Dauer der Aktivitäten einzelner Mitarbeiter führt außerdem häufig dazu, dass die Betroffenen ablehnend auf die Analyse und ihre Ergebnisse reagieren.

MTM ist ein System vorbestimmter Zeiten. Grundlage des Verfahrens sind MTM-Bausteine mit Standard-Zeitwerten, mit denen sich nahezu beliebige Arbeitsabläufe beschreiben und Sollzeiten ermitteln lassen (Bokranz/Landau 2006). Ein Soll/Ist-Vergleich der Prozesszeiten erlaubt eine Produktivitätskontrolle. Zusätzlich lassen sich auf Basis der MTM-Bausteine Potentiale für Verbesserungsmaßnahmen identifizieren und bewerten. Die Beschreibung der Arbeitsabläufe mit MTM-Bausteinen gestaltet sich jedoch zeitaufwändig und erfordert zunächst eine gründliche Ausbildung der Mitarbeiter. Darüber hinaus bieten die Ergebnisse zwar Hinweise auf Optimierungspotential in den Arbeitsabläufen, vernachlässigen aber Teile der bezahlten Arbeitszeit, wie z. B. Störungs- oder Krankheitszeiten, und damit auch Gestaltungsfelder für die Verbesserung von Produktionssystemen.

Mit den Produktivitätsanalysen für die Serienfertigung (Czumanski) und für die Unikatfertigung (Tietze) sind am Institut für Produktionsmanagement und -technik (IPMT) zwei Analysen entstanden, die darauf abzielen, die Einflussfaktoren auf die Arbeitsproduktivität zu erkennen und den erforderlichen Erhebungsaufwand dafür zu reduzieren (Czumanski et al. 2013, Tietze/Lödding 2014). Beide Verfahren nutzen die Anteile von leicht erkennbaren Mitarbeiterzuständen an der bezahlten

Arbeitszeit (z. B. Czumanski: „10 % Teilehandling“, Tietze: „7 % Werkzeug holen“) als Hinweis auf relevante Handlungsfelder für die Verbesserung der Produktivität (z. B. Materialbereitstellungsprozesse).

Um den Erfassungsaufwand zu reduzieren, unterteilt Czumanski in zyklusgebundene, losgebundene und periodische Zustände. Die Multiplikation von reduzierten Zeitaufnahmen mit den Stückzahlen bzw. der Anzahl der Lose ermöglicht es, die Zustandsdauern relativ aufwandsarm zu bestimmen.

Damit es auch in der Unikatfertigung möglich ist, repetitive Produktivitätsgewinne zu erzielen, nutzt Tietze einen generischen Arbeitszyklus und eine Unterteilung in Tätigkeit („holen“) und Objekt („Werkzeug“) zur Gliederung der Mitarbeiterzustände. Der generische Arbeitszyklus besteht dabei aus den Schritten Informationsbeschaffung und -verarbeitung, Material- und Hilfsmittelbeschaffung, Bauteil- und Bauplatzvorbereitung, Durchführung und Nachbereitung. Für die Datenerhebung verwendet Tietze Multimomentaufnahmen.

Zeitanteile von Mitarbeiterzuständen bieten ein leicht erfassbares und nachvollziehbares Kriterium, um Schwerpunkte für die Optimierung der Produktivität zu erkennen, Verbesserungsmaßnahmen herzuleiten und ihren Erfolg zu beurteilen. Bisher leiten sich Mitarbeiterzustände jedoch nicht von den Gestaltungsfeldern von Produktionssystemen ab, sondern orientieren sich an den Aktivitäten der Mitarbeiter und den Rahmenbedingungen der Serien- bzw. Unikatfertigung.

Beide Analysen bieten den Vorteil, dass sie leicht zu erlernen sind und einen deutlich geringeren Erhebungsaufwand verursachen als MTM oder die REFA-Systematik. Das macht sie insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen attraktiv. Für eine kontinuierliche Anwendung wäre der Aufwand jedoch weiterhin zu hoch. Benter entwickelt zwar die Grundlage für eine automatisierte Durchführung einer MTM-Analyse mit 3D-Kameras (Benter et al. 2015), die prototypische Umsetzung wurde jedoch nicht zu einer industriellen Lösung weiterentwickelt und kommerzialisiert. Insgesamt bleiben damit die Potenziale moderner Technologien für die Analyse der Arbeitsproduktivität weitgehend ungenutzt.

Angesichts der Vorteile zustandsbasierter Produktivitätsanalysen stellt sich die Frage, wie es möglich ist, Mitarbeiterzustände mit den Gestaltungsfeldern von Produktionssystemen zu verknüpfen. Darüber hinaus ist bislang nicht untersucht, wie sich der Erfassungsaufwand weiter reduzieren lässt und welchen Beitrag Industrie-4.0-Technologien zur Verbesserung der Analysen leisten können.

### 2.3. Modell der Arbeitsproduktivität

Wirk- und Erklärungsmodelle sind ein geeignetes Werkzeug, um die Einflussgrößen und ihre Wirkung auf definierte Zielgrößen zu beschreiben (Wöhe/Döring 2013). Am IPMT ist ein Modell entstanden, das es erlaubt, die Einflüsse auf die Arbeitsproduktivität vollständig abzubilden und die Zusammenhänge zwischen den produktivitätsrelevanten Handlungsfeldern bei der Gestaltung von Produktionssystemen und der Zielgröße zu quantifizieren (vgl. Abbildung 1) (Glöckner et al. 2017).

Zur Beschreibung der Zusammenhänge werden Regel- und Stellgrößen definiert. Sie dienen als Hilfsmittel, um über mehrere Stufen hinweg nachvollziehbare Bezüge zwischen den Handlungsfeldern des Produktivitätsmanagements und der Zielgröße Arbeitsproduktivität herzustellen. Regelgrößen setzen sich gemäß dieser Logik aus mehreren Stellgrößen zusammen und können nur indirekt beeinflusst werden. Stellgrößen hingegen können direkt beeinflusst werden. Dazu sind jeder Stellgröße Aufgaben zugeordnet. Sie bilden die produktivitätsrelevanten Gestaltungsfelder von Produktionssystemen.

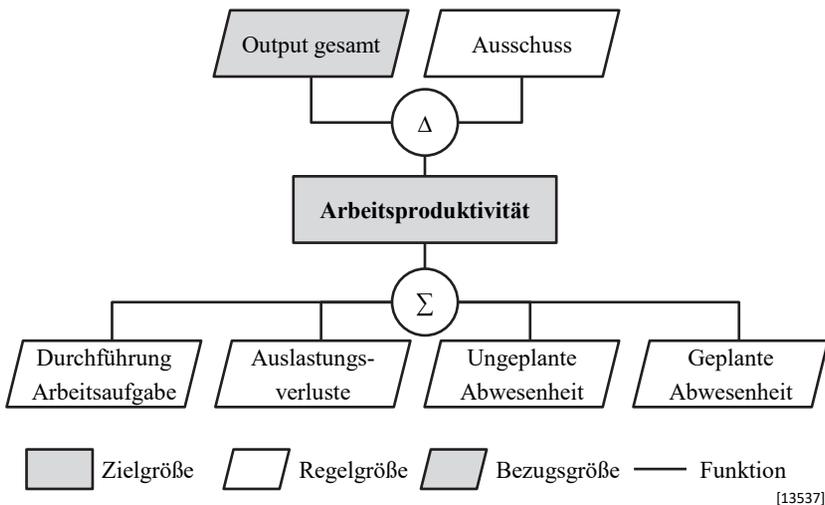


Abbildung 1: Modell der Arbeitsproduktivität.

Für das Modell der Arbeitsproduktivität werden fünf Regelgrößen definiert, die aus der Zerlegung der Quotientengleichung der Arbeitsproduktivität resultieren (vgl. Abbildung 1). Gleichung 2 beschreibt die quantitativen Zusammenhänge der Regelgrößen.

$$\text{Produktivität} = \frac{\text{Gutteile}}{\text{bezahlte Arbeitszeit}} = \frac{\text{Output gesamt-Ausschuss}}{\text{ZD+ZA+ZPA+ZUA}} \quad (2)$$

Der Output (Gutteile) wird gemäß der Gleichung in die Bestandteile Output gesamt und Ausschuss aufgeteilt. Die bezahlte Arbeitszeit als Input setzt sich aus den Regelgrößen Durchführung der Arbeitsaufgabe (ZD), Auslastungsverluste (ZA), geplante (ZPA) und ungeplante Abwesenheit (ZUA) zusammen. Die Regelgrößen werden um Stellgrößen und Aufgaben ergänzt (vgl. Tabelle 1).

<b>Regelgröße</b>	<b>Stellgröße</b>	<b>Aufgabe</b>
Durchführung der Arbeitsaufgabe	Informationshandhabung	Gestaltung der Informationsbereitstellung
	Materialhandhabung	Gestaltung der Materialbereitstellung
	Vor- und Nachbereitung	Gestaltung des Arbeitsplatzes
	Aufgabenbearbeitung	Gestaltung des Arbeitsvorgangs
Auslastungsverluste	Störzeiten	Produktionsplanung und -steuerung, Arbeitsvorbereitung und Konstruktion, Materiallogistik, Instandhaltung
	Zusätzliche Tätigkeiten	Personalplanung
	Nacharbeit	Qualitätsmanagement
Ungeplante Abwesenheit	Krankheitsbedingtes Fehlen	Ergonomische Arbeitsgestaltung, betriebliches Gesundheitsmanagement, Personalführung
	Sonstiges Fehlen	Zusätzliche Mitarbeiterunterstützung
Geplante Abwesenheit	Urlaub & Pausen	Arbeitszeitregelung
	Weiterbildung	Personalplanung
Ausschuss	Prozessfähigkeit	Qualitätsmanagement

Tabelle 1: Modell der Arbeitsproduktivität in Anlehnung an (Glöckner et al. 2017).

Das Modell bildet alle Einflussgrößen auf die Arbeitsproduktivität ab. Durch die Beziehung zwischen Ziel-, Regel-, Stellgröße und Aufgabe kann die Wirkung der verschiedenen Einflüsse auf die Produktivität quantitativ dargestellt werden. Dadurch ist es beispielsweise möglich zu

beurteilen, welche Auswirkungen eine Veränderung des Materialbereitstellungskonzepts auf die Produktivität hat. Es bildet damit eine geeignete Grundlage für eine Produktivitätsanalyse, die sich an den Gestaltungsfeldern von Produktionssystemen orientiert.

Der folgende Abschnitt erläutert, wie es möglich ist, die Vorteile zustandsbasierter Produktivitätsanalysen mit dem Modell der Arbeitsproduktivität zu verknüpfen und so eine Datengrundlage für ein Produktivitätsmanagement zu schaffen, das auf die produktive Gestaltung von Arbeitssystemen abzielt. Abschnitt 4 beschreibt darüber hinaus eine am IPMT entwickelte Web-App, die demonstriert, wie sich Industrie-4.0-Potentiale bei Produktivitätsanalysen realisieren lassen.

### 3. Aufbau der Produktivitätsanalyse

#### 3.1. Definition der Mitarbeiterzustände

Für die Entwicklung der Produktivitätsanalyse stellt sich zunächst die Frage, welche Mitarbeiterzustände Bezüge zu den Gestaltungsfeldern aufweisen und wie es damit möglich ist, die gesamte bezahlte Arbeitszeit abzubilden. Die Stellgrößen des Modells der Arbeitsproduktivität sind die höchste Detailebene des Modells und bieten eine direkte Zuordnung zu den Gestaltungsfeldern. Sie bilden daher die Grundlage, um geeignete Mitarbeiterzustände herzuleiten (vgl. Tabelle 2).

Die Stellgrößen für die Durchführung der Arbeitsaufgabe sind daran erkennbar, dass der Mitarbeiter der Handhabung von Informationen oder Material nachgeht, seinen Arbeitsplatz vor- bzw. nachbereitet oder die Arbeitsaufgabe selbst bearbeitet (z. B. Montieren). Die Gestaltung der Informationsbereitstellung, der Materialbereitstellung, des Arbeitsplatzes und der Arbeitsaufgabe ermöglichen es, die erforderlichen Zeitanteile dieser Mitarbeiterzustände zu reduzieren und so die Produktivität zu steigern.

Auslastungsverluste kommen als Störzeiten, zusätzliche Tätigkeiten oder Nacharbeit vor. Störzeiten entstehen, wenn Mitarbeiter auf Grund von fehlenden Aufträgen, Informationen, Materialien oder Maschinen bzw. Hilfsmitteln gezwungen sind zu warten oder eine aufgetretene Störung eigenständig zu beheben. Dieser Stellgröße sind die Gestaltungsfelder Produktionsplanung und -steuerung, Arbeitsvorbereitung und Konstruktion, Materiallogistik und Instandhaltung zugeordnet. Zusätzliche Tätigkeiten sind daran erkennbar, dass Mitarbeiter ungeplanten Tätigkeiten nachgehen oder an Besprechungen teilnehmen. Um die Zeitanteile dieser Zustände zu beeinflussen, ist eine Überarbeitung der Personalplanung erforderlich. Leistet ein Mitarbeiter Nacharbeit, ist das

Qualitätsmanagement gefordert, um die Dauer dieses Mitarbeiterzustands zu beeinflussen. Gleiches gilt für den Ausschuss.

<b>Stellgröße</b>	<b>Mitarbeiterzustand</b>
Informationshandhabung	handhabt Informationen
Materialhandhabung	handhabt Material
Vor- und Nachbereitung	bereitet Arbeitsplatz vor oder nach
Aufgabenbearbeitung	bearbeitet Aufgabe
Störzeiten	wartet oder behebt Störung mit folgenden Ursachen: <ul style="list-style-type: none"> <li>- fehlender Auftrag,</li> <li>- fehlende Information,</li> <li>- fehlende Materialien,</li> <li>- fehlende Maschinen und Hilfsmittel.</li> </ul>
Zusätzliche Tätigkeiten	arbeitet an ungeplanten, zusätzlichen Tätigkeiten, nimmt an Besprechung teil
Nacharbeit	arbeitet an Nacharbeit
Krankheitsbedingtes Fehlen	fehlt auf Grund von Krankheit
Sonstiges Fehlen	fehlt aus sonstigen Gründen
Urlaub & Pausen	ist im Urlaub, pausiert
Weiterbildung	nimmt an Weiterbildung teil

Tabelle 2: Herleitung der Mitarbeiterzustände.

Mitarbeiterzustände, die sich von den Stellgrößen der geplanten und ungeplanten Abwesenheit ableiten, sind das Fehlen auf Grund von Krankheit (krankheitsbedingtes Fehlen) oder sonstigen Gründen (sonstiges Fehlen), Urlaub bzw. Pausieren (Urlaub & Pausen) und die Teilnahme an Weiterbildungen (Weiterbildung). Mit Ausnahme der Pausen befindet sich der Mitarbeiter dabei nicht an seiner Tätigkeitsstätte.

### 3.2. Vorgehen zur Datenerfassung

Im nächsten Schritt gilt es, ein Vorgehen zur Erfassung der Mitarbeiterzustände und ihrer Anteile an der bezahlten Arbeitszeit zu bestimmen. Um die gesamte bezahlte Arbeitszeit abzubilden, werden für die Erhebung der Daten zwei Verfahren miteinander kombiniert.

Das erste Verfahren besteht darin zu erfassen, wie viele Mitarbeiter dem betrachteten Produktionssystem zugeordnet sind und wie viele Mitarbeiter aus welchen Gründen von der Tätigkeitsstätte fernbleiben (im Urlaub, krank, auf Weiterbildung oder fehlend aus sonstigen Gründen). Diese Daten erlauben es, Informationen über den Anteil der Zustände zu erfassen, die der Mitarbeiter nicht an seiner Tätigkeitsstätte verbringt.

Das zweite Verfahren beruht auf Multimomentaufnahmen durch einen Fremdbeobachter. Die erfassten Daten liefern mit einer großen Zahl von Stichproben Informationen über die relative Häufigkeit und damit die Zeitanteile der Mitarbeiterzustände, die während der Anwesenheit auftreten. Wie bei Multimomentaufnahmen üblich, geht der Erfasser stets entlang einer zuvor definierten Route durch den Produktionsbereich. Zunächst notiert er die Station, an der er sich befindet. Danach folgt ein mehrstufiges Vorgehen, das zwischen drei und fünf Beurteilungen für einen Mitarbeiterzustand erfordert (vgl. Abbildung 2).

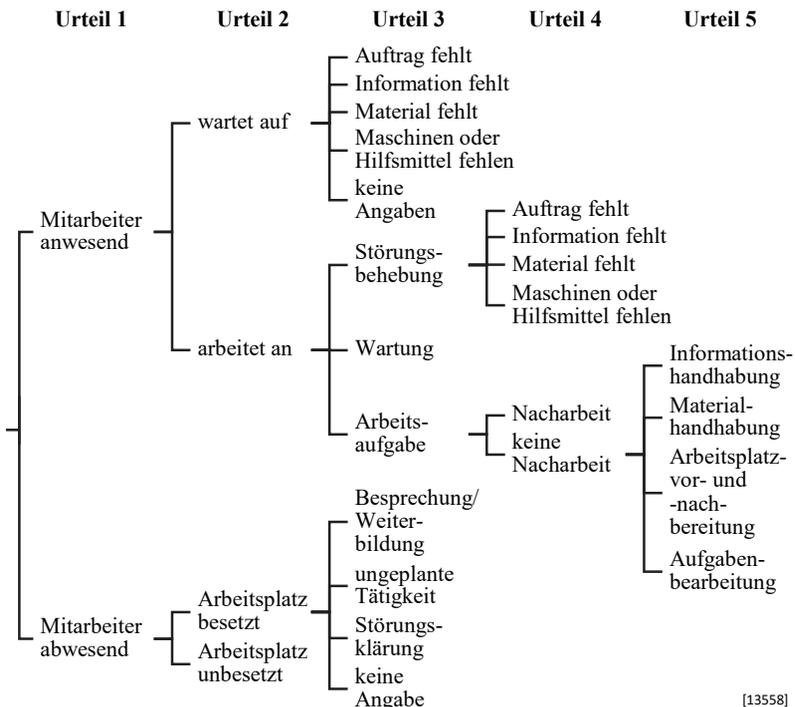


Abbildung 2: Entscheidungsbaum für die Multimomentaufnahmen.

Arbeitet der beobachtete Mitarbeiter an der eigentlichen Arbeitsaufgabe, folgen noch zwei weitere Entscheidungen: Zunächst ist es erforderlich zu beurteilen, ob es sich bei dem beobachteten Mitarbeiterzustand um Nacharbeit handelt. Auch bei diesem Zustand ist es ohne ausreichende Prozesskenntnisse für den Beobachter erforderlich, den Mitarbeiter zu fragen. Erfolgt keine Nacharbeit im Prozess, ist es für die Analyse hilfreich, Ersatzaufträge für produzierten Ausschuss kenntlich zu machen (z. B. mit farbigen Markierungen der Fertigungspapiere). Handelt es sich nicht um Nacharbeit, ist die letzte Unterscheidung, ob der Mitarbeiter Informationen oder Material handhabt, seinen Arbeitsplatz vor- bzw. nachbereitet oder die Arbeitsaufgabe selbst bearbeitet.

Hat der Beobachter im ersten Schritt keinen Mitarbeiter am Arbeitsplatz angetroffen, stellt sich die Frage, ob der Arbeitsplatz unbesetzt ist oder der Mitarbeiter seinen Arbeitsplatz lediglich kurzzeitig verlassen hat. In der Serienfertigung gibt es meist eine starre Zuordnung von Mitarbeitern zu Arbeitsplätzen. In der variantenreichen Kleinserienfertigung oder gar der Unikatfertigung fehlt diese Zuordnung häufig. Es gibt zwei Strategien, um dieser Herausforderung zu begegnen:

1. Die betroffenen Mitarbeiter selbst geben, z. B. über beschriftete Magnettafeln oder Würfel, Informationen über den Arbeitsplatzstatus und ihren Mitarbeiterzustand.
2. Der Beobachter geht die gesamte Route der Multimomentaufnahme ab und vergleicht am Ende die Zahl der Datensätze mit der Anzahl der planmäßig anwesenden Mitarbeiter. Für die Differenz erfasst der Beobachter Datensätze mit der Angabe „keine Angabe“. Damit wird akzeptiert, dass ein Teil der Mitarbeiterzustände keine Hinweise über das Arbeitssystem liefert. Das Ausmaß dieser Unsicherheit ist jedoch quantifizierbar. Diese Angabe erlaubt es zudem, damit umzugehen, wenn Mitarbeiter nicht an der Analyse teilnehmen möchten. Dies erleichtert die Einführung, da es möglich ist, anfängliche Vorbehalte gegenüber der Analyse zu berücksichtigen. Darüber hinaus wird diese Auswahloption genutzt, um Mitarbeiterzustände zu erfassen, die keinen Bezug zu den Gestaltungsfeldern von Produktionssystemen haben (z. B. private Unterhaltungen).

Für die Analyse ist noch zu klären, wer in welchen zeitlichen Abständen für die Datenerfassung verantwortlich ist. Der Teamleiter oder Meister des betrachteten Arbeitsbereichs sollte die Anwesenheitsdaten erfassen. An den Multimomentaufnahmen können auf Grund der Einfachheit des Vorgehens nach einer kurzen Schulung alle Mitarbeiter teilnehmen. Da keine personengebundene Bewertung stattfindet, sondern Mitarbeiter-

zustände nur als Informationsträger für die Relevanz der Gestaltungsfelder des Produktionssystems genutzt werden, ist es möglich und sinnvoll, die betroffenen Mitarbeiter selbst in die Aufnahmen einzubinden.

Damit die Analyse die Grundlage für ein zielgerichtetes Produktivitätsmanagement bilden kann, ist es notwendig, kontinuierlich Daten zu erfassen. Die Anwesenheitsdaten werden täglich eingegeben. Um den Aufwand der Multimomentaufnahmen zu reduzieren, führen die zuvor bestimmten Mitarbeiter nur ein bis zwei Rundgänge pro Tag durch. Dies geschieht, wenn sie ohnehin vor Ort sind, um zusätzliche Zeiten für Hin- und Rückweg zu vermeiden. Damit dabei eine gleichbleibende Verteilung der Aufnahmen über den Tag sichergestellt ist, müssen die Erfasser regelmäßig prüfen, zu welchen Zeitpunkten die bisherigen Aufnahmen stattgefunden haben. Für dieses Vorgehen spielt die entwickelte Web-App (vgl. Abschnitt 4) eine tragende Rolle. Sie erleichtert die kollaborative Datenerfassung und -verarbeitung und erlaubt jederzeit Zwischenbewertungen. Die so entstehenden Produktivitätsdaten sind repräsentativ für längere Zeiträume (z. B. Monate). Dies bietet den zusätzlichen Vorteil, dass kurzfristige Effekte, wie beispielsweise Veränderungen im Produktspektrum, die Ergebnisse nicht verfälschen.

### 3.3. Verarbeitung der erfassten Daten

Nach der Erhebung ist es erforderlich, die Daten zu verarbeiten, um daraus die Anteile der Mitarbeiterzustände an der bezahlten Arbeitszeit zu bestimmen. Im ersten Schritt gilt es, mit den absoluten Abwesenheitsdaten die Zeitanteile der Mitarbeiterzustände zu berechnen, die die Mitarbeiter nicht an ihrer Tätigkeitsstätte verbringen ( $Z_{abw,i}$ ). Dazu wird die Anzahl der Abwesenheitstage für die unterschiedlichen Abwesenheitsgründe (i) durch die Anzahl bezahlter Arbeitstage im Arbeitssystem geteilt.

$$Z_{abw,i} = \frac{\text{Arbeitstage abwesend aus Grund } i}{\text{Anzahl bezahlter Arbeitstage}} \quad (3)$$

Die Gesamtabwesenheitsquote ( $Z_{abw,Gesamt}$ ) ergibt sich als Summe der Abwesenheitsanteile je Grund. Die Gesamtanwesenheitsquote ( $Z_{anw,Gesamt}$ ) ist die Gegenwahrscheinlichkeit der Gesamtabwesenheitsquote.

Für die Berechnung der Zustandsanteile, die die Mitarbeiter an ihrer Tätigkeitsstätte verbringen ( $Z_{anw,i}$ ), ist es zunächst notwendig, die relative Häufigkeit der Beobachtungen eines Zustands (i) an der Gesamtzahl aller Multimomentaufnahmen zu bestimmen. Anschließend muss die relative Häufigkeit mit der Gesamtanwesenheitsquote multipliziert werden.

$$ZA_{\text{anw},i} = \frac{\text{Beobachtungen von Zustand } i}{\text{Beobachtungen gesamt}} \times ZA_{\text{anw,Gesamt}} \quad (4)$$

Das betrachtete Produktionssystem kann dabei nur wenige Arbeitsplätze beinhalten und so die zielgerichtete Verbesserung in einzelnen Arbeitsbereichen oder Kleinunternehmen unterstützen. Die gewählte Datenstruktur ist aber auch geeignet, um hierarchisch gegliederte Arbeitssysteme von Großkonzernen abzubilden. Dazu ist es erforderlich, die Daten vertikal zu aggregieren. Für die Berechnung des Zustandsanteils (i) eines übergeordneten Arbeitssystems (q) werden dafür zunächst die Zustandsanteile (i) der Teilsysteme (p) auf untergeordneter Ebene (e-1) mit dem Anteil der Mitarbeiter im Teilsystem (p) an der Gesamtzahl der Mitarbeiter gewichtet und anschließend über alle Teilsysteme (r) aufsummiert.

$$ZA_{i,q,e} = \sum_{p=1}^r ZA_{i,p,e-1} \times \frac{\text{Mitarbeiter in Teilsystem } p}{\text{Mitarbeiter in Gesamtsystem } q} \quad (5)$$

Mit Hilfe der vorgestellten Verfahren ist es über mehrere Ebenen möglich, Informationen über die Zusammensetzung der bezahlten Arbeitszeit in Form von Mitarbeiterzuständen zu bestimmen und diesen Stellgrößen, Regelgrößen und Gestaltungsfeldern zuzuordnen. Wie aber können diese Daten nun ein zielgerichtetes Produktivitätsmanagement unterstützen?

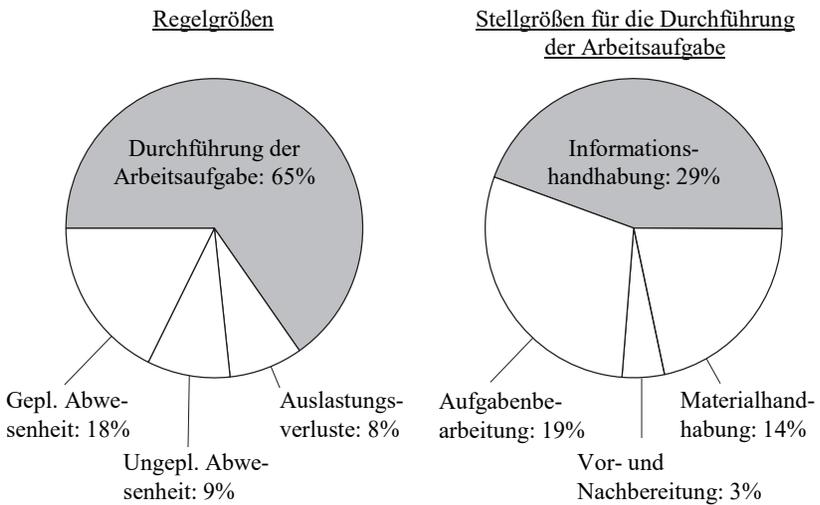
### 3.4. Verwendung der Produktivitätsdaten

Der zentrale Mehrwert der Analyse ist es, die Relevanz der Gestaltungsfelder von Produktionssystemen für die Verbesserung der Arbeitsproduktivität zu erkennen. Damit ist es möglich, Schwerpunkte für die Verwendung von Verbesserungsressourcen zu bestimmen (vgl. Abbildung 3a). So könnte eine Analyse in der Unikatfertigung beispielsweise offenbaren, dass die Mitarbeiter im Ausgangszustand den größten Teil der bezahlten Arbeitszeit mit der Durchführung der Arbeitsaufgabe (Regelgröße) und dabei mit der Informationshandhabung (Stellgröße) verbringen (z. B. 29,4 %). Die Gestaltung der Informationsbereitstellung (Gestaltungsfeld bzw. Aufgabe) sollte daher Schwerpunkt der Verbesserungsanstrengungen sein.

Im nächsten Schritt dienen die Daten dazu, zielgerichtet Verbesserungsmaßnahmen herzuleiten. Dafür liefern die erfassten Mitarbeiterzustände und Orte erste Hinweise (z. B. Ursachen für Warte- oder Stördauern). Anschließend bietet die Gliederung der Analyse in die Gestaltungsfelder eine weitere Hilfestellung. Jedem Gestaltungsfeld lassen

sich produktivitätsrelevante Gestaltungsparameter zuordnen (z.B. für die Informationsbereitstellung: Informationsumfang und -komplexität). Für die Mitarbeiter gilt es zu prüfen, wie das Gestaltungsfeld ausgeprägt ist. Dies könnte im oben genannten Fall beispielweise eine Informationsbereitstellung in Form von Papierzeichnungen sein. Im Anschluss müssen Alternativen erarbeitet werden, die es erlauben, die Gestaltungsparameter positiv zu beeinflussen (z. B. eine digitale Arbeitsunterlage zur Reduzierung von Informationsumfang und -komplexität).

**a) Schwerpunkte identifizieren**



**b) Erfolg kontrollieren**

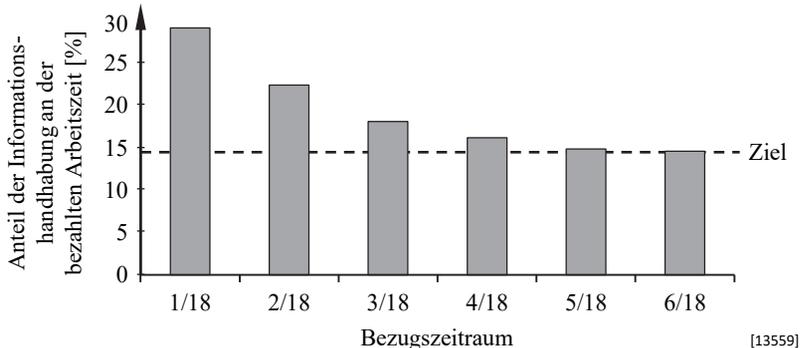


Abbildung 3: Verwendung der Produktivitätsdaten.

[13559]

Die Daten der Produktivitätsanalyse bieten nun eine Grundlage, um den Erfolg der Gestaltungsalternativen abzuschätzen. Soll die digitale Arbeitsunterlage die informatorischen Tätigkeiten um die Hälfte reduzieren, besteht der erwartete Erfolg darin, die erforderliche Arbeitszeit im Produktionssystem um 14,7 Prozent ( $= 50 \% \times 29,4 \%$ ) zu senken. Ist gleichzeitig der einmalige und laufende Aufwand bekannt, existiert eine sinnvolle Entscheidungsgrundlage für die Auswahl einer Alternative.

Bereits während der Umsetzung kann die Entwicklung der Produktivitätsdaten aufzeigen, ob die Verbesserungsmaßnahme den gewünschten Erfolg zeigt (vgl. Abbildung 3b). So wäre denkbar, dass die Einführung der digitalen Arbeitsunterlage in einem Pilotbereich zunächst störungsbehaftet ist und Wartezeiten bei den Mitarbeitern verursacht. Die Produktivitätsdaten befähigen Management und Projektteam dann dazu, schnell zu reagieren und Gegenmaßnahmen einzuleiten. Nach der Umsetzung liefert die Produktivitätsanalyse Hinweise auf den Erfolg der Maßnahme. Diese Informationen lassen sich sowohl zur Erfolgskontrolle als auch zur Verbesserung zukünftiger Entscheidungsprozesse (Lernen) verwenden. Im Fallbeispiel wäre es möglich, zu kontrollieren, ob sich die informatorischen Tätigkeiten tatsächlich um die Hälfte reduziert haben. Darüber hinaus hätte das Projektteam für zukünftige Implementierungsprojekte gelernt, dass zunächst mit Störungen zu rechnen ist und das kurzfristige Produktivitätsziel daher niedriger anzusetzen ist.

## 4. Web-Applikation für Produktivitätsanalysen

### 4.1. Technischer Aufbau und Funktionalität

Bislang blieben Industrie-4.0-Potentiale bei Produktivitätsanalysen weitgehend ungenutzt. Um diese Potentiale zu erschließen, hat das IPMT eine mobile Anwendung zur methodenübergreifenden Analyse von Produktionsprozessen konzipiert (Grabner et al. 2017) und für die Produktivitätsanalyse weiterentwickelt. Die entstandene Software ist als Web-App konzipiert. Folgende Technologien sind dabei entscheidend:

Durch ein responsives Webdesign passen sich Inhalt und Darstellung der entwickelten App (vgl. Abbildung 4) plattformübergreifend an den Bildschirm des verwendeten Endgeräts an. Um die Web-App auch in Produktionsumgebungen ohne Internetzugang nutzen zu können, basiert die Anwendung auf einer Single-Page-Application-Architektur. Das Grundgerüst der App besteht lediglich aus einer einzelnen Webseite, die der Nutzer vollständig auf sein Endgerät lädt und im Cache des Browsers speichert. Darüber hinaus tragen moderne Browserstandards

und JavaScript-Frameworks dazu bei, dass sich die Webanwendung in der Bedienung kaum von einer nativen App unterscheiden lässt.

Die wichtigsten Funktionen der Web-App für die Produktivitätsanalyse sind die Datenerfassung, die Datenverarbeitung und die grafische Aufbereitung der Ergebnisse. Sind die Nutzer eingeloggt, zeigt die Anwendung ihnen die Erhebungsverfahren an, denen sie zugeordnet sind (z. B. Teamleiter: Anwesenheitsstatus, Teammitglied: Multimomentaufnahme). Für die Erfassung der zugeordneten und abwesenden Mitarbeiter ist es möglich, tagesaktuelle Zahlen einzugeben. Bei der Multimomentaufnahme treffen die Nutzer eine Auswahl, die dazu dient, den beobachteten Mitarbeiterzustand zu beschreiben. Die App führt den Mitarbeiter dabei Schritt für Schritt durch die in Abschnitt 3.2 beschriebene Entscheidungslogik (vgl. Abbildung 2). Besteht eine Internetverbindung, ist es möglich, die lokal gespeicherten Daten mit dem Server zu synchronisieren.



[13561]

Abbildung 4: Responsives Design der entwickelten Web-App.

Sobald Daten auf dem Server vorhanden sind, können die Ergebnisse der Produktivitätsanalyse von allen dafür freigeschalteten Mitarbeitern

angezeigt werden. Die zentralen Ergebnisse sind die Anteile der Mitarbeiterzustände, Stell- und Regelgrößen und Gestaltungsfelder an der bezahlten Arbeitszeit. Dabei werden sowohl die Durchschnittswerte als auch zeitliche Verläufe visualisiert. Darüber hinaus ist für alle Nutzer ersichtlich, zu welchen Zeitpunkten Multimomentaufnahmen durchgeführt wurden und welche statistische Genauigkeit vorliegt. Mit diesen Ergebnissen können die Erfasser der Multimomentaufnahmen vermeiden, dass es zu zeitlichen Häufungen der Aufnahmen und in der Folge zu nicht repräsentativen Ergebnissen kommt.

#### 4.2. Realisierung von Industrie-4.0-Potentialen

Die entwickelte Produktivitätsanalyse bedient sich gleich mehrerer technologischer Entwicklungen, die als Treiber von Industrie-4.0-Potentialen gelten. Die Produktivitätsanalyse profitiert von der wachsenden Verfügbarkeit mobiler Endgeräte, ihrer vereinfachten Bedienung, der zunehmenden Vernetzung und der erleichterten Datenverarbeitung. Der Beitrag der Industrie-4.0-Potentiale für Produktivitätsanalysen zeigt sich an drei Punkten:

1. Zunächst einmal ermöglicht die Web-App mit der automatisierten Datenverarbeitung und -aufbereitung kollaborative Multimomentaufnahmen, die die Mitarbeiter mit ihrem Smartphone durchführen, wenn sie ohnehin vor Ort sind. Dies führt dazu, dass sich die Laufwege und damit der Erfassungsaufwand für die Multimomentaufnahmen drastisch reduzieren. Damit sind mit vertretbarem Aufwand dauerhafte Aufnahmen denkbar.
2. Die Grundlogik zustandsbasierter Produktivitätsanalysen und die geführte Datenerfassung der App reduzieren die Komplexität des Vorgehens. Mitarbeiter können ohne aufwändige Schulungen in die Analyse miteingebunden werden. Darüber hinaus schafft die schnelle Auswertung der Ergebnisse ein hohes Maß an Transparenz und Nachvollziehbarkeit. Dies leistet einen Beitrag zur Akzeptanz der Produktivitätsanalyse und schafft die Voraussetzung für ein Bottom-Up-Vorgehen.
3. Die plattformunabhängige Web-App erlaubt es zudem, vorhandene geschäftliche und private Endgeräte zu nutzen („Bring your own device“). Aufgrund der geringen Komplexität des Vorgehens sind auch keine aufwändigen Schulungsprogramme erforderlich. Dies vermeidet hohe Investitionskosten.

Bislang verzichtet die entwickelte Lösung bewusst auf die Einbindung vorhandener Informationssysteme oder Sensordaten, um insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen den Einstieg in ein datenbasiertes

Analyseverfahren zu erleichtern. Zukünftig ist es jedoch denkbar, weitere Industrie-4.0-Potentiale zu erschließen, indem die manuelle Datenerfassung der Produktivitätsanalyse mit Hilfe von Standardschnittstellen schrittweise automatisiert wird. Einen sinnvollen Ausgangspunkt dafür bieten sensorgestützte Daten aus Betriebsdatenerfassungssystemen (z. B. für Störungsbehebung) und Personalinformationssystemen (z. B. für Krankheit oder Urlaub).

## 5. Anwendungsbeispiel

Die praktische Erprobung der Analyse fand von 18. Januar bis zum 11. Juni 2018 bei einem Medizingerätehersteller statt. Der betrachtete Produktionsbereich umfasst 24 Arbeitsplätze, denen ein Team von bis zu 28 Mitarbeitern zugeordnet ist. In dem Produktionssystem findet die Montage und Endprüfung von etwa 2.300 Wärmesystemen für Säuglinge pro Jahr statt. Darüber hinaus existieren zwei Arbeitsplätze für Arbeitsvorbereitungstätigkeiten.

An der Datenerfassung waren ein Teamleiter und sein Stellvertreter, ein Qualitätsingenieur, ein Arbeitsvorbereiter und zwei Mitarbeiter des Produktionsteams beteiligt. Die Produktionsmitarbeiter nutzten für die Aufnahmen zwei Windows-Tablet-PCs. Die anderen Mitarbeiter verwendeten dazu ihre bereits vorhandenen Android-Firmenhandys. Der Teamleiter und sein Stellvertreter nahmen täglich die Anwesenheitsdaten auf. Der Qualitätsingenieur, der Arbeitsvorbereiter und die Teammitglieder führten 1.494 Multimomentaufnahmen durch. Um die Anforderungen an Datensicherheit, Datenschutz und betriebliche Mitbestimmungen zu berücksichtigen, wurde mit dem Betriebsrat eine Pilotbetriebsvereinbarung geschlossen, frühzeitig der Datenschutzbeauftragte involviert und die Web-App ausschließlich über das Intranet des Unternehmens zur Verfügung gestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Mitarbeiter den größten Teil der Arbeitszeit mit der Bearbeitung der eigentlichen Arbeitsaufgabe verbringen. Die Gestaltung der Arbeitsaufgabe selbst bietet daher den größten Stellhebel (32,5 %, vgl. Abbildung 5). Während der Aufnahme hatte der Produktionsbereich mit einer hohen Krankenquote zu kämpfen. Auch die Themen Ergonomie und betriebliches Gesundheitsmanagement rücken daher erneut in den Fokus (12,5 %). 10,3 Prozent der Mitarbeiterzustände können über die Informationsbereitstellung beeinflusst werden und 9,1 Prozent über die Materialbereitstellung. Die Gestaltungsfelder Produktionsplanung und -steuerung, Instandhaltung und Qualitätsmanagement bieten kaum Potential für Produktivitätssteigerungen, da es nur sehr selten zu Auslastungsverlusten oder Nacharbeit kommt. Für

10,0 Prozent der Arbeitszeit konnte die Analyse keine Informationen erzeugen.

Die zusätzliche Erfassung der Orte offenbart außerdem weitere Schwerpunkte. Die Gestaltung der Informationsbereitstellung ist bei der Prüfung (13,6 %) und der Arbeitsvorbereitung (56,7 %) von deutlich höherer Relevanz. Die Gestaltung der Materialbereitstellung sollte wiederum in der Montage (11,8 %) einen Schwerpunkt bilden. Ein Workshop, der die identifizierten Schwerpunkte für die zielgerichtete Entwicklung von Verbesserungsmaßnahmen berücksichtigt, ist bereits geplant.

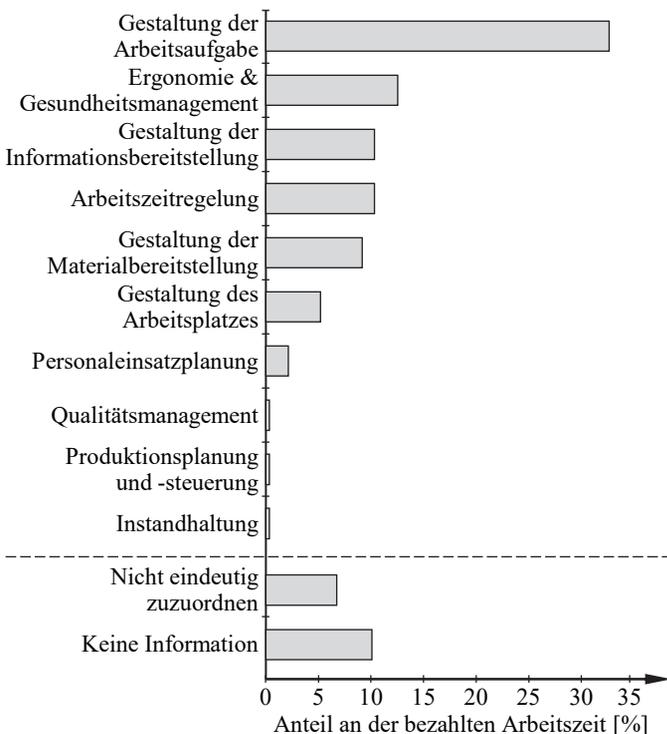


Abbildung 5: Relevanz der Gestaltungsfelder im Anwendungsbeispiel.

Die praktische Anwendung hat gezeigt, dass die Analyse für alle Beteiligten leicht zu erlernen ist. Für alle Mitarbeiter war lediglich eine einstündige Kurzschulung erforderlich. Es hat sich allerdings als sinnvoll erwiesen, die ersten Rundgänge zu begleiten und dabei die Beurteilung

der Mitarbeiterzustände gemeinsam zu diskutieren. Anfängliche Vorbehalte der betroffenen Mitarbeiter, wie z. B. die Sorge, dass Mitarbeiter individuell bewertet werden, konnten schnell ausgeräumt werden. Dafür war es entscheidend, die Orientierung der Analyse an den Gestaltungsfeldern des Produktionssystems zu verdeutlichen, Klarheit über die Verwendung der Daten zu schaffen und allen Mitarbeitern über die Web-App Zugang zu den Ergebnissen zu bieten.

Auch der Erfassungsaufwand war überschaubar. Im Anwendungsbeispiel dauerte ein Rundgang zwischen 3 und 12 Minuten. Durchschnittlich nahm eine Aufnahme etwa 30 Sekunden in Anspruch. Eine monatliche Multimomentaufnahme mit 1.500 Datensätzen erfordert folglich einen laufenden Erfassungsaufwand von etwa 12,5 Arbeitsstunden.

In der Anwendung zeigten sich aber auch Herausforderungen. Zeitweilig entstanden keine Daten, weil Teamleiter und Stellvertreter sich in Urlaubsphasen nicht abgesprochen hatten und weil der Qualitätsingenieur und der Arbeitsvorbereiter an einem anderen Standort tätig waren. Insbesondere die eindeutige Unterscheidung der Mitarbeiterzustände bei der Durchführung der Arbeitsaufgabe fiel den Erfassern zunächst schwer. Im Umgang mit den betroffenen Mitarbeitern fiel darüber hinaus auf, dass es Zeit und Erläuterungen benötigt, um sie davon zu überzeugen, dass es nicht das Ziel der Analyse ist, ihre persönliche Arbeitsweise zu beurteilen.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Produktivitätsanalysen sind bislang meist Spezialisten vorbehalten und eignen sich nur beschränkt, um zielgerichtet Verbesserungsmaßnahmen herzuleiten. Um diesen Defiziten zu begegnen, leitet dieser Beitrag eine zustandsbasierte Produktivitätsanalyse her, die sich an den Gestaltungsfeldern von Produktionssystemen orientiert und die betroffenen Mitarbeiter selbst in die Analyse miteinbezieht.

Bislang blieben Industrie-4.0-Technologien für Produktivitätsanalysen weitgehend ungenutzt. Dieser Beitrag beschreibt Aufbau und Funktionalität einer Web-App für Produktivitätsanalysen und zeigt daran auf, wie es möglich ist, Industrie-4.0-Potentiale für Produktivitätsanalysen sowohl in KMU als auch in Großkonzernen zu realisieren.

Die praktische Anwendung der Analyse hat gezeigt, dass sie mit vertretbarem Aufwand eine hierarchieübergreifende Datengrundlage für ein zielgerichtetes Produktivitätsmanagement schaffen kann. Derzeit arbei-

tet das IPMT daran, die Produktivitätsanalyse in ein datenbasiertes Produktivitätsmanagement zu integrieren. In diesem Zuge ist es geplant, die entwickelte Web-App um ein Verbesserungsmodul zu erweitern.

## 7. Danksagung

Dieser Beitrag basiert auf den Arbeiten im Rahmen des Projekts „Integrale Handlungsorientierte Produktivitätsanalyse für die variantenreiche Kleinserienfertigung“ (LO 858/11 – 1), das durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird.

## Literatur

- Anderl, R. (2015). Leitfaden Industrie 4.0: Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand. Frankfurt am Main: VDMA-Verlag.
- Benter, M., Cheung, R., Lödding, H. (2015). Analyse von Arbeitsabläufen mit 3D-Kameras. In: Meier H. (Hrsg.): Lehren und Lernen für die moderne Arbeitswelt. Hochschulgruppe Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (HAB), HAB-Forschungsbericht 28, Berlin: GITO-Verlag, S. 313-339, ISBN 978-3955451288.
- Bokranz, R., Landau, K. (2006). Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen: MTM-Handbuch. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.
- Czumanski, T., Prasse, T., Lödding, H. (2013). Analyse von Einflussfaktoren auf die Arbeitsproduktivität Eine Grundlage für zielorientierte Verbesserungsprozesse in der Serienproduktion. *Industrie Management*, Vol. 29 (3), S. 20–24.
- Dorner, M. (2014). Das Produktivitätsmanagement des Industrial Engineering unter besonderer Betrachtung der Arbeitsproduktivität und der indirekten Bereiche (Doktorarbeit). Karlsruher Institut für Technologie.
- Glöckner, R., Benter, M., Grabner, C., Lödding, H. (2017). Modellierung der Arbeitsproduktivität. Working Paper des IPMT der TU Hamburg, Onlineveröffentlichung, Hamburg: DOI: 10.13140/RG.2.2.31544.24328.
- Grabner, C., Khokhar, F., Schoop, T., Lödding, H. (2017). Ein digitales Universalwerkzeug für die Produktionsanalyse: Entwicklung einer Web-App zur methodenübergreifenden Analyse von Produktionsprozessen. *Industrie Management*. Vol. 33 (6), S. 7–10.
- REFA. (1997). Datenermittlung. Methodenlehre der Betriebsorganisation. München: Carl Hanser Verlag.
- Sumanth, D. J. (1984). *Productivity Engineering and Management: Productivity Measurement, evaluation, Planning and Improvement in Manufacturing and Service Organizations*. Miami: McGraw-Hill, Inc.

- Tietze, F., Lödding, H. (2014). Analyse der Arbeitsproduktivität in der Unikatfertigung: Eine Grundlage für zielorientierte Verbesserungsprozesse in der Unikatfertigung. *Industrie Management*, Vol. 30 (3), S. 62–66.
- Wöhe, G., Döring, U. (2013). Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre (25., überarb. und aktualisierte Aufl.). *Vahlers Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften*. München: Vahlen.



# Digitalisierung der Produktion in KMU

Ein Retrofit-Konzept für die Realisierung der I4.0 Fabrik

Norbert Gronau, Sander Lass

Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, insb. Prozesse und Systeme, Universität Potsdam

## 8. Einleitung

Beeinflusst von industriellen Trends und der fortschreitenden technologischen Entwicklung (Westkämper 2013), sind produzierende Unternehmen mit einer wachsenden Komplexität innerhalb der Fabrik konfrontiert. Schnelle Marktveränderungen und eine starke Individualisierung der Produkte schaffen die Notwendigkeit einer hohen Agilität des Produktionsmanagements und der Fabrikgestaltung (Kagermann et al. 2013). Daher ist die Umsetzung von Wandlungsfähigkeit (Andresen/Gronau 2005) unerlässlich, um diese Agilität effizient und zuverlässig zu erreichen.

### 8.1. Komplexitätsreduzierung durch Dezentralisierung

Die Dezentralisierung durch intelligente und autonome Einheiten - im Gegensatz zu herkömmlichen Kontrollstrukturen in zentraler monolithischer Form - ist ein geeigneter Ansatz, um die Komplexität in Fertigungsszenarien zu reduzieren (Barbosa et al. 2015). Die Ausstattung des Produktionssystems, welches ein komplexes sozio-technisches System (vgl. Neumann et al. 2012) darstellt, mit dezentralen und autonomen Produktionseinheiten (Windt/Jeken 2009) ermöglicht unter anderem ein hohes Maß an Rekonfigurierbarkeit (ElMaraghy 2005).

Cyber-physische Systeme (CPS) schaffen die technologische Basis für selbststeuernde Methoden in der Produktion (Gronau/Theuer 2016, acatech 2011). Sie integrieren Fabrikelemente und ganze Anlagen zu cyber-physischen Produktionssystemen (CPPS). Die Vision sieht CPPS als wesentlichen Bestandteil der modernen Fabrik zur Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen. Wandlungsfähigkeit und Komplexitätsbeherrschung sind u. a. Potenziale dieser neuen Generation des Produktionsmanagements. Mit Hilfe von CPPS ist eine

hohe Anpassungsfähigkeit an veränderte Umgebungsbedingungen durch Flexibilität und Autonomie in der Fabrik möglich (acatech 2012).

Zwar sind aus Perspektive der Anbieter bereits Produkte zu dessen Realisierung verfügbar, jedoch mit Blick auf den bisherigen Umsetzungsgrad innerhalb der Praxis scheinen die potenziellen Anwender diesen Optimismus nicht zu teilen: der Einsatz der neuen Problemlöser erfolgt nur zögerlich.

## 8.2. Forschungsgegenstand

Die Transformation des theoretischen Konstrukts CPPS in die praktische Realisierung kann allerdings nur unter Einbezug der den Anwendungskontext Fabrik prägenden Rahmenbedingungen erfolgen. Vor allem ist nicht davon auszugehen, dass vorhandene Maschinen und Anlagen ohne Weiteres durch neue Exemplare ersetzt werden können. Dies impliziert als Lösungsansatz, Vorhandenes in geeigneter Form zu befähigen, als Teil eines CPPS zu agieren.

Als Forschungsgegenstand resultiert die Frage nach einem Konzept, welches den Brownfield-Charakter aufgreift und die CPS-Erweiterung bestehender Systeme gestattet:

- Wie kann die Integration geschlossener Legacy-Systeme und Alt-Anlagen realisiert bzw. deren Einbindung in CPPS erfolgen, um dessen Vorteile effektiv nachhaltig zu nutzen?
- Wie können die Autonomie und lokale Informationsverarbeitung sowie die notwendige Vernetzung und Kommunikation der Elemente praxistauglich implementiert werden?

Die Beantwortung der formulierten Forschungsfragen liefern eine Basis für die Realisierung von CPPS-Elementen innerhalb bestehender (Produktions-)Systeme bzw. die Findung einer geeigneten Lösung.

## 8.3. Methodik und erwartete Ergebnisse

Auf Grund der Zielstellung nutzt diese Forschungsarbeit ein Vorgehensmodell aus dem Portfolio der Design Science für den Prozess der Lösungsfindung. Die Generierung des angestrebten Artefakts orientiert sich deshalb am Prozess der Design Science Research Methodology (DSRM) nach Peffers (Peffers et al. 2007). Insbesondere werden die Phasen Problemanalyse, Anforderungsanalyse, Konzeption und prototypische Implementierung sowie Validierung durchlaufen.

Die Problemanalyse arbeitet die allgemeinen Rahmenbedingungen des Diskursbereichs Fabrik heraus. In der Phase der Anforderungsanalyse

liefert die Systemanalyse (vgl. Krallmann et al. 2013) einer realen Produktion weitere Erkenntnisse hinsichtlich praxisrelevanter Bedarfe und zeigt die Erweiterungsbedarf der klassischen Automatisierungstechnik auf. Die Entwicklung des Lösungskonzepts beginnt mit der Aufgabenstrukturierung durch ein Schichtenmodell und korrelierten Geräteklassen. Die diesbezügliche Zuordnung von Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) und CPS zeigt die Notwendigkeit der Funktionserweiterung des klassischen Automatisierungsgerätes und gibt Auskunft über die ergänzend notwendigen Funktionen. Die anschließende Konkretisierung der Lösungsidee umfasst sowohl ein Hardware- als auch ein Softwarekonzept. Das Ergebnis ist eine CPS-Komponente (I4.0-Box) inklusive Architekturmodell (Fabrikbetriebssystem) für dessen Betrieb zur Erweiterung bestehender Anlagen.

Eine prototypische Implementierung überführt diese theoretischen Artefakte in eine reale Umsetzung, die neben der Machbarkeit die Basis für die anschließende erste Konzeptevaluierung und -validierung liefert. Dies geschieht an Hand einer Fallstudie zur Prüfung der Wandlungsfähigkeit einer Anlagensteuerung, welche die klassische, zentral gesteuerte SPS-Ausführung der dezentral gestalteten Variante unter Einsatz der I4.0-Box gegenüberstellt. Diese funktionsbezogene Validierung erfolgt wegen der Limitierung der Möglichkeiten zu Experimenten am Originalsystem. Dahingehend findet das Logistiksystem des Forschungs- und Anwendungszentrum Industrie 4.0 Potsdam (Gronau/Lass 2016) Verwendung und bildet den technischen Kontext für die experimentelle Prüfung beider Ausprägungen hinsichtlich Wandlungsfähigkeit.

Ergebnisse sind neben dem proof of concept ebenfalls quantitative Aussagen zur Wirksamkeit des dezentralen Steuerungsparadigmas für diesen Anwendungsfall. Eine Verallgemeinerung ist unter der Prämisse des gleichen zu Grunde liegenden Komplexitätsmodells durch Skalierung möglich und auf weitere Systeme der Fabrik übertragbar.

## 9. Rahmenbedingungen des Diskursbereichs

Eine erfolgreiche Transformation in Richtung CPPS erfordert die Berücksichtigung der Bedingungen, die den Anwendungskontext einer Fabrik prägen. Die Informationstechnologie einer Fabrik besteht hauptsächlich aus Automatisierungssystemen. Im Vergleich zu den durch die Eigenschaften der Office-IT<sup>1</sup> charakterisierten Informationssystemen

---

<sup>1</sup> Office-IT dient in diesem Kontext als Oberbegriff für die typischerweise durch Internet-Technologien vernetzen Informationssysteme des Büro-Bereichs und deren Backends (z. B. Datenbanken, Fileserver oder infrastrukturelle Systeme) (vgl. Stouffer et al. 2011).

wie Manufacturing Execution Systemen (MES) oder Enterprise Resource Planning Systemen (ERP) muss die IT auf Fabrikebene (vgl. Automatisierungspyramide, z.B. Hollender 2010) weitere Rahmenbedingungen erfüllen (vgl. Gumzej 2010, Damm/Olderog 2003). Dazu gehören unter anderem (a) Echtzeitfähigkeit der Regelkreise zur Informationsverarbeitung und -übertragung sowie lange Arbeits- und Innovationszyklen (>7 Jahre), was (b) die Umsetzung innerhalb von Brownfield-Szenarien impliziert.

(a) Die Aufgabe der Implementierung von Regelkreisen für physisch wirkende Komponenten erfordert Echtzeitfähigkeit der ausführenden Rechnersysteme. Echtzeit bedeutet, dass ein System garantiert, dass es innerhalb einer bestimmten Zeitspanne reagiert (timeliness) und es die gleichzeitige Ausführung von verschiedenen Aufgaben (concurrency) ermöglicht. Aufgrund der starken Verknüpfung mit externen technischen Prozessen muss die Verarbeitung und Kommunikation synchron mit den Vorgängen erfolgen. Damit hat die Dimension Zeit im Gegensatz zu ihrer Rolle in der allgemeinen Informationsverarbeitung der Büro-IT eine explizite Bedeutung (Halang 1989). Es gibt Zeitpunkte oder periodische Zeitvorgaben für die Ausführung von Aufgaben, d. h., das Ergebnis besitzt keinen Wert nach Ablauf der Frist (harte Echtzeit) oder nur noch ein reduzierten Wert (weiche Echtzeit) (Stankovic and Ramamritham 1990).

(b) Die typische Implementierung von CPS ist als Brownfield-Szenario zu sehen. Der Bau neuer Produktionsanlagen von Grund auf ist eher die Ausnahme als der Standard. Die typische Situation ist die Reorganisation bestehender Anlagen und Prozesse. Aufgrund von Strukturen, die sich über einen langen Zeitraum entwickelt haben, kann diese Reorganisation sehr aufwendig sein (Kühn 2006). Gegebenenfalls müssen bestehende Systeme auf Grund des Investitionsschutzes oder der mangelnden Investitionsbereitschaft einbezogen werden. Der Einsatz von CPS bei gleichzeitiger Kompletterneuerung einer Anlage ist zumeist keine realistische Option. Eine wesentliche Fragestellung für die Wissenschaft ist die angemessene und geeignete Integration von CPS in bestehende Informationssysteme (Gronau 2014).

(c) Hinzu tritt ein weiterer Aspekt. Die Programmiermöglichkeiten einer Standard-SPS erschweren die Implementierung von CPS-Fähigkeiten,

da sie sich auf die Automatisierung von Geräten konzentrieren. Als potentielle Elemente eines CPPS benötigen Produktionsobjekte<sup>2</sup> ausreichende Kommunikationsfähigkeiten, um die Komplexität zu reduzieren und die Vorteile der Dezentralisierung zu nutzen. Bezogen auf Autonomie, Dezentralisierung und CPS erfassen diese Produktionseinheiten Informationen, verarbeiten sie, treffen Entscheidungen und führen sie selbstständig mit eigenen Ressourcen aus (Theuer 2012). Daher erfordern diese Subsysteme Umgebungswahrnehmung, erweiterte Speicher- und Kommunikationsmöglichkeiten, um einen umfassenden Informationsaustausch und eine autonome Aufgabenausführung zu ermöglichen (Freitag et al., 2004).

Diese Anforderungen an die lokale Informationsverarbeitung und Entscheidungsausführung erfordern die Implementierung geeigneter Algorithmen. Diese Aufgabe stößt schnell an ihre Grenzen, wenn es um die Umsetzung mit den klassischen Programmierverfahren der Automatisierungssysteme nach IEC-61131 (IEC 2013) geht. Der Versuch, Szenarien zur schnellen und möglichst automatischen Rekonfiguration von Anlagen (Änderbarkeit) sowie zur lokalen Bereitstellung von aggregierten Funktionen und Systemzuständen (Komplexitätsreduzierung) mittels klassischer speicherprogrammierbarer Steuerungen (SPS) zu realisieren, hat keine geeignete und zufriedenstellende Lösung gefunden. Die Implementierung der erforderlichen Algorithmen, basierend auf der gängigen Schrittkettenprogrammierung, beeinträchtigt die Echtzeitfähigkeit (Zykluszeit) des Systems oder führte zu einer schwer zu wartenden Software. Die Notwendigkeit einer adäquaten lokalen Umsetzung komplexer Algorithmen ist daher neben den Echtzeitfähigkeiten und dem Brownfield-Szenario eine weitere Grundvoraussetzung.

Die Kombination der Prämissen (a), (b) und (c) führt zu der Erkenntnis, dass die Umsetzung der CPS-Fähigkeiten eine adäquate Erweiterung der bestehenden Fertigungseinheiten erfordert. Diese Erweiterungen müssen sowohl Echtzeitfähigkeiten als auch die mögliche Implementierung komplexer Algorithmen berücksichtigen. Dies bedeutet insbesondere die Vermeidung von Einschränkungen der klassischen Automatisierungsparadigmen.

---

<sup>2</sup>Der Begriff Produktionsobjekt umfasst alle möglichen Einheiten der Fertigungs- und Produktionsplanung. Sie sind die Elemente des Produktionssystems. Dabei handelt es sich in erster Linie um Maschinen und Werkzeuge, Werkstücke und Werkstückträger sowie um Logistikausrüstung wie z.B. Automobiltransporte und Pufferelemente.

## 10. CPS-Befähigung bestehender Produktionsobjekte

Im Hinblick auf die Brownfield-Situation ist es notwendig, bestehende Komponenten zu befähigen, als Teil eines CPPS zu agieren. Insbesondere die Integration von geschlossenen Altsystemen ist ein typischer Anwendungsfall. Um dieser Herausforderung gerecht zu werden, wurde Gerät entwickelt, welches die Nachrüstung der geforderten Eigenschaften ermöglicht und eine Produktionsanlage mit CPS-Fähigkeiten ausstattet. Das Gerät ermöglicht die Umsetzung verschiedener Middleware-Konzepte wie den theoretischen Ansatz des Referenzarchitekturmodells Industrie 4.0 (RAMI 4.0) mit seinem konzeptionellen Begriff Administrationsschale (Adolphs/Epple 2015).

### 10.1. Funktionsprinzip

Nach dem Prinzip der CPS, mit der umfassenden Wahrnehmung ihrer Umgebung durch Sensoren und ihrer Interaktion durch Aktoren (vgl. Lee/Seshia 2014), gibt es zwei grundlegende Aufgaben der Weiterentwicklung bestehender Systeme: die Erfassung von Umweltinformationen als passive Stufe und die Beeinflussung der physikalischen Umgebung als aktive Stufe. Die passive Stufe realisiert die Datenerfassung durch vorhandene Sensoren oder durch den Einsatz von Zusatzgeräten. Er greift nur lesend auf das System zu. Analog zur Unterscheidung in Lese- und Schreiboperationen bedeutet dies, dass es keinen kritischen Eingriff in das System gibt und die Berücksichtigung von Nebenwirkungen und die Regelung von Schreiboperationen nicht notwendig ist. Die aktive Stufe ist dagegen ein Eingriff in das Systemverhalten, z.B. durch Regelkreise mit Aktoren. Abhängig von den vorhandenen Eigenschaften der Antriebsregler (z.B. elektrischer Anschluss, Grundlogik, ggf. Zustandsrückmeldung) ist die geeignete Synchronisation der externen Signale mit der vorhandenen Steuerung (z.B. SPS und deren Programm) eine wichtige Aufgabe.

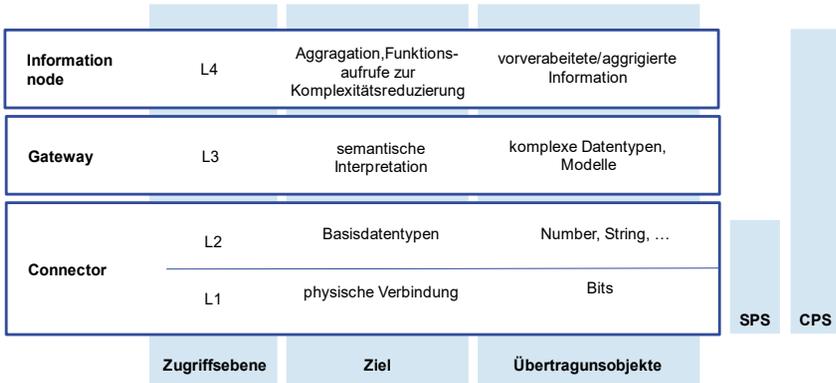


Abbildung 1: Vergleich von SPS und CPS über Schichtenmodell und Geräteklassen.

Durch Kombination der Pyramide der Weisheit (DIKW-Hierarchie - Data, Information, Knowledge and Wisdom; vgl. Ackoff 1989) und der Schichtenarchitektur von Referenzmodellen für Netzwerkprotokolle (vgl. ISO 2011) ergeben sich die Zugriffsarten wie folgt: Signal-, Daten- und Informations- sowie Aggregationsebene. Der Signalpegel bezieht sich auf die physikalische Verbindung. Sie deckt hauptsächlich die Spezifikationen für elektrische Signale ab. Übertragungselemente sind typischerweise Bits oder Analogwerte. Basierend auf diesen Elementen definiert die Datenebene grundlegende Datentypen, z.B. numerische Werte. In Verbindung mit Protokollen und Datenmodellen bietet die Informationsebene eine Erweiterung um semantische Aspekte oder komplexe Datenstrukturen. Die Aggregationsebene erlaubt sowohl eine Vorverarbeitung als auch eine Aggregation von Daten oder Informationen. Sie gestattet Funktionen auf hohem Abstraktionsniveau für die Kommunikation und Betrieb, d. h., ein an dieser Ebene operierendes System stellt Funktionsaufrufe bereit, die komplexe Vorgänge kapseln und die Kommunikation vereinfachen.

Mit Bezug auf dieses Schichtmodell ergeben sich drei Geräteklassen:

- Ein Connector realisiert eine Verbindung auf physikalischer und Datenebene.
- Ein Gateway stellt Verbindungen auf Informationsebene her.
- Ein Information node arbeitet auf der Aggregationsebene.

Abbildung 1 zeigt die drei Klassen von Steuergeräten und ordnet SPS und CPS hinsichtlich Ebenen, Objekten und Übertragungselementen zu. Die Elemente der Übertragung stellen die Objekte der Kommunikation

dar. Eine SPS deckt bestenfalls die beiden unteren Ebenen ab. Wechselwirkungen mit den Ebenen L3 und L4 bedürfen der Ergänzung, z. B. nach dem CPS-Konzept. CPS bieten durch ihre Systemeigenschaft der erweiterten Informationsverarbeitung die Möglichkeit, Daten semantisch zu interpretieren und zu aggregieren sowie die Komplexität durch höhere Funktionsaufrufe zu reduzieren. Somit bedeutet die CPS-Befähigung eines Objektes die Aufgabe, Informationsknoten zu implementieren.

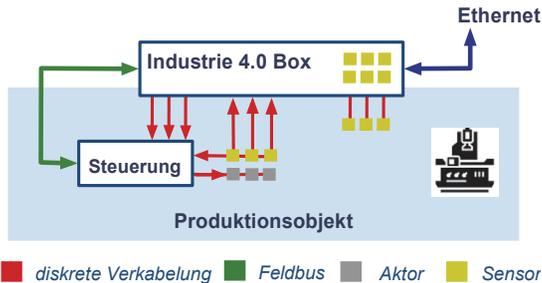


Abbildung 2: Funktionsprinzip der I4.0-Box.

Eine reale Implementierung eines solchen Informationsknotens ist ein Gerät, das ein CPS darstellt und eine bestehende Anlage ergänzt. Basierend auf dem Begriff "Industrie 4.0" wird dieses Gerät als hier I4.0-Box bezeichnet. Abbildung 2 fasst das Funktionsprinzip zusammen. Das Gerät erhält Zugriff auf die eingebauten Sensoren und Aktoren von Produktionsobjekten. Bei Bedarf ergänzt es zusätzliche Erfassungsmechanismen. Das CPS-basierte Gerät verbindet Sensoren über eine diskrete Verdrahtung oder vorhandene Feldbusnetzwerke der Steuerung (z.B. SPS). Zusätzlich verwendet es unabhängige Sensoren, die in einer geeigneten Position installiert sind. Für den Zugriff auf Aktoren nutzt die Box ein Feldbusnetzwerk in Kombination mit zusätzlichen Eingangsmodulen der SPS oder in Sonderfällen über eine direkte Verdrahtung zu den darunterliegenden Steuergeräten (z.B. Motorsteuerung).

## 10.2. Perspektive Software - Fabrikbetriebssystem

Hinsichtlich der Betriebssysteme und ihrer Funktion - Abstraktion von der zugrunde liegenden Hardware durch die Verwaltung der Hardware-Ressourcen (Tanenbaum 2009) - werden die Software-Komponenten der Boxen mit dem Begriff FabOS (Fabrikbetriebssystem) zusammengefasst (Lass 2017). Das FabOS basiert auf der in Abbildung 3 dargestellten Architektur. Integrale Elemente sind die Laufzeitumgebung, der Connection Service, der Monitoring Service sowie der KPI Service und das Control Center.

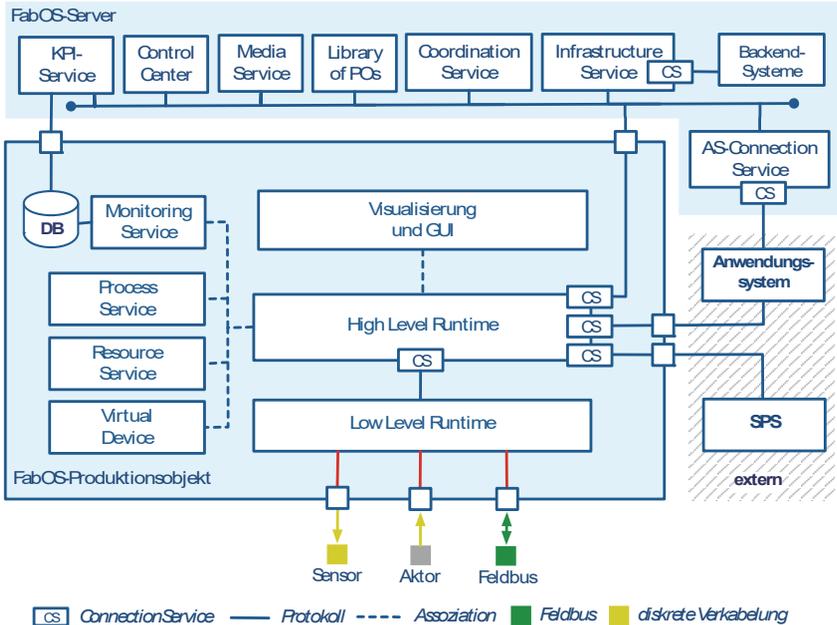


Abbildung 3: Architektur und Komponenten des FabOS (Lass 2017).

Die Laufzeitumgebung gliedert sich in zwei Funktionsbereiche. Die Low-Level-Runtime (LLR) ermöglicht die Implementierung von echtzeitkritischen Funktionen. Die Realisierung erfolgt über SPS oder echtzeitfähige Mikrocontroller, die mit typischen Entwicklungsumgebungen der Automatisierung (z.B. CODESYS) programmiert werden. Experimente hinsichtlich der praktischen Umsetzung haben gezeigt, dass eine Implementierung von Wandlungsfähigkeit, die diesem Programmierstil folgt, schnell an ihre Grenzen stößt. Der Aufbau eines frei konfigurierbaren Transportsystems<sup>3</sup> mit einer zentralen SPS als Steuerungseinheit erwies sich mit sequentiellen Steuerungsparadigmen als schwierig zu handhaben. Daher beinhaltet das Konzept eine weitere Umsetzungsmöglichkeit. Die High-Level-Runtime (HLR) ermöglicht den Einsatz von Hochsprachen und Programmierparadigmen, die schnelle und einfache Erweiterungen für komplexe Informationsverarbeitung ermögli-

<sup>3</sup> Die Auswahl des Szenario Transportsystem erfolgt auf Grund seines Einsatzes als typisches Element der Fabrik und seines übergreifenden Charakters als prozessbildendes System.

chen. Abhängig von dem Produktionsobjekt und der beabsichtigten Anwendung wird im Betrieb die LLR, die HLR-Implementierung oder eine Kombination aus beidem verwendet.

Der Connection Service ermöglicht die Kommunikation der Komponenten. Ähnlich dem Treiberkonzept von Betriebssystemen abstrahiert er von den technischen Details und ermöglicht den Zugriff auf Funktionen des FabOS. Des Weiteren erlaubt er die Implementierung einer Gateway-Funktion zwischen der internen Kommunikation der Systemkomponenten und den Protokollen externer Komponenten oder Geräten. Dies kann mit Hilfe von Standards (z.B. OPC-UA bei der Kopplung von LLR und HLR) oder auf die vom Zulieferer explizit definierte Weise geschehen. Instanzen des Connection Service können als zentraler Service oder dezentral in den jeweiligen Komponenten implementiert werden.

Wesentliche Eigenschaft eines CPS ist die Umgebungswahrnehmung. Zuständiges lokales Modul ist der MonitoringService. Die Laufzeitumgebung jedes Produktionsobjekts nimmt das Loggen und Abspeichern von Ereignissen (Events) vor. Dies umfasst u. a. Kommunikationsvorgänge und Veränderungen von Umgebungsdaten, Mengen und Eigenschaften, die das interne Modell abbildet, sowie Benutzerinteraktionen. Ebenfalls ist die Protokollierung von Wertverläufen in bestimmten Zeitintervallen vorgesehen, die sich über zeitbasierte Events in die ereignisorientierte Verfahrensweise einreicht.

Ergänzend zu der lokalen Persistierung von Ereignissen ist dem allgemeinen Paradigma Inversion of Control (vgl. Sommerville 2011) folgend mit der Verwendung von Listnern eine weitere Möglichkeit gegeben, Informationen zielgerichtet zu kommunizieren bzw. abzurufen. Adressierter Anwendungsfall ist vorrangig die Bereitstellung von Echtzeitdaten und die Vermeidung von ineffizientem Polling. In diesem Zusammenhang bezieht sich der Begriff Echtzeit auf die Aktualität, d. h., die Werte spiegeln den zum Betrachtungszeitpunkt tatsächlich vorliegenden Wert wider.

Der ProcessService koordiniert zeitliche Abläufe und ist für Zeitsynchronisation der Produktionsobjekte zuständig. Mit dem ResourceService werden Abhängigkeiten bezüglich notwendiger Betriebsmittel bei der Ausführung abgebildet. Dies sind insbesondere benötigtes Material und Werkzeuge, Personal, Baugruppen oder Halbzeuge. Ein VirtualDevice bildet ggf. ein Modell eines bestimmten Elements oder Subsystems ab (Digitaler Zwilling).

## 11. Proof of Concept

Die prototypische Realisierung von Boxen und deren Anwendung innerhalb der Testplattform des Forschungs- und Applikationszentrums Industrie 4.0 Potsdam (vgl. Lass 2017) ist Teil der Validierung. Der erste Schritt der Konzeptvalidierung ist die prototypische Umsetzung der Box selbst. Es umfasst sowohl die Hardware als auch die Anwendung des werkseitigen Betriebssystems als Softwareteil. Die Box-Prototypen basieren auf dem Raspberry Pi. Zusätzlicher Bestandteil ist eine I/O-Karte, die an werksspezifische Anwendungen angepasst ist. Dieses Board bietet nicht nur industrietypische Steckverbinder (nach Level 1 und 2), sondern auch die Möglichkeit, weitere Schnittstellen durch ein internes Backbone zu erweitern. Zur Demonstration des Konzepts sind die Boxen dieser Prototypen Teil der Anwendungsfälle innerhalb der Testplattform des Forschungs- und Anwendungszentrums.

Einer dieser Anwendungsfälle ist ein modulares Transportsystem. Die Nachrüstung dieser bestehenden Anlage mit Hilfe der Box-Prototypen stellt den zweiten Teil der Validierung dar. Ziel ist es, den diskutierten theoretischen Ansatz im Hinblick auf seine praktische Umsetzbarkeit und den Grad der Zielerreichung zu bewerten. Die daraus resultierende Aufgabe ist die Implementierung eines dezentralen Steuerungssystems, das die vorhandenen Komponenten integriert. Insofern zeichnet sich das betrachtete System durch seine Flexibilität aus. Das heißt, der Change Agent befindet sich außerhalb des Systems (Ross et al. 2008). Bei der Operationalisierung erfolgt dies durch Ermittlung des Aufwands für extern verursachte Änderungen am Transportsystem, die eine Neukonfiguration erfordern. Die für die Rekonfiguration der Anlage benötigte Zeit ist der verwendete Messwert. Es geht also darum, die Flexibilität bestehender Anlagen zu erhöhen, indem der Aufwand für Systemänderungen durch den beschriebenen Ansatz reduziert wird.

### 11.1. Aufbau der Fallstudie

Ausgangspunkt bildet eine konventionelle Rollenbahn als Repräsentant für bereits bestehende Anlagen. Sie besteht aus verschiedenen Arten von Transportmodulen, die innerhalb des Produktionslayouts zu Förderstrecken kombiniert werden. Jedes Modul hat eine Motorsteuerung, deren Aktivitäten durch einfache 24 Volt Signale bestimmt werden. Die verwendeten Module sind in Abbildung 4 dargestellt.

Basismodul	Modul				Anzahl	Summen			
	Sensoren pro Modul	Aktoren pro Modul	Konfiguration Ports	Konfiguration Positionen		Sensoren	Aktoren	Ports	Positionen
Transfer	4	3	3	1	3	12	9	9	3
Gerade kurz	2	3	2	2	5	10	15	10	10
Gerade lang	4	6	2	4	3	12	18	6	12
Abschnitt gekrümmt	6	6	2	2	2	12	12	4	4
Dispatcher	5	5	6	1	1	5	5	6	1
						51	59	35	30
						<b>Gesamtsumme:</b>			<b>175</b>

Abbildung 4: Komplexitätsmodell mit verwendeten Modulen.

Folgende Grundmodule stehen zur Verfügung: Schalter (3 Ports und 1 Position), gerade Module (2 Ports und 2 Positionen sowie 2 Ports und 4 Positionen) und gekrümmte Segmente (2 Ports mit 2 Positionen) sowie ein Dispatcher (6 Ports und 1 Position). Alle Module zeichnen sich jeweils durch die eingebauten Sensor- und Aktorsignale, die Anzahl der Anschlüsse für den Ein-/Auslauf und die internen Positionen aus. Ports sind die Übergabepunkte zwischen den Modulen, die als Ein- oder Ausgang dienen. Positionen stellen die Positionen der zu transportierenden Objekte innerhalb des Moduls dar. Sie werden im Wesentlichen von den Sensoren eines Moduls bestimmt. Insgesamt 110 ein- und ausgehende Signale sowie 65 Variablen, die eine Konfiguration oder einen Zustand (Ports und Positionen) beschreiben, müssen bei der Programmierung berücksichtigt werden. Die konfigurierten Routen von den jeweiligen Start- und Endpunkten erhöhen die Komplexität. Es gibt zwei Varianten der Implementierung:

(A) eine dezentrale Steuerung der Anlagenkoordination durch intelligente Elemente nach dem CPS-Konzept unter Verwendung der I4.0-Boxen.

(B) eine zentrale Steuerung mit diskreter Verdrahtung aller Komponenten nach dem klassischen SPS- und Schrittketten-Paradigma

Die Implementierung (A) befasst sich auch mit der Reduzierung der Komplexität durch dezentrale Steuerung und der Möglichkeit einer schnellen Rekonfiguration des Transportsystems (Gronau et al. 2016, Theuer et al., 2013]. Das gesamte System ist in Segmente unterteilt, die

über die I4.0-Boxen eine kleine Anzahl von Modulen einzeln integrieren. Alle Signale werden direkt an das Schnittstellenmodul der Box angeschlossen (siehe Abbildung 5). Auf LLR-Ebene sind die Grundfunktionen implementiert (wie Motor ein bis Lichtschranke auslöst). Die HLR abstrahiert von diesen elementaren Prozessen und stellt übergeordnete Funktionsaufrufe (wie z.B. Transit etwas von Position A nach Position B) zur Verfügung, die auch für externe Entitäten zugänglich sind. Darüber hinaus löst die HLR - eventuell in Zusammenarbeit mit anderen CPS - komplexe Aufgaben (wie Routing oder Konfliktlösung). Die Lösungsalgorithmen hierfür werden mit Hilfe von Hochsprachen implementiert (in diesem Fall Python).

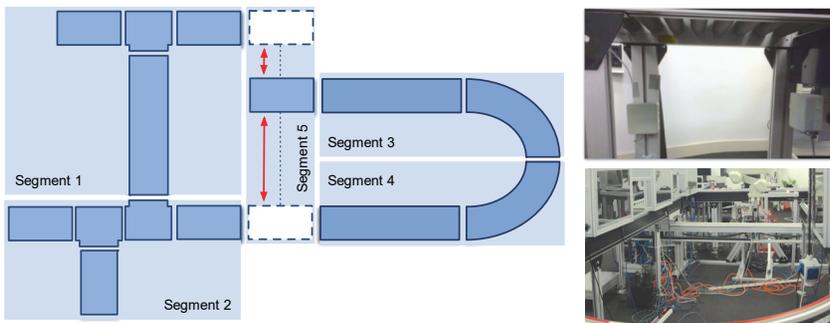


Abbildung 5: Segmentierung, I4.0-Box und Versuchsaufbau.

Die Implementierung (B) stellt den heutigen typischen Kontrollansatz dar. Durch die Verwendung einer Standard-SPS als zentrale Steuerungseinheit wird der Materialfluss sichergestellt. Diese Art der Realisierung verbindet alle Sensoren und Aktoren über eine diskrete Verdrahtung mit einem Gerät. Die Programmerstellung entspricht den SPS-typischen Schrittketten und basiert auf Anweisungslisten und teilweise auf Funktionsbausteinen.

## 11.2. Ergebnisse

Der Vergleich erfolgt mit Hilfe von drei Szenarien: Teiländerungen am Layout (Ausfall eines Moduls, Hinzufügen eines Elements) und größere Änderungen am Layout (Rekonfiguration von mehr als der Hälfte der Module). Abbildung 6 zeigt den Aufwand für die Umsetzung (A) und (B). Diese gliedern sich in Hardware-Setup (vor allem Verdrahtung), Codierung und Einsatz mit abschließendem Test der gesamten Anlage. Der unabhängigen Anpassung im Fehlerfall mit einem kurzen Test der Anlage von (A) steht ein wesentlich höherer Aufwand für die Anpassung

des Quellcodes gegenüber. von (B). Insbesondere der Aufwand für die Codierung wird durch den Einsatz von CPS reduziert. Im Gegensatz dazu erfordert das Hardware-Setup nur minimalen Mehraufwand für die Variante (B).

Die vorliegenden Richtlinien dienen der Sicherstellung eines einheitlichen und guten Erscheinungsbildes. Gleichzeitig kann dieses Dokument als Muster herangezogen werden, da es den Richtlinien entsprechend formatiert ist. Es werden diejenigen Formatierungsangaben vorgestellt, die bei der Abfassung der Beiträge unbedingt eingehalten werden sollten.

Variante (A): CPS				
Szenario	Hardware-setup	Programm-erstellung	Inbetrieb-nahme	Gesamt-aufwand
(1) Ausfall eines Moduls	0h 5m	0h 0m	0h 30m	<b>0h 35m</b>
(2) Hinzufügen eines Elements	0h 35m	0h 0m	1h 0m	<b>1h 35m</b>
(3) Änderung des Layouts	2h 0m	12h 0m	2h 0m	<b>16h 0m</b>

Variante (B): zentrale SPS				
Szenario	Hardware-setup	Programm-erstellung	Inbetrieb-nahme	Gesamt-aufwand
(1) Ausfall eines Moduls	0h 5m	3h 40m	0h 50m	<b>4h 35m</b>
(2) Hinzufügen eines Elements	50m	5h 10m	1h 55m	<b>7h 55m</b>
(3) Änderung des Layouts	3h 20m	16h 0m	4h 35m	<b>23h 55m</b>

Abbildung 6: Benötigte Aufwände.

## 12. Fazit

Das vorgestellte Konzept adressiert vor allem die typische industrielle Brownfield-Situation. Neben der komplexitätsreduzierenden Wirkung des dezentralen Steuerungskonzeptes gegenüber der zentralen Version zeigt die oben beschriebene Fallstudie, dass diese Art der Steuerung auch mit bestehenden Nicht-I4.0-Systemen möglich ist. Durch die entsprechende Erweiterung bestehender Produktionseinheiten zu I4.0-Informationsknoten können die Potenziale einer dezentralen Organisation für bestehende Systeme genutzt werden. Die erste Validierung bezieht sich insbesondere auf den Aufwand bei Systemänderungen. Unter der Prämisse der zunehmenden Komplexität der Informationsverarbeitung und des Rekonfigurationsaufwands in Abhängigkeit von der zu verar-

beitenden Datenmenge skalieren die Ergebnisse progressiv. Dies bedeutet, dass mit zunehmender Größe des Systems die in der Fallstudie identifizierten positiven Effekte zunehmen werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch entsprechende Segmentierung der Steuerungsaufgabe eine Reduzierung des Rekonfigurationsaufwands erreicht werden kann, wenn die erforderlichen Fähigkeiten - in diesem Fall durch die Erweiterung bestehender Systeme - mit geringem Aufwand installiert werden können. Das vorgestellte Konzept geht in diese Richtung und deckt sowohl die Software- als auch die Hardware-Ebene ab. Die I4.0-Box erweitert bestehende Systeme und schafft die Voraussetzungen für die Integration. Das Fabrikbetriebssystem bietet eine flexible Softwarearchitektur für die einfache Anwendung der Box und ermöglicht die Kombination von klassischer SPS-Programmierung und der Implementierung komplexer Algorithmen.

Neben der Erhöhung der Rekonfigurationseffizienz bestehender Anlagen gehören auch die maschinenübergreifende Prozessüberwachung in heterogenen Systemlandschaften und das Design von Echtzeit-Regelkreisen, d. h. die Auswertung der Daten mit Informationsgenerierung erfolgt zum Zeitpunkt der Erstellung. Beide Fälle sind Gegenstand weiterer Forschungsarbeiten.

## Literatur

- acatech (2011). acatech POSITION: Cyber-Physical Systems: Innovationsmotor für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion. Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag.
- acatech (2012). acatech Studie: Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems. Berlin: Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.
- Ackoff, R. L. (1989). From data to wisdom. *Jornal of Applied Systems Analysis*, Vol. 16, S. 3–9.
- Adolphs, P. and Epple, U. (2015). Statusreport Referenzarchitektur Industrie 4.0 (RAMI4.0). Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) und Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI).
- Andresen, K., Gronau, N., (2005) Adaptability concepts for enterprise resource planning systems-a component framework. In *AMCIS 2005 Proceedings*, S. 150.
- Barbosa, J., Leitão, P., Adam, E., Trentesaux, D. (2015). Dynamic self- organization in hollonic multi-agent manufacturing systems: The adacor evolution. *Computers in industry*, Vol. 66, S. 99–111.

- Damm, W., Olderog, E. (2003). Formal Techniques in Real-Time and Fault-Tolerant Systems: 7th International Symposium, FTRTFT 2002, Co-sponsored by IFIP WG 2.2, Oldenburg, Germany, September 9-12, 2002. Proceedings. Lecture Notes in Computer Science. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- ElMaraghy, H. A. (2005). Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 17 (4), S. 261–276.
- Freitag, M., Herzog, O., Scholz-Reiter, B. (2004). Selbststeuerung logistischer Prozesse - ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen. *Industrie Management*, Vol. 20 (1), S. 23–27.
- Gronau, N. (2014). Der Einfluss von cyber-physischen Systemen auf die Gestaltung von Produktionssystemen. In: Kersten, W., Koller, H., und Lödding, H. (Hrsg.): *Industrie 4.0 - Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern*, S. 279–295, Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (HAB). Berlin: GITO Verlag.
- Gronau, N., Lass, S. (2016). Anwendungszentrum Industrie 4.0 Potsdam. *Industrie 4.0 Management*, Vol. 32 (4), S. 66–67.
- Gronau, N., Theuer, H. (2016). Determination of the optimal degree of autonomy in a cyber-physical production system. *Procedia CIRP*, Vol. 57, S. 110–115.
- Gronau, N., Grum, M., Bender, B. (2016). Determining the optimal level of autonomy in cyber-physical production systems. In *INDIN 2016, IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics*, S. 1293–1299.
- Gumzej, R. (2010). *Real-time Systems' Quality of Service: Introducing Quality of Service Considerations in the Life Cycle of Real-time Systems*. London: Springer Verlag.
- Halang, W. A. (1989). Schwerpunkte der internationalen Forschung im Bereich Echtzeitsysteme. In: Henn, R. und Stieger, K. (Hrsg.): *PEARL 89 - Workshop über Echtzeitsysteme*, Informatik-Fachberichte Vol. 231, S. 1–12. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Hollender, M. (2010). *Collaborative Process Automation Systems*. ISA.
- IEC (2013). *IEC 61131-3: Programmable controllers - Part 3: Programming languages*. International Electrotechnical Commission (IEC), ed. 3.0 edition.
- ISO (2011). *ISO/IEC/IEEE 42010:2011: Systems and software engineering – Architecture description*. International Organization for Standardization (ISO), Genf.
- 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 Berlin; Acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.
- Krallmann, H., Bobrik, A., Levina, O. (2013). *Systemanalyse im Unternehmen*. München: Oldenbourg Verlag.
- Kühn, W. (2006). *Digitale Fabrik*. München: Hanser Verlag.
- Lass, S. (2017). *Simulationskonzept zur Nutzenvalidierung cyber-physischer Systeme in komplexen Fabrikumgebungen*. Dissertation, Universität Potsdam.

- Lee, E. A., Seshia, S. A. (2014). *Introduction to Embedded Systems - A Cyber Physical Systems Approach - Edition 1.5*. Berkeley: LeeSeshia.org.
- Neumann, M., Constantinescu, C., Westkämper, E. (2012). A method for multi-scale modeling of production systems. In: H. ElMaraghy (Hrsg.): *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability*, S. 471–475. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Peffer, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A., Chatterjee, S. (2007). A design science research methodology for information systems research. *Journal of Management Information Systems*, Vol. 24 (3), S. 45–78.
- Ross, A. M., Rhodes, D. H., Hastings, D. E. (2008). Defining changeability: Reconciling flexibility, adaptability, scalability, modifiability, and robustness for maintaining system lifecycle value. *Systems Engineering*, Vol. 11 (3), S. 246–262.
- Sommerville, I. (2011). *Software Engineering*. Boston: Addison-Wesley.
- Stankovic, J. A., Ramamritham, K. (1990). What is predictability for real-time systems? *Real-Time Systems*, Vol. 2 (4), S. 247–254.
- Stouffer, K., Falco, J., Scarfone, K. (2011). *Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security: Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) systems, Distributed Control Systems (DCS)*, Institute of Standards and Technology. CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Tanenbaum, A. S. (2009). *Moderne Betriebssysteme*. München: Pearson Education Deutschland GmbH.
- Theuer, H. (2012). Extension of value stream design for the simulation of autonomous production systems. In: H. ElMaraghy (Hrsg.): *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability*, S. 586–591. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Theuer, H., Gronau, N., Lass, S. (2013). The impact of autonomy on lean manufacturing systems. In: Azevedo, A. (Hrsg.): *Advances in Sustainable and Competitive Manufacturing Systems, 23rd International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*, S. 1413–1423. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Westkämper, E. (2013): Struktureller Wandel durch Megatrends. In: E. Westkämper, D. Spath, C. Constantinescu, J. Lentjes (Hrsg.): *Digitale Produktion*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Windt, K. Jeken, O. (2009). Allocation flexibility - a new flexibility type as an enabler for autonomous control in production logistics. In *42nd CIRP Conference on Manufacturing Systems*.



# User-driven Innovation mit UX Probes

Eine praxisorientierte Methode zur strukturierten Durchführung kreativer Langzeit-Nutzerstudien

Kathrin Pollmann, Nora Fronemann, Anne Krüger, Wilhelm Bauer

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Stuttgart

## 1. Menschzentrierte Gestaltung und User-driven Innovation für kleine und mittelständische Unternehmen

Die Digitalisierung stellt kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) vor der Herausforderung, innovativer zu werden und Arbeitsplätze zukunftssicher zu gestalten. Damit dies gelingt, müssen KMU zu einer technischen Neuerung optimal für sich nutzbar machen, dürfen aber gleichzeitig auch die Auswirkungen auf die beteiligten menschlichen Akteure nicht außer Acht lassen. Hierbei kann der menschenzentrierte Gestaltungsprozess (DIN EN ISO, 9241-210), der den Menschen als Nutzer technischer Systeme in den Mittelpunkt rückt, unterstützen.

### 1.1. Der menschenzentrierte Gestaltungsprozess

Ziel der menschenzentrierten Gestaltung ist es, die (potenziellen) Nutzer eines Produkts oder Services frühzeitig und kontinuierlich in die Entwicklung miteinzubeziehen, um ihre Anforderungen und Bedarfe bei der konkreten Ausgestaltung berücksichtigen zu können.

Der menschenzentrierte Gestaltungsprozess stellt den strukturellen Rahmen für diese beständige Nutzereinbindung bereit, indem er die Produktgestaltung in vier Phasen (Analyse, Interpretation, Gestaltung und Evaluation) gliedert. In der Phase Analyse wird zunächst eine detaillierte Anforderungserhebung und Analyse des Nutzungskontexts durchgeführt. Ziel ist dabei zum einen eine strukturierte Erfassung der Bedarfe, zum anderen die Entwicklung eines tiefen Verständnisses für den Nutzer. Die Ergebnisse werden in der Interpretationsphase im Entwicklungsteam zusammengeführt, diskutiert und interpretiert, um darauf

basierend in der nachfolgenden Phase der Gestaltung erste Lösungs-ideen zu entwickeln. Der Fokus liegt hierbei darauf, kurzfristig erste prototypische Konzepte zu entwickeln, die das Produkt für den Nutzer erlebbar machen. Diese werden den Nutzern dann zeitnah in der Phase Evaluation präsentiert und von ihnen getestet und evaluiert. Es findet somit ein Abgleich statt, ob die entwickelten Lösungen die ermittelten Nutzeranforderungen hinreichend adressieren. Ist dies der Fall, wird das Produkt entsprechend weiterentwickelt. Fällt der Abgleich negativ aus, muss das Entwicklungsteam entsprechend in die vorherigen Phasen zurückgehen und die jeweiligen Aktivitäten wiederholen und erweitern. So entsteht in einem iterativen Prozess (siehe Abbildung 1) ein Produkt, das eine hohe Passung mit den Anforderungen und Bedarfen der Nutzer hat und für das in Folge dessen eine hohe Akzeptanz am Markt zu erwarten ist.

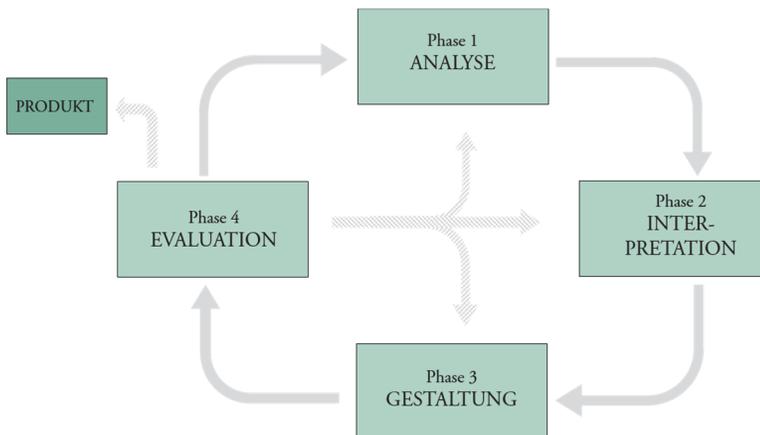


Abbildung 1: Der iterative, menschenzentrierte Gestaltungsprozess und seine vier Phasen nach DIN EN ISO 9241-210.

## 1.2. Chancen der menschenzentrierten Gestaltung für KMU

Für KMU gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten, sich die Digitalisierung zu Nutzen zu machen: Sie können einerseits digitale Produkte und Services zur Unterstützung ihrer internen Prozesse nutzen und damit die Herstellung ihres eigenen Produkts oder Services optimieren. Andererseits entstehen durch die Digitalisierung aber auch viele neue KMU und insbesondere Start-Ups, die sich auf die Entwicklung digitaler Produkte und die Bereitstellung damit verbundener Services konzentrieren. Auch bestehenden KMU müssen sich mit der Frage auseinandersetzen,

inwieweit eine Digitalisierung ihrer bisherigen Produkte und Services sinnvoll erscheint, um weiterhin am Markt erfolgreich zu sein.

Ein menschenzentriertes Vorgehen hat das Potential, in beiden dieser Szenarien – der Nutzung und der Entwicklung digitaler Produkte und Services – langfristige Wettbewerbsvorteile für KMU zu schaffen.

KMU, die digitale Produkte und Services zur Digitalisierung von internen Prozessen nutzen, profitieren im Rahmen der menschenzentrierten Gestaltung davon, dass diese auf die Bedarfe und Fähigkeiten ihrer Mitarbeitenden zugeschnitten sind. Denn umso besser die Kompatibilität zwischen dem Mitarbeitenden und seinem Arbeitswerkzeug ist, desto effizienter und effektiver sind die Prozesse und desto höher ist seine Zufriedenheit. Beide Faktoren tragen zu einem langfristigen Erfolg des Unternehmens am Markt bei.

KMU, die selbst digitale Produkte und Services entwickeln, kann der menschenzentrierte Gestaltungsprozess dabei helfen, sich vom Mitwettbewerbern zu differenzieren und die Nutzerakzeptanz zu erhöhen. Mit zunehmender Digitalisierung steigt der Bedarf an digitalen Produkten, was die Gründung neuer Unternehmen begünstigt, gleichzeitig aber auch zu einer verschärften Konkurrenzsituation am Markt führt. Besonders KMU und Start-Ups profitieren daher davon, relevante Bedürfnisse der Nutzer zu adressieren, da sie so Produkte und Services entwickeln können, die sich durch ein positives Nutzungserleben von der Konkurrenz abheben. Durch eine frühzeitige Nutzereinbindung können außerdem teure Anpassungen des Produkts nach der Markteinführung vermieden werden.

### 1.3. Herausforderungen der menschenzentrierten Gestaltung für KMU

Bei der Entwicklung von digitalen Produkten und Services wird in KMU immer öfter auf agile Entwicklungsansätze zurückgegriffen (Beck et al. 2001) und klassische wasserfallartige Modelle werden seltener. Die Einbindung von Nutzern in diese Prozesse stellt aber für KMU häufig nach wie vor eine Herausforderung dar. In vielen KMU sind die nötigen fachlichen und methodischen Kompetenzen noch nicht vorhanden, um Nutzerstudien durchzuführen und die Ergebnisse dem Entwicklungsprozess zuzuführen. Obwohl das iterative Vorgehen des menschenzentrierten Gestaltungsprozesses und die agile Entwicklung grundsätzlich einige Überschneidungen aufweisen, fehlen KMU im Vergleich zu größeren Unternehmen häufig die finanziellen und personellen Ressourcen um beide Prozesse strukturiert und nachhaltig zusammenzuführen (Stickel et al.

2015). Wenn die menschenzentrierte Gestaltung in Entwicklungsprozessen von KMU Berücksichtigung findet, so geschieht dies häufig in Form von flexiblen, individuellen Lösungen für spezifische Teilaspekte.

#### 1.4. User-driven Innovation - der Nutzer als Innovationsquelle

Der menschenzentrierte Gestaltungsprozess dient nicht nur der Ausgestaltung und Evaluierung bestehender Produkt- und Serviceideen gemeinsam mit Nutzern, sondern kann auch gezielt zur Generierung neuer, innovativer Ideen genutzt werden. In diesem Fall werden die (potenziellen) Nutzer als Innovationsquelle eingesetzt – ein Ansatz, der auch als *User-driven Innovation* bekannt ist (Rosted 2005). Dazu werden in der *Analysephase* mit Nutzern Studien durchgeführt, die primär darauf ausgerichtet sind, die Menschen, ihr Umfeld und ihren Umgang mit einem bestimmten Thema kennenzulernen, zu verstehen und daraus Innovationspotenziale abzuleiten. Im nächsten Schritt werden dann aufbauend auf den Ergebnissen der Nutzerstudien im Entwicklungsteam oder in einem Nutzerworkshop Produkt- und Serviceideen zu dem Thema entwickelt. Vor dem Hintergrund des Innovationsdrucks, mit dem sich KMU im Zuge der Digitalisierung konfrontiert sehen, erscheint der Ansatz der *User-driven Innovation* für diese Unternehmen ein besonders relevanter Aspekt der nutzerzentrierten Gestaltung zu sein. Er bietet die Möglichkeit, Ideen direkt in Zusammenarbeit mit den Nutzern zu generieren, die Produkt- oder Servicegestaltung von Beginn an ihren Bedarfen auszurichten. Zum einen können durch den Einbezug der Nutzerperspektive die Kreativität und Innovationskraft der Ideen gesteigert werden, zum anderen werden die Chancen einer erfolgreichen Markteinführung erhöht.

#### 1.5. User Experience und positives Erleben als Erfolgsfaktoren

Lange war der menschenzentrierte Gestaltungsprozess in erster Linie darauf ausgerichtet, eine hohe Benutzerfreundlichkeit (*Usability*) neuer Produkte und Services sicher zu stellen. Im letzten Jahrzehnt gewinnen aber auch weichere Nutzeranforderungen immer mehr an Bedeutung. Insbesondere rückt hierbei die *User Experience* (UX) in den Fokus der menschenzentrierten Gestaltung, die das Erleben des Produktes und seiner Nutzung beschreibt. Es hat sich gezeigt, dass ein Produkt, das positive Nutzungserlebnisse erzeugt, häufiger und bevorzugt genutzt wird (Kahneman 1999, Spath et al. 2010) und eine langfristige Produktnutzung und -bindung begünstigt (Fronemann/Peissner 2014). UX-Forschung beschäftigt sich dementsprechend damit, Ansätze und Methoden zu entwickeln, mit deren Hilfe ein positives Nutzungserleben durch die Produktgestaltung gezielt gefördert werden kann. Obwohl hierbei

noch kein etabliertes Methodenset existiert, basieren eine Reihe von Ansätzen auf der Theorie, dass ein positives Nutzungserleben durch die Erfüllung bestimmter menschlicher Grundbedürfnisse hervorgerufen werden kann (Hassenzahl et al. 2010, Sheldon et al. 2001). Zu den Bedürfnissen gehören zum Beispiel Kompetenz, Stimulation und Sicherheit.

Produkte und Services mit einem positiven Nutzungserleben bieten Potenziale für KMUs und Start-Ups, da mit der gezielten Adressierung von Bedürfnissen eine Differenzierung zu Konkurrenzprodukten am Markt möglich wird. Um ein Produkt mit einer positiven UX zu gestalten, ist es allerdings zunächst erforderlich, zu identifizieren, welche Bedürfnisse für (potenzielle) Nutzer im jeweiligen Kontext relevant sind und welche Erlebnisse von ihnen als positiv wahrgenommen werden. Dies kann im menschenzentrierten Gestaltungsprozess durch eine ausführliche und gut geplante *Analysephase* realisiert werden. Hierbei bietet es sich an, strukturierte Nutzerstudien mit konkreten Fragestellungen mit etwas freieren Formaten der Nutzereinbindung zu kombinieren, um auch das Potenzial der User-driven Innovation auszuschöpfen. Es gibt dementsprechend einen Bedarf, diese in der UX-Forschung verwendeten Methoden und Vorgehensweisen auch für KMU zugänglich zu machen, damit diese Aspekte der UX bei der User-driven Innovation berücksichtigen können.

## 2. Die Methode der UX Probes

Der vorliegende Beitrag beschreibt eine Methode der Nutzereinbindung, die User Experience (UX) Probes, mit deren Hilfe die Unternehmen Nutzer im Sinne der menschenzentrierten Gestaltung und User-Driven Innovation frühzeitig in den Innovationsprozess miteinbeziehen können, um Produkt- und Serviceideen mit hoher User Experience zu entwickeln und dadurch eine hohe Nutzerakzeptanz und ein hohes Erfolgspotenzial am Markt sicher zu stellen.

### 2.1. Nutzerstudien mit Probes

Zur Einbindung der Nutzer in der *Analysephase* kommen je nach Fragestellung verschiedene Nutzerforschungsmethoden zum Einsatz. Befragungsmethoden wie Interviews oder Fokusgruppen bieten die Möglichkeit einer punktuellen Anforderungserfassung. Beobachtungs-basierte Herangehensweisen wie die *Contextual Inquiry* ermöglichen es darüber hinaus, auch den Nutzungskontext für einige Stunden kennenzulernen. Neben diesen punktuellen Informationen ist es häufig relevant, Nutzer und Nutzungskontext über einen gewissen Zeitraum zu untersuchen. Solche Langzeit-Nutzerstudien geben einen breiten Einblick

in den Nutzungskontext und ermöglichen es, auch Änderungen in Routinen oder Einstellungen der Nutzer sowie variable Kontextfaktoren zu erfassen. Darüber hinaus ist eine Langzeit-Nutzerstudie besser für die Identifikation von Erlebnispotenzialen geeignet als punktuelle Methoden. Da sich diese nicht gezielt abrufen lassen, steigt mit der Länge des Zeitraums der Studie die Chance, Erlebnispotenziale zu identifizieren. Langzeitstudien kommt daher bei UX-bezogenen User-driven Innovation eine besondere Relevanz zu.

Als geeignete Methoden für Langzeit-Nutzerstudien haben sich neben Tagebuchstudien, bei denen die Teilnehmenden jeden Tag etwas über ihren Tag notieren, die *Cultural Probes* herauskristallisiert (Boehner et al. 2007, Gaver et al. 2004, Gaver et al. 1999). Hierbei wird den Nutzern ein Paket mit verschiedenen Materialien (z.B. Fotokamera, Tagebuch, Postkarten) übergeben, mit deren Hilfe sie ihren Alltag dokumentieren sollen. Cultural Probes haben sich als interessante Methode erwiesen, um das kreative Potenzial der Nutzer anzusprechen und gleichermaßen Informationen über sie selbst sowie ihr alltägliches Umfeld einzuholen. Allerdings bieten die Cultural Probes keinen strukturellen Rahmen für die Durchführung der Nutzerstudie. Vielmehr basieren sie auf der Idee, das Untersuchungsformat möglichst frei zu gestalten und weder konkrete Leitfäden für die Studienleiter noch spezifische Aufgaben für die Teilnehmenden vorzugeben. Dadurch sind sie für Entwicklungsteams mit geringer Erfahrung in der Nutzerforschung nur bedingt einsetzbar. Aus diesem Grund haben wir eine Abwandlung, die *UX Probes*, entwickelt. Diese legen den Fokus zusätzlich auf die Bedürfnisse und Werte der Nutzer.

Die UX Probes machen den Ansatz der Cultural Probes Entwicklungsteams, die in der Nutzerforschung bislang wenig Erfahrung haben, zugänglich und führen die Ergebnisse strukturiert dem Gestaltungsprozess zu. Der Ansatz der UX Probes stellt dazu kreative Aufgaben zu einem spezifischen Thema und einen dramaturgischen Aufbau zur Durchführung einer einwöchigen Nutzerstudie mit ausgewählten Materialien bereit. Wichtig ist hierbei, den Nutzer zu befähigen, seine eigene Sicht auf das Thema zu reflektieren und das Thema im Zusammenhang mit seinem (sozialen) Kontext zu explorieren. Dadurch soll ein möglichst umfassendes Bild von Nutzer und Kontext entstehen, das als Inspirationsquelle für die Entwicklung innovativer Produkt- und Serviceideen dient.

## 2.2. Wissenschaftliches Fundament

Der Entwicklung der UX Probes liegt der Innovationsansatz Building Ideas (Krüger et al. 2016) zu Grunde, der Methoden aus *UX Design*, *Design Thinking* und *Lego® Serious Play®* kombiniert, um eine kreative, aber gleichzeitig strukturierte Einbeziehung des Nutzers in den Gestaltungsprozess zu ermöglichen.

Wie bereits zuvor erwähnt, fokussiert das *UX Design* auf positive Erlebnisse während der Produktnutzung und legt diesen die Befriedigung menschlicher Grundbedürfnisse zu Grunde. Diese Aspekte werden in die Konzeption der UX Probes übernommen, deren Ziel es ist, Potenziale für positive Erlebnisse und die damit verbundenen Erlebnisse zu eruieren.

Die Art der Aufgabenkonzeption und die Arbeitsweise der Teilnehmenden orientiert sich dabei an Prinzipien aus dem *Design Thinking* (Kelley/Kelley 2013, Plattner et al. 2009). Insbesondere wird durch die gewählten Materialien und Aufgabenstellung eine kreative, explorative Arbeitsweise gefördert, bei der die Ideenvisualisierung durch die Teilnehmenden ein bedeutender Punkt ist.

Dies wird durch die Integration von Aspekten aus der Methodik *Lego® Serious Play®* (Kristiansen/Rasmussen, 2014) unterstützt. Die Verwendung von *Lego®*-Steinen erleichtert den Teilnehmenden zum einen die Visualisierung. Zum anderen hilft die Darstellung in Form von Metaphern ihnen, sich mit dem Thema auf einer tieferen Ebene auseinanderzusetzen. Beim Bauen mit *Lego®*-Steinen „denken die Teilnehmenden darüber hinaus buchstäblich mit den Händen“, da durch sensorische Stimulation an den Händen auch im Gehirn bestimmte Denkprozesse angestoßen werden (Gauntlett 2007, Kristiansen/Rasmussen 2014). dient.

## 2.3. Methodisches Vorgehen und Ablauf

Die einwöchige Nutzerstudie mit UX Probes gliedert sich in drei Teile:

- Einführungsworkshop (Aufgabeninstruktion),
- Praxisteil (Durchführung der Aufgaben) und
- Abschlussworkshop (Nachbesprechung und Erweiterung der Aufgaben).

Während des Praxisteils bearbeiten die teilnehmenden Nutzer jeweils täglich eine Wochenaufgabe (identisch über alle Tage hinweg) und eine Tagesaufgabe zu einem bestimmten Thema. Die Reihenfolge der Tages-

aufgaben folgt einer festgelegten Dramaturgie (siehe Tabelle 1), mit deren Hilfe der Teilnehmende verschiedene Aspekte des Themas gezielt aus der eigenen und der Sicht anderer beteiligter Akteure beleuchtet. Die Ergebnisse werden in Form einer Bild- oder Videodatei täglich über einen Online-Chat an die Studienleitung übermittelt und von dieser dokumentiert und aufbereitet. Durch dieses Vorgehen ist gewährleistet, dass die Teilnehmenden die Aufgaben analog bearbeiten und die Ergebnisse der Studienleitung auf dem digitalen Kommunikationsweg zeitnah zur Verfügung gestellt werden.

#### 2.4. Material

Für die Kommunikation mit der Studienleitung und Dokumentation der Zwischenergebnisse benötigen die Teilnehmenden ein Smartphone mit Kamerafunktion. Darüber hinaus erhalten sie für die Aufgabenbearbeitung ein Materialset (siehe Abbildung 2). Das Materialset beinhaltet Karten mit der Aufgabenstellung für die Wochenaufgabe und die Tagesaufgaben, Lego® SeriousPlay®-Sets in zwei verschiedenen Größen für Einzel- und Gruppenaufgaben und bei Bedarf Papiervorlagen für die Fragestellungen, die nicht mit Lego®-Steinen bearbeitet werden. Letztere müssen je nach Thema entsprechend angepasst werden.



Abbildung 2: Beispielhafte Übersicht über das Materialset für eine Gruppe Teilnehmender bei einer UX Probes Studie.

<b>Phase</b>	<b>Ziel</b>	<b>Methodik</b>
I. Wochen- aufgabe	Tägliche Aufgabe zur Dokumentation themenrelevanter Verhaltensweisen.	Wochenaufgaben-Temp-late
II. Warm-up	Schaffung einer angenehmen, ungezwungenen und kreativen Arbeitsatmosphäre; Vorbereitung auf das Themengebiet; Identifizierung erster Ansätze für positive Erlebnisse.	Snapshots: Fotografieren von themenrelevanten Objekten und positiven Erlebnissen.
III. Status quo	Einzelaufgabe mit dem Ziel, dass sich jede teilnehmende Person tiefer in das Thema einarbeitet und der Status quo (das aktuelle eigene Verhalten) als Ausgangspunkt für die weitere Bearbeitung des Themas transparent wird.	Status quo-Template: Notation wichtiger Ereignisse zum Thema anhand einer Vorlage und mit verschiedenen Materialien auf Papier.
IV. Selbstreflexion	Reflektierende, bewertende Auseinandersetzung mit der eigenen Sicht auf das Thema.	Darstellung der eigenen Sicht auf das Thema durch Bauen eines Modells mit Lego®-Steinen.
V. Fremdre- flexion	Reflektierende, bewertende Auseinandersetzung mit der Sicht anderer Personen im sozialen Umfeld auf das Thema; Erweiterung der eigenen Perspektive auf das Thema.	Darstellung der wahrgenommenen Sicht anderer Personen auf das Thema durch Bauen eines Modells mit Lego®-Steinen.
VI. Hypo- these: po- sitive Er- lebnisse	Ermittlung relevanter Bedürfnisse und Potenziale für zusätzliche positive Erlebnisse.	Vorstellung und Beschreibung einer hypothetischen Situation oder Vision, die positive Aspekte des Themas beinhaltet.
VII. Perspek- tivüber- nahme	Erleben des Themas aus der Perspektive einer anderen Person im sozialen Umfeld.	Vorstellung und Beschreibung/Skizzierung eines hypothetischen positiven Erlebnisses aus Sicht der anderen Person.
VII. Ab- schluss- befragung	Abschließende Fragen zu dem Thema.	Erhebung auf Fragebogenbasis.

Tabelle 1: Ablauf des Praxisteils.

## 2.5. Auswahl der Teilnehmenden

UX Probes sollten mit sechs bis 12 Teilnehmenden durchgeführt werden. Diese Größe stellt eine ausreichende Heterogenität der Stichprobe bei annehmbarem Aufwand sicher. Idealerweise sollten mehrere Personen aus einem Personenkreis (z.B. Familie oder Abteilung) rekrutiert werden, um den Mehrwert der Fremdrelexion voll auszuschöpfen. Bei Themen mit speziellen Anforderungen bietet sich zur Auswahl geeigneter Teilnehmender eine Vorbefragung an.

## 2.6. Integration in den Innovationsprozess

Die UX Probes bilden die Basis für den weiteren Innovationsprozess (Abbildung 3). Nach Abschluss der Studie werden die dokumentierten und aufbereiteten Ergebnisse dem Entwicklungsteam in einem Ideenfindungs-Workshop als Innovationsquelle präsentiert.

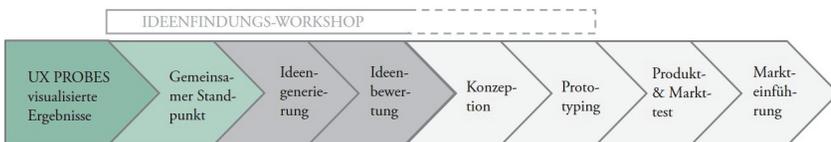


Abbildung 3: User-driven Innovation – der Innovationsprozess basierend auf den UX Probes. Der Ideenfindungs-Workshop umfasst zwingend die Phasen „Gemeinsamer Standpunkt“, „Ideengenerierung“ und „Ideenbewertung“. Die weiteren Phasen sind optional.

In dem Workshop werden mindestens die Schritte „Ideengenerierung“ und „Ideenbewertung“ bearbeitet. Dem wird ein zusätzlicher Schritt vorangestellt, bei dem das Entwicklungsteam auf Basis der Ergebnisse einen gemeinsamen Standpunkt definiert. Eine erste Konzeption und Umsetzung in Form von Prototypen im Rahmen des Workshops ist möglich, aber nicht zwingend erforderlich.

Für den Ideenfindungs-Workshop sollten die Ergebnisse durch den Studienleiter noch während der Studie nach Person oder Personenkreis geordnet und visuell aufbereitet werden, zum Beispiel in Form von Postern oder einer Präsentation, um die Ergebnisse möglichst anschaulich an das Entwicklungsteam zu kommunizieren. Für die Präsentation der Ergebnisse empfiehlt sich die Methode des aktiven Zuhörens (Plattner 2010). Dies bedeutet, dass die Zuhörer während der Präsentation der Ergebnisse durch den Studienleiter sich die wichtigsten Aspekte auf Post-Its mitschreiben. Diese Notizen werden anschließend zusammengeführt und geclustert. Auf Grundlage dieser Themencluster, welche die

hauptsächlichen Insights der UX Probes zusammenführen, eine effiziente Ideenfindung durchgeführt werden, die Bedarf und Bedürfnisse der Nutzer in den Fokus stellt.

Die Ideengenerierung erfolgt in Form eines *Brainstormings*, bei dem zunächst jedes Teammitglied für sich selbst Produkt- und/oder Serviceideen nacheinander für jedes Themencluster generiert. Die Ideen werden dann an eine Wand gebracht und dort wiederum geclustert. Es folgt die Bewertung der Ideen, anhand derer die vielversprechendsten Ideen ausgewählt werden. Bei der Bewertung sollten die Faktoren Nutzerakzeptanz, Wirtschaftlichkeit, technische Realisierbarkeit und Marktchancen Berücksichtigung finden. Je nach Umfang der Ideen und das Themas können dazu verschiedene Bewertungsverfahren herangezogen werden, zum Beispiel eine gewichtete Matrix oder die Value Opportunity Analysis (Hanington/Martin, 2012).

### 3. UX Probes in der Praxis

Der UX Probes-Ansatz wurde in der Praxis gemeinsam mit Unternehmen zur Entwicklung innovativer digitaler Produkt- und Serviceideen in unterschiedlichen Themenfeldern eingesetzt und iterativ erweitert. In den folgenden Kapiteln werden zwei Praxisbeispiele näher erläutert, um die konkrete Anwendung der UX Probes zu verdeutlichen. Beide Nutzerstudien wurden mit jeweils drei Familien durchgeführt. Kinder im Alter von unter zwölf Jahren erhielten dabei etwas abgewandelte, kindgerechte Aufgaben. Es werden exemplarisch nur die Aufgaben für die älteren Familienmitglieder im Detail beschrieben, da diese besser auf andere Kontexte übertragbar sind, in denen ausschließlich mit erwachsenen Teilnehmenden gearbeitet wird.

#### 3.1. Praxisbeispiel: Digitales Produkt zur Stärkung des familiären Zusammenhalts

Ziel des Projekts war es gemeinsam mit Nutzern Potenziale zu identifizieren, um das Familienleben durch neue digitale Produkte oder Services zu bereichern. Dazu erhielt jedes Familienmitglied die Wochenaufgabe, die fünf wichtigsten Erlebnisse eines jeden Tages auf einer Familienwand zu markieren (Abbildung 4A). So ergab sich ein umfassendes Bild über Familienaktivitäten und die bisherige Nutzung digitaler Angebote. Der Ablauf und die konkreten Tagesaufgaben sind in Tabelle 2 dargestellt. Nach der einwöchigen Nutzerstudie wurde der Abschlussworkshop für jede Familie separat durchgeführt. Dieser fand jeweils in den Wohnungen der Familien statt. So hatte die Studienleitung die Mög-

lichkeit, den Nutzungskontext noch besser zu verstehen. Ziel des Workshops war es in erster Linie, die erarbeiteten Ergebnisse gemeinsam zu diskutieren und so ein noch tieferes Verständnis von Nutzer und Nutzungskontext zu erlangen. Im Anschluss wurde im Entwicklungsteam ein Ideenfindungs-Workshop gemäß der Beschreibung in Kapitel 3.6. durchgeführt, bei dem die Ergebnisse der UX Probes interpretiert und in innovative Produktideen überführt wurden.

<b>Phase</b>	<b>Aufgabenstellung</b>
I. Wochenaufgabe	Zeichnet den Grundriss eurer Wohnung. Notiert jeden Tag eure jeweils 5 wichtigsten Erlebnisse und charakterisiert sie mit den Stickern (Art des Erlebnisses, beteiligte Person, Rolle von technischen Geräten/digitalen Produkten). (Material: Grundriss-Templates, Stifte, Sticker)
II. Warm-up	Fotografiere: Den ersten (und den letzten) Menschen, den du heute siehst; Dein liebstes technisches Gerät; Lieblingsort; Deinen schönsten Moment. (Material: (Handy-)Kamera)
III. Status quo	„Wie digital ist Dein Tag?“ Verfolge deine Nutzung digitaler Geräte im Tagesverlauf anhand des Zeitstrahls nach. (Material: Zeitstrahl-Template)
IV. Selbstreflexion	„Welche Rolle spielt Technik in deinem Leben?“ Baue ein Lego®-Modells. (Material: Lego®-Set)
V. Fremdrelexion	„Wie gehen die anderen Familienmitglieder mit Technik um?“ Baue ein Lego®-Modells. (Material: Lego®-Set)
VI. Hypothese: positive Erlebnisse	Schreibe eine Geschichte wie ihr gemeinsam mit der Familie eine Exkursion unternimmt.
VII. Perspektivübernahme	„Wenn du wieder Kind wärst - wie sähe dein Kinderzimmer aus?“. Zeichne dein Wunschkindzimmer.
VIII. Abschlussbefragung	Fragebogen zur generellen Einstellung zu digitalen Produkten sowie Regeln und Rollen innerhalb der Familie.

Tabelle 2: Ablauf und Aufgabenstellung der UX Probes zum Thema „Digitales Produkt zur Stärkung des familiären Zusammenhalts“.

### 3.2. Praxisbeispiel: Bank der Zukunft

Zeitlich nach der zuvor beschriebenen Nutzerstudie wurde eine weitere Studie mit dem Ziel durchgeführt, gemeinsam mit Nutzern innovative Produkt- und Serviceangebote für die Bank der Zukunft zu entwickeln. Der Ablauf der UX Probes erfolgte im Wesentlichen analog zu der ersten Studie. Als Wochenaufgabe erhielten die Teilnehmenden den Auftrag, ihre täglichen Einnahmen und Ausgaben auf einer persönlichen Vorlage zu notieren und zu charakterisieren (Abbildung 4B). Tabelle 3 zeigt den Ablauf der UX Probes.

<b>Phase</b>	<b>Aufgabenstellung</b>
I. Wochenaufgabe	Notiert auf eurer persönlichen Vorlage täglich eure Einnahmen und Ausgaben und charakterisiert sie mit den Stickern. (Material: Einnahmen/Ausgaben-Template, Sticker)
II. Warm-up	Fotografiere: Jeweils einen Menschen und einen Gegenstand, der dir viel wert ist; deinen schönsten Moment. (Material: (Handy-)Kamera)
III. Status quo	„Wie wichtig ist Geld für mich?“ Verfolge mit Hilfe des Zeitstrahls nach, wie oft du heute an Geld gedacht hast. (Material: Zeitstrahl-Template).
IV. Selbstreflexion	„Welche Rolle spielt Geld in deinem Leben?“ Baue ein Lego®-Modells. (Material: Lego®-Set)
V. Fremdreflexion	„Wie gehen die anderen Familienmitglieder mit Geld um?“ Baue ein Lego®-Modell. (Material: Lego®-Set; vergleiche Abbildung 4C)
VI. Hypothese: positive Erlebnisse	„Stellt euch vor, ihr habt im Lotto gewonnen. Welche Wünsche würdet ihr euch (jeder für sich und gemeinsam) erfüllen?“ Malt eure Wünsche auf. (Stifte, Papier)
VII. Perspektivübernahme	„Wenn du wieder Kind wärst- wofür würdest du sparen und wie?“ Skizziere deine Ideen. (Stifte, Papier)
VII. Abschlussbefragung	Fragebogen zur generellen Einstellung gegenüber digitalen Bankangeboten und Thematisierung von Finanzthemen innerhalb der Familie.

Tabelle 3: Ablauf und Aufgabenstellung der UX Probes zum Thema „Bank der Zukunft“.

Das Format des Abschlussworkshops wurde auf Basis des Feedbacks der Teilnehmenden der vorhergehenden Studie etwas abgeändert. Die Teilnehmenden hatten angegeben, dass sie einen Austausch mit den ande-

ren Familien am Ende der Studie wünschenswert fänden. Dementsprechend wurde der Abschlussworkshop mit dem Ideenfindungs-Workshop zusammengeführt und in diesem Projekt als partizipativer Workshop mit allen Teilnehmenden konzipiert, bei dem alle aufbauend auf den Ergebnissen der UX Probes gemeinsam Produkt-/ Serviceideen entwickeln sollten. So konnten zum einen die Ergebnisse für die Teilnehmenden sichtbar zusammengeführt und zum anderen der Anteil der User-driven Innovation verstärkt werden. Für das Entwicklungsteam fallen die Phasen „Gemeinsamer Standpunkt“ und „Ideengenerierung“ weg, da diese durch die Nutzer selbst durchgeführt werden. Das Entwicklungsteam nahm im Anschluss die Bewertung der Ideen vor und erweiterte diese nach eigenen Vorstellungen. Die UX Probes dienen bei diesem Projektbeispiel im Vergleich zum ersten Projekt folglich eher dazu, die Teilnehmenden für das Thema „Bank der Zukunft“ zu sensibilisieren und dieses intensiv zu reflektieren, sodass sie im Anschluss ihr volles Innovationspotenzial in die Ideengenerierung einfließen lassen können.

In einer schriftlichen Nachbefragung unter den erwachsenen Teilnehmenden (n=8) zeigte sich, dass die UX Probes positiv erlebt wurden. Auf einer Skala von 0 (trifft gar nicht zu) bis 3 (trifft voll zu) gaben die Teilnehmenden an, dass die Aufgaben verständlich formuliert waren (Median=3), sie Freude an der Bearbeitung hatten (Median=2,5) und die Aufgaben sie zur Reflexion über das Thema angeregt haben (Median=2).



Abbildung 4: Beispielhafte Darstellung dreier Aufgaben: (A) Wochenaufgabe aus Praxisbeispiel 1: Familienwand einer Familie für einen Wochentag, (B) Wochenaufgabe aus Praxisbeispiel 2: Einnahmen/Ausgaben-Template von einem Tag, (C) Lego®-Modell aus Praxisbeispiel 2 (Phase VI).

#### 4. Diskussion und Ausblick

Bei der Durchführung der beschriebenen Praxisbeispiele hat sich gezeigt, dass die *UX Probes* einen strukturierten Rahmen bieten, um Langzeitnutzerstudien zu verschiedenen Themen durchzuführen. Durch die Gestaltung der Aufgaben können das kreative Potenzial der Nutzer gezielt angesprochen, ihre Anforderungen erhoben und dadurch ein detailliertes Verständnis von Nutzer und Nutzungskontext im Entwicklungsteam gefördert und der Ideenfindungsphase im Innovationsprozess zugeführt werden. Der partizipative Workshop im zweiten Projektbeispiel lieferte bereits konkrete Ideen der Teilnehmenden, die zum Teil so übernommen werden konnten.

Die Anwendung der Methode in der Praxis hat aber auch gezeigt, dass die Vorbereitung der *UX Probes* etwas aufwendiger ist als die von *Cultural Probes*, da konkrete Aufgaben und gegebenenfalls passende Materialien entwickelt werden müssen. Bei *Cultural Probes* müssen die verwendeten Materialien hingegen nicht themenspezifisch angepasst werden. Die Erkenntnisse der *UX Probes* sind somit aufgrund der Themenfokussierung besser nutzbar und lassen sich durch die vorgegebene Struktur einfach auf neue Themenstellungen anpassen und unmittelbar in den Innovationsprozess integrieren. Die Begleitung der Teilnehmenden über eine Woche hinweg fördert zudem ein tiefes und detailliertes Verständnis der Nutzer bei der Ideengenerierung für neue Produkte und Services.

Allerdings wurde die Durchführung der *UX Probes* in den beschriebenen Beispielen durch erfahrene UX-Experten angeleitet. Während die Methode sich als geeignet erwiesen hat, um nutzerzentrierte Innovationsprozesse in Unternehmen anzustoßen und das Potenzial hat, das Entwicklungsteam zu einer Vielzahl neuartiger Ideen für digitale Produkte und Services anzuregen, erscheint es momentan eher schwierig für KMU, die Methode komplett eigenständig durchzuführen. Um die Methodik für Entwicklungsteams mit wenig Erfahrung in der menschenzentrierten Gestaltung nutzbar zu machen, sollen in Zukunft zudem Richtlinien zur Generierung der Aufgaben und zur Aufbereitung der Ergebnisse für den Ideenfindungs-Workshop entwickelt werden.

## Literatur

- Beck, K., Beedle, M., Van Bennekum, A., Cockburn, A., Cunningham, W., Fowler, M., ... & Kern, J. (2001). Manifesto for agile software development. Online verfügbar unter: <https://agilemanifesto.org/>, zuletzt geprüft am 05.08.2018.
- Boehner, K., Vertesi, J., Sengers, P., Dourish, P. (2007). How HCI interprets the probes. In Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, ACM, S. 1077-1086.
- Ferreira, B., Silva, W., Oliveira, E., Conte, T. (2015). Designing Personas with Empathy Map. In International Conferences on Software Engineering and Knowledge Engineering, The 27th International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering (S. 501–505). KSI Research Inc. and Knowledge Systems Institute Graduate School.
- Fronemann, N., Peissner, M. (2014). User Experience Concept Exploration: User Needs as a Source for Innovation. In: V. Roto (Hrsg.): Proceedings of the 8th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: fun, fast, foundational. Helsinki, Finland - October 26 - 30, 2014 (S. 727–736). New York, NY: ACM.
- Gauntlett, D. (2007). Creative explorations: New approaches to identities and audiences. London: Routledge.
- Gaver, B., Dunne, T., Pacenti, E. (1999). Design: Cultural probes. Interactions, Vol. 6 (1), S. 21–29.
- Gaver, W. W., Boucher, A., Pennington, S., Walker, B. (2004). Cultural Probes and the Value of Uncertainty. Interactions, Vol. 11 (5).
- Hanington, B., Martin, B. (2012). Universal Methods of Design: 100 ways to research complex problems, develop innovative ideas & Design effective solutions. Beverly, MA: Rockport.
- Hassenzahl, M., Diefenbach, S., Göritz, A. (2010). Needs, affect, and interactive products – Facets of user experience. Interacting with Computers, Vol. 22 (5), S. 353–362.
- Kahneman, D. (1999). Objective Happiness. In Well-being. The foundations of hedonic psychology (S. 3–25).
- Kelley, T., Kelley, D. (2013). Creative Confidence: Unleashing the creative potential within us all. London, UK: William Collins.
- Kristiansen, P., Rasmussen, R. (2014). Building a better business using the Lego serious play me. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons.
- Krüger, A. E., Peissner, M., Fronemann, N., Pollmann, K. (2016). Building Ideas. In: S. Björk und E. Eriksson (Hrsg.): Proceedings of the 9th Nordic Conference on Human-Computer Interaction (S. 1–6). New York, NY: ACM.
- Plattner, H., Meinel, C., Weinberg, U. (2009). Design Thinking-Innovationen lernen-Ideenwelten öffnen: München, FinanzBuch Verlag.

- Plattner, H. (2010). Bootcamp bootleg. Design School Stanford, Palo Alto.
- Rosted, J. (2005). User-driven innovation: Results and recommendations ( No. # 13). The Ministry of Economic and Business Affairs' Division for Research and Analysis FORA.
- Sheldon, K. M., Kim, Y., Elliot, A. J., Kasser, T. (2001). What Is Satisfying About Satisfying Events? Testing 10 Candidate Psychological Needs. *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol. 80 (2), S. 325–339.
- Spath, D., Peissner, M., Sproll, S. (2010). Methods from Neuroscience for Measuring User Experience in Work Environments. In *Proceedings of the International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE '10)*.
- Stickel, O., Ogonowski, C., Jakobi, T., Stevens, G., Pipek, V., Wulf, V. (2015). Praktiken der Nutzerintegration im Entwicklungsprozess von KMU. In *Mensch und Computer 2015–Proceedings*.



# Zustandsüberwachungssysteme zur Entscheidungsunterstützung in der Produktionsplanung

Einsatz von Zustandsüberwachungssystemen zur Entscheidungsunterstützung in der Produktionsplanung der variantenreichen Fertigung

Matthias Karner<sup>1</sup>, Wilfried Sihn<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer Austria Research GmbH; <sup>2</sup>Institute of Management Science, Technische Universität Wien

*Digitalisierung ist in den letzten Jahren zu einem omnipräsenten Thema herangewachsen – Daten werden in den unterschiedlichsten Ausprägungen generiert, verarbeitet und genutzt. Befähigt durch das historische Kostenminimum für Sensorik und dem exponentiellen Anstieg der Prozessorleistung der letzten Dekaden, ist Datenanalyse im großen Stil ökonomisch rentabel geworden (vgl. Wuest et al. 2016). Auch industrielle Produktionsunternehmen beginnen vermehrt mit der systematischen Verarbeitung von Daten. Denn speziell der Preisverfall von Messelektronik und Rechenleistung ermöglichen es, auch mit geringen (Sach-) Investitionen die Produktion ans „Internet der Dinge“ anzubinden. Dabei fehlt es jedoch oft an geeigneten Methoden, wie diese Digitalisierungstechnologien in die Produktionssysteme integriert werden können (technisch und organisatorisch). Hinzukommt, dass Gesamtlösungen momentan noch kostspielig und dadurch meist unerschwinglich für klein- und mittelständische Unternehmen (KMUs) sind. Neben der Digitalisierung kann auch die Produktindividualisierung als ein aktueller Megatrend betrachtet werden (vgl. Fitouri et al. 2016). In der metallverarbeitenden Industrie, beispielsweise, bedeutet eine hohe Anzahl an Produktvarianten eine Vielzahl an verschiedenen Anforderungsprofilen an die Bearbeitungsmaschinen – eine Komplexität, die rein manuell nur schwierig zu bewältigen ist.*

## 1. Einleitung

Im Rahmen des vorliegenden Beitrages wird eine Methode vorgestellt, die die beiden Trends Digitalisierung und Produktindividualisierung aufgreift und kombiniert betrachtet. Dabei wird eine anwendungsfall-spezifische Auswahl von Zustandsüberwachungssystemen, sowie deren Integration, in Form eines Entscheidungsunterstützungssystems in der variantenreichen Produktion thematisiert. Ausgangspunkt bildet ein bidirektionaler Zusammenhang zwischen Maschinenzustand und Produktionsprogramm: Während gewisse Produkte hohe Anforderungen (z.B. geringes Toleranzniveau) an die Werkzeug- bzw. Maschinenzustände ihrer Bearbeitungsanlagen bedingen (Mindestzustand), sind andere Produktgruppen unkritischer (vgl. Bhuiyan/Choudhury 2014). Auch der Verschleiß der Maschinenkomponenten bzw. -werkzeuge variiert je nach Anlagentyp und Produktionsprogramm (z.B. erhöhter Verschleiß durch zähe Werkstoffe) (vgl. Cooper 2017).

Dieser bidirektionale Zusammenhang zwischen Maschinenzustand und Produktionsprogramm reduziert folglich die Anzahl an Möglichkeiten, in welcher Reihenfolge eine Reihe an Produktionsaufträgen produziert werden kann. Diese Reihenfolgeplanung wird oft direkt von den Maschinenführern am Shopfloor durchgeführt,<sup>1</sup> wobei die Maschinenzustände abgeschätzt<sup>2</sup> und die Korrelationen implizit berücksichtigt werden. Dies hat jedoch den Nachteil, dass Einschätzungen von Maschinenzuständen und Produktanforderungen subjektiv bleiben, was bei einer Falscheinschätzung zu Nacharbeit oder Ausschuss führt. Um die Bewertung der Maschinenzustände zu objektivieren, werden Zustandsüberwachungsbzw. Condition Monitoring (CM) Systeme eingesetzt. Online CM Systeme generieren laufend Echtzeitdaten und ermöglichen eine kontinuierliche Bewertung der Zustände einzelner Maschinenkomponenten.

Die propagierte Methode (vgl. auch Glawar et al. 2018 und Karner et al. 2018) kombiniert diese Informationen der objektiven Zustandsbewertung mit einer Kategorisierung der Produkte hinsichtlich ihrer spezifischen Anforderungsprofile (Mindestzustände) und Verschleißeffekte, wozu eine aus dem Paradigma der Gamification stammende Klassifizierung anhand von „Healthpoints“ erfolgt. Dadurch entsteht eine objektive Entscheidungsgrundlage zur Beantwortung der Frage, ob ein Produkt im aktuellen Maschinenzustand gefertigt werden kann oder nicht (bzw. ob zunächst Instandhaltungsmaßnahmen erforderlich sind).

---

<sup>1</sup> Dies ist häufig bei klein- und mittelständischen Unternehmen der Fall.

<sup>2</sup> Speziell erfahrene Mitarbeiter können aufgrund dynamischem Maschinenverhaltens (z.B. Geräusche) auf den Zustand der Maschine rückschließen.

Der Rest des vorliegenden Beitrages ist wie folgt strukturiert: In Abschnitt 2 erfolgt ein kurzer Literaturüberblick, in dem die anwendungsfallspezifische Auswahl von Zustandsüberwachungssystemen thematisiert wird. Darauf aufbauend wird die Modellierung einer Werkzeug- und Maschinenzustandsabhängigkeit in Abschnitt 3 anhand einer Produktklassifizierung thematisiert. Die Beschreibung der Nutzung der Produktklassifizierung als Entscheidungsunterstützungssystem erfolgt anschließend in Abschnitt 4, ehe in Abschnitt 5 eine Conclusio gezogen wird.

## 2. Literaturüberblick Condition Monitoring

Unter Condition Monitoring (CM) wird im Allgemeinen der Prozess verstanden, den Zustand einer (Maschinen-) Komponente durch eine Kombination aus Sensorsignalen und Auswertungssoftware zu ermitteln. Zustände sind dabei nicht binär (funktionsfähig oder nicht funktionsfähig), sondern kontinuierlich. Sie sind am Beginn der Lebensdauer einer Komponente am höchsten (noch keine Abnutzung), degradieren aber mit zunehmender Einsatzzeit. Am Ende der Lebensdauer ist ein Komponentenzustand erreicht, der bestimmte Qualitätsstandards nicht mehr erfüllen kann. Infolgedessen muss die Komponente durch Instandhaltung ausgetauscht, gewartet, oder repariert werden.

Das Thema Condition Monitoring wurde bereits in den 1980ern thematisiert, jedoch mit mäßigem Erfolg, da die Preise für Sensorik schlicht zu hoch für einen wirtschaftlichen Einsatz von Condition Monitoring Systemen waren (vgl. Martin 1994). Mit dem technischen Fortschritt der letzten Dekaden und dem Aufkommen von Begriffen wie Industrie 4.0, smarte Fabrik oder prädiktive und präskriptive Instandhaltung, ist CM wieder populär geworden (vgl. Matyas et al. 2017; Delgado-Arredondo et al. 2017; Glawar et al. 2016). CM bildet dabei in vielen Fällen den Ausgangspunkt für die Anwendung weiterer Digitalisierungsparadigmen. Wie Moeuf et al. (2017) in ihrer Arbeit hervorheben, setzen klein- und mittelständische Unternehmen (KMU) in ihren Digitalisierungsstrategien speziell auf diese initialen Technologien, während revolutionäre Themen, wie Maschine-Maschine Kommunikation oder Big Data Analysen, seltener angewendet werden.

Waren Zustandsüberwachungssysteme anfangs noch externe Messgeräte, die nur für bestimmte Zeiträume Daten aufzeichneten, so werden mittlerweile digitale, online Condition Monitoring Systeme verwendet, die kontinuierlich Daten über Maschinen- und Werkzeugzustände gene-

rieren. Als zentraler Befähiger dafür gelten gesunkene Preise für Messelektronik und Datenspeicherung (vgl. Wuest et al. 2016; Honrubia 2017). Die niedrigen Sensorpreise ermöglichen so, zum Beispiel, ein wirtschaftliches Retrofitting von bestehenden Maschinen mit moderner Sensorik. Davon profitieren speziell KMUs, für welche hochpreisige Technologien (die nicht auf die Bedürfnisse der KMUs zugeschnitten sind) oft ein Hindernis darstellen (vgl. Meißner et al. 2017).

Häufig werden zur Zustandsüberwachung Beschleunigungs- bzw. Schwingungssensoren eingesetzt, da gesteigerte Vibrationen eine oftmals Begleiterscheinung von Anlagenverschleiß sind, wie es z.B. Nandi et al. (2005) in ihrer renommierten Arbeit für Elektromotoren ableiten. Neben den angewendeten Schwingungssensoren existiert eine große Bandbreite an anderer Messelektronik, die sich für Zustandsüberwachung eignet (z.B. Messung von Druck, Kraft, Temperatur, Drehzahl etc.<sup>3</sup>). Sensoren erfassen die Signale und wandeln diese (z.B. mittels einer Messbrückenschaltung) in analoge Strom- bzw. Spannungssignale um. Die kontinuierlichen Signale werden von einer Messelektronik erfasst und mit einer definierten Abtastrate diskretisiert (gesampelt). Durch die Diskretisierung entstehen aus den rohen Sensorsignalen analysierbare Daten. Die Analysen können dabei im Zeitbereich (statistische Analyse von z.B. Mittel- und Maximalwerten), oder im Frequenzbereich (z.B. Fast-Fourier-Transformation, FFT) erfolgen (Lee et al. 2014). Die populärsten Formen von Condition Monitoring sind Schwingungsanalysen mit einer Analyse des Frequenzspektrums (d.h. Analyse im Frequenzbereich).

Die Autoren Delgado-Arredondo et al. (2017) präsentieren beispielsweise eine Methodologie zur Fehlererkennung in Elektromotoren, basierend auf einer Kombination aus Schwingungs- und Schallanalyse. Dass die Auswertesoftware eine zentrale Rolle spielt, beweisen Dimla und Lister in ihren beiden Arbeiten, wo sie auf maschinelles Lernen (Multilayer-Perceptron) für die Datenauswertung setzen (Dimla/Lister 2000a, 2000b). Die Autoren Wang et al. (2016) analysieren die Spektalkurtosis (Wölbung der Frequenzspektren) von Schwingungsaufzeichnungen. Neben der Schwingungsanalyse ist auch die Motorstromsignalanalyse (MCSA) weit verbreitet (vgl. Benbouzid 2000). Dabei wird der Motorstrom gemessen und die Signale in den Frequenzbereich transformiert, um Fehler in Stator und Rotor zu erkennen, oder um den Verschleiß in den Lagern zu bewerten (Nandi et al. 2005; Irfan et al. 2017). Für einen detaillierteren Überblick über anwendbare Methoden

---

<sup>3</sup> Einen anschaulichen Überblick präsentiert Bernstein (2014) in seinem Buch zu Messelektronik und Sensoren.

des Condition Monitoring sei an dieser Stelle auf die Literaturzusammenfassungen von Jardine et al. (2006), Lee et al. (2014) und Yin et al. (2014) verwiesen.

### 3. Modellierung einer Werkzeug- und Maschinenzustandsabhängigkeit

Der vorangegangene Abschnitt hat gezeigt, dass mannigfaltige Möglichkeiten zur Erfassung von Maschinen- und Werkzeugzuständen existieren. Ansätze zur Integration der Zustandsinformationen in die Produktionsplanung hingegen sind rar. Recherchiert man nach Ansätzen, die Produktions- und Instandhaltungsplanung integrieren, so fokussiert die vorhandene Literatur vorwiegend die Produktionsplanung. Für die Modellierung der Instandhaltung bzw. der Maschinenzustände werden meist einfache (statische) Degradationsmodelle verwendet, wie z.B. die Autoren Salmasnia et al. (2018) hervorheben. Laut Rahmati et al. (2018, 5 ff.), wird in den meisten Fällen lediglich eine korrektive oder präventive Instandhaltungsstrategie modelliert, wohingegen zustandsbasierte Instandhaltungsstrategien in den seltensten Fällen im Kontext der Produktionsplanung berücksichtigt werden. Die Autoren Nourelfath et al. (2016), zum Beispiel, integrieren in ihrer Arbeit eine präventive Instandhaltungsstrategie in die Optimierung der Produktionsplanung, verwenden jedoch fixierte Parameter für die Modellierung - Echtzeitdaten aus Condition Monitoring Systemen werden nicht berücksichtigt. Ähnliches gilt für die aktuelleren Arbeiten von Rivera-Gómez et al. (2018a; 2018b), die in ihren Arbeiten einen produktionsgeschwindigkeitsabhängigen Verschleiß (historiendatenbasiert) modellieren. Auch Rostami et al. (2018) verwenden einen historiendatenbasierten Koeffizienten zur Verschleißmodellierung. Eine der wenigen Arbeiten, die echtzeitnahe Condition Monitoring Daten verwendet, stammt von Moghaddass und Ertekin, die einen semi Markov-Entscheidungsprozess zur Instandhaltungsoptimierung entwickeln (vgl. Moghaddass/Ertekin 2018).

Zur Erweiterung der vorhandenen Literatur hinsichtlich der Integration von Condition Monitoring Systemen und der Produktionsplanung wird in diesem Beitrag eine Möglichkeit zur Modellierung der Zustandsabhängigkeiten von Produkten vorgestellt. Ausgangspunkt bildet die bidirektionale Korrelation zwischen Werkzeug- und Maschinenzustand und Produktanforderungen:

(i) das Produktionsprogramm beeinflusst den Zustand des Produktionsmittels (im Speziellen den Verschleiß des Produktionswerkzeuges) und

(ii) die Fähigkeit eines Produktionsmittels einen bestimmten Produktionsauftrag zu fertigen wird bedingt durch dessen aktuellen Zustand und die Anforderungen, die der Produktionsauftrag mit sich bringt.

### 3.1. Healthpoints

Ein Zustand kann multidimensional und schwierig vorzustellen sein - speziell, wenn sich ein Zustand aus dynamischen Einzelmessungen zusammensetzt.<sup>4</sup> Zur Vereinfachung des komplexen Terms „Zustand“ wird die Bezeichnung Lebenspunkte bzw. „Healthpoints“ (HP) eingeführt, die den Zustand über eine einzelne Gleitkommazahl repräsentiert. Die Bezeichnung ist inspiriert von dem Paradigma der Gamification, die die Einbindung von videospieldbasierten Elementen in eine nichtspielerische Umgebung propagiert (vgl. Deterding et al. 2011). Durch die Verwendung von Lebenspunkten wird die Erklärung und Kommunikation des Zustandes vereinfacht - der Begriff wird intuitiv verständlich. Der Term HP basiert auf einem direkten Analogon aus der Welt der Videospiele, wo selbiger Begriff der Beschreibung des aktuellen Zustandes eines Avatars dient.<sup>5</sup> Im Spielverlauf reduzieren sich die HP durch bestimmte Tätigkeiten bzw. Belastungen wie zum Beispiel Bewegung oder Kampf. Der Spieler muss dafür sorgen, dass die HP immer über einem bestimmten Niveau bleiben, um eine Quest (einen Auftrag) erfolgreich abschließen zu können. Erreichen die HP ein kritisches Niveau, kann der Avatar einen Trank konsumieren, der dessen HP wieder erhöht - andernfalls endet die Quest vorzeitig mit einer Niederlage.

Analog dazu beschreiben die HP im Kontext der industriellen Produktion den Zustand einer Werkzeug- bzw. Maschinenkomponente. Diese ist während der laufenden Produktion Belastungen ausgesetzt, die zu

---

<sup>4</sup> Zum Beispiel kann die Information des Zustandes in manchen Fällen nur durch die vergleichende Betrachtung des Frequenzspektrums (mit dem Spektrum bei einem guten Zustand) ermittelt werden.

<sup>5</sup> Sind die HP hoch, ist der Avatar in einer guten Konstitution, sind sie hingegen niedrig, wird der Zustand kritisch.

Verschleiß (Reduktion der HP) führen.<sup>6</sup> Ist ein kritisches Niveau erreicht (Mindestzustand für ein bestimmtes Produkt), so ist eine fehlerfreie Weiterproduktion nicht mehr möglich und es muss eine Instandhaltungstätigkeit (analog zum Konsumieren eines Trankes) durchgeführt werden.<sup>7</sup>

### 3.2. Zustandsklassifizierung und Produktkategorisierung

Basierend auf der Definition der Healthpoints ist die Formulierung der Zustandsklassifizierung möglich. Dabei kann zwischen einer eindimensionalen und einer mehrdimensionalen Klassifizierung unterschieden werden.

- Klassifizierung einer eindimensionalen Zustandsabhängigkeit: Dies stellt den einfachsten Fall dar und beschreibt den Zusammenhang einer einzelnen Produkteigenschaft und eines einzelnen Werkzeug- bzw. Maschinenzustandes.
- Klassifizierung einer mehrdimensionalen Zustandsabhängigkeit: Im Allgemeinen ist der Zusammenhang mehrdimensional und es bestehen mehrere Korrelationen zwischen Produkteigenschaften und Werkzeug- bzw. Maschinenzuständen. Eine Abbildung des mehrdimensionalen Zusammenhangs ist möglich durch (i) eine Erweiterung der Klassifizierung und (ii) der Einführung einer weiteren Abstraktionsebene zur Komplexitätsreduktion.

#### **Klassifizierung einer eindimensionalen Zustandsabhängigkeit**

Im einfachsten Fall einer eindimensionalen Zustandsabhängigkeit kann davon ausgegangen werden, dass für jedes Produkt nur eine Werkzeug- bzw. Maschinenzustandsabhängigkeit an einer modellierten Anlage besteht. Dabei lässt sich die Zustandsabhängigkeit eines Produktes durch zwei Variablen beschreiben: einem Mindestzustand  $HP_{min}$  und einem produktspezifischen Verschleißeffekt  $\Delta HP$ , der eine Lebenspunktedifferenz vor und nach der Produktion des jeweiligen Produktes darstellt.<sup>8</sup>

---

<sup>6</sup> Demgegenüber sind auch Produktionsprozesse denkbar, die zu einer Erhöhung der HP führen können (z.B. wenn ein Produktionsschritt reinigende Auswirkungen auf das Produktionsmittel hat).

<sup>7</sup> Z.B. bei Austausch das Rücksetzen auf den bestmöglichen Zustand (maximale HP).

<sup>8</sup> Besteht eine mehrdimensionale Zustandsabhängigkeit, so ist die Kategorisierung in analoger Form möglich. Dabei entstehen n Paare an  $HP_{min}$  und  $\Delta HP$ , wobei n der Anzahl an Dimensionen entspricht.

Ist der aktuelle Zustand des Produktionsmittels unter dem Mindestzustand, ist eine fehlerfreie Produktion des beschriebenen Produktes nicht möglich und es müssen Maßnahmen (Instandsetzung, Änderung der Produktionsreihenfolge) getroffen werden. Ist hingegen die Produktion eines bestimmten Produktes möglich (Mindestzustand ist ausreichend), so führt diese zur Reduktion des aktuellen Zustandes des Produktionsmittels um die Lebenspunktedifferenz  $\Delta HP$ . Eine Zustandsklassifizierungsmatrix für eine Anlage besteht dabei aus einer Struktur, wie in Tabelle 1 dargestellt.

Produkt bzw. Produktkategorie	$HP_{min}$	$\Delta HP$
$P_1$	90	0,05
$P_2$	50	1
...	...	...
$P_m$	20	3

Tabelle 1: Zustandsklassifizierungsmatrix im einfachsten Fall.<sup>9</sup>

Im Rahmen der Zustandsklassifizierung werden für jedes Produkt (bzw. für jede Produktkategorie),<sup>10</sup> das an der modellierten Anlage produziert werden kann, die beiden Variablen  $HP_{min}$  und  $\Delta HP$  abgeleitet.

Der Mindestzustand ( $HP_{min}$ ) lässt sich in den meisten Fällen direkt aus den Produkteigenschaften, Qualitätsanforderungen, oder aus den Kundenanforderungen ableiten. Zur besseren Verständlichkeit ein kurzes Beispiel:

*Produkt  $P_1$  ist ein High-End Produkt mit höchsten Qualitätsanforderungen. Zur Gewährleistung der späteren Funktionalität ist eine gute Schnittqualität erforderlich. Die Schnittqualität ist dabei abhängig vom Werkzeugzustand: Das Schneidewerkzeug muss in einem guten Zustand sein, um die notwendige Qualität zu erreichen. Der Mindestzustand des Produktes  $HP_{min}(P_1)$  ist somit entspre-*

<sup>9</sup> Die Beispieleinträge in Tabelle 1 sind auf eine Skalierung von 0 bis 100 HP bezogen.

<sup>10</sup> In der variantenreichen Fertigung ist eine Kategorisierung jedes Produktes im Sinne von Tabelle 1 aufgrund zu hoher Komplexität meist nicht möglich. Daher ist es, zum Beispiel, denkbar die Zuordnung der Werkzeug- bzw. Maschinenzustandsabhängigkeit in Form von Produktkategorien durchzuführen. Wie die Produktkategorien dabei gebildet werden, wird am Ende des aktuellen Abschnittes diskutiert.

*chend hoch. Ist die Schnittqualität und folglich der Werkzeugzustand weniger entscheidend, so ist auch der Mindestzustand  $HP_{min}$  entsprechend niedriger.*

Um den Mindestzustand ableiten zu können, muss also die Produkthanforderung (im Beispiel die Schnittqualität) mit dem Maschinenzustand korreliert werden. Der Mindestzustand stellt somit eine auf den Maschinenzustand (HP) normierte Produkthanforderung dar. Diese Normierung ist in den meisten Anwendungsfällen intuitiv möglich, da derartige Zusammenhänge oft bereits implizit von den Mitarbeitern berücksichtigt werden, um die Qualitätsanforderungen zu befriedigen. Im Rahmen der Klassifizierung (vgl. Tabelle 1) gilt es dieses implizite Wissen zu explizieren.<sup>11</sup> Unterstützend bzw. alternativ kann auf Messungen der Zustandsüberwachung zurückgegriffen werden und der Mindestzustand historienbasiert abgeleitet werden.

Die produktspezifischen Verschleißeffekte  $\Delta HP$  beschreiben die Anzahl an HP, die die modellierte Maschinenkomponente, oder das modellierte Werkzeug, durch die Produktion eines der jeweiligen Produkte verliert.<sup>12</sup> Zur Bestimmung von  $\Delta HP$  können historische Messwerte eines Condition Monitoring Systems (vgl. Abschnitt 2) herangezogen werden. Der Eintrag in der Klassifizierungsmatrix entsteht dabei aus einer statistischen Aggregation der historischen Messwerte je Produkt bzw. Produktgruppe. Welche Art der Aggregation<sup>13</sup> herangezogen wird, ist dabei abhängig vom Anwendungsfall, wobei in den meisten Fällen die Verwendung von Mittelwert oder Median ausreichend ist.

## **Klassifizierung einer mehrdimensionalen Zustandsabhängigkeit**

Die Beschreibung der Zustandsabhängigkeit eines Produktes ist im Allgemeinen nicht nur durch eine einzelne Zustandsdimension möglich. Es sind multiple Dimensionen (je abzubildender Korrelation ein Paar aus Mindestzustand  $HP_{min}$  und Verschleißeffekt  $\Delta HP$ ) notwendig. Daraus

---

<sup>11</sup> In der Praxis kann dieses Explizieren, zum Beispiel, durch Befragungen von Prozessexperten und/oder Mitarbeitern erfolgen.

<sup>12</sup> Theoretisch ist auch die Zunahme der HP durch die Produktion möglich. Das ist z.B. dann der Fall, wenn die Produktion eines bestimmten Produktes eine reinigende Wirkung auf das modellierte Produktionsmittel bewirkt und der über die HP dargestellte Zustand einem Reinheitsgrad entspricht.

<sup>13</sup> Dabei können Mittelwert, Median, Maximalwert, Minimalwert, oder auch Kombinationen aus selbigen verwendet werden.

entsteht eine mehrdimensionale Zustandsklassifizierungsmatrix (Tabelle 2).

Produkt bzw. Produktkategorie	$HP_{1,min}$	$\Delta HP_1$	...	$HP_{n,min}$	$\Delta HP_n$
$P_1$	80	0,05	...	60	0,5
...	...	...	...	...	...
$P_m$	25	3	...	20	2

Tabelle 2: Zustandsklassifizierungsmatrix im mehrdimensionalen Fall.<sup>14</sup>

Je Produkt existieren  $n$  Paare (entspricht der Anzahl an abzubildenden Korrelationen zwischen Produkteigenschaften und Werkzeug- bzw. Maschinenzustand der jeweiligen Anlage) aus Mindestzustand  $HP_{i,min}$  und Verschleißeffekt  $\Delta HP_i$ . Unter Berücksichtigung des zu Beginn skizzierten Megatrends der Produktindividualisierung wird ersichtlich, dass die Zustandsklassifizierungsmatrix schnell an Komplexität zunimmt. Für die Berechnung einer jeden Variable  $\Delta HP_i$  ist eine Vielzahl an Messungen notwendig, um die Zustandsklassifizierungsmatrix mit statistisch signifikanten Werten zu befüllen. Erschwerend kommt die Generalität der Zustandsklassifizierungsmatrix hinzu. Wird das Produktportfolio um neue Varianten erweitert, müssen auch deren Zustandsabhängigkeiten nachmodelliert werden. Da für Neuprodukte im Normalfall keine historischen Messungen vorhanden sind, müssen zunächst Daten über das Zustandsüberwachungssystem generiert werden, ehe eine Bewertung der jeweiligen Verschleißeffekte  $\Delta HP_i$  möglich wird.

Um die modellierte Form der Zustandsklassifizierungsmatrix auch bei einem breiten Produktportfolio beizubehalten, ist eine Produktkategorisierung notwendig, die an dieser Stelle nicht basierend auf der physischen bzw. funktionalen Ähnlichkeiten der Produkte erfolgen soll, sondern hinsichtlich der Eigenschaften und Anforderung in Bezug auf die Produktion. Es werden also jene Produkte zusammengefasst, die sich in den Dimensionen (i) Produkteigenschaften (z.B. Materialeigenschaften wie Duktilität) und (ii) Anforderungen (z.B. Qualitätsanforderungen) ähneln.

<sup>14</sup> Die Beispieleinträge in Tabelle 2 sind auf eine Skalierung von 0 bis 100 HP bezogen.

## Produktkategorisierung in der variantenreichen Fertigung

Steigende Produktindividualisierung führt zu einer erhöhten Anzahl an Produktvarianten, wobei der Trend in Richtung Losgröße 1 geht (vgl. Lödning et al. 2017, S. 299). Ist es bei einem überschaubaren Produktportfolio noch möglich, Restriktionen von Produkten explizit zu modellieren, so ist dies, wie zuvor beschrieben, bei steigender Produktvielfalt wirtschaftlich nicht mehr möglich. Betrachtet man die Restriktion „Zustandsabhängigkeit“, so bezieht sich diese im Wesentlichen nicht direkt auf das Produkt selbst, sondern auf spezielle Charakteristika des Produktes. Ein Produkt kann als eine Summe an Charakteristika (Farbe, Toleranz, Funktionalitäten etc.) aufgefasst werden. Eine hohe Variantenvielfalt entsteht erst durch die Kombination der unterschiedlichen Charakteristika. Hierzu ein kurzes hypothetisches Beispiel mit dem Produkt „Fernglas“:

*Das Fernglas weist die Individualisierungsmerkmale Augenabstand, Farbe, Optik und Ummantelung auf. Während das erste Merkmal ein vollständig individualisierbares Merkmal darstellt, so gibt es für Farbe, Optik und Ummantelung jeweils eine finite Menge an vordefinierten, diskreten Kategorien. Die Farbe gibt es in  $X$ , die Optik in  $Y$  und die Ummantelung in  $Z$  Kategorien. Aus den diskreten Kategorien entstehen somit  $X \cdot Y \cdot Z$  Variantenmöglichkeiten. Für den Augenabstand (vom Kunden individuell parametrisierbar) kann lediglich eine „realistische“ Eingrenzung<sup>15</sup> getroffen werden. Dieses Intervall muss in (aus produktionstechnischer Sicht) relevante Subintervalle<sup>16</sup> eingeteilt werden, woraus eine finite Anzahl an Kategorien  $K$  entsteht. Die Gesamtzahl an Möglichkeiten ergibt sich in Folge dessen aus einer Multiplikation der diskreten Kategorien und den Subintervallen zu  $X \cdot Y \cdot Z \cdot K$ . In Summe entsteht zwar eine hohe Anzahl an Variantenmöglichkeiten, die Anzahl an Möglichkeiten innerhalb der Kategorien bleibt aber in den meisten Fällen überschaubar: Geht man von derselben Anzahl an Möglichkeiten je Kategorie von  $j$  aus, so entstehen in Summe  $j^4$  Variantenmöglichkeiten, die von*

---

<sup>15</sup> So kann dieser im Allgemeinen nicht beliebig variieren, sondern liegt in jedem Fall innerhalb eines vordefinierten Intervalls.

<sup>16</sup> Die Sub-Intervalle werden dabei, zum Beispiel, durch Fertigungsrandbedingungen festgelegt. Maschine A kann nur im Bereich a bis b arbeiten, Maschine B im Bereich a bis c etc.

*nur  $4 \cdot j$  Kategorien dargestellt werden können.<sup>17</sup> Fertigungstechnische Restriktionen müssen dabei nicht für alle  $j^4$  Möglichkeiten, sondern lediglich für  $4 \cdot j$  Kategorien abgebildet werden.<sup>18</sup>*

Anhand des Beispiels wird klar, wie aus einer scheinbar unbegrenzten Anzahl an Variantenmöglichkeiten, eine überschaubare Anzahl an fertigungstechnischen Restriktionen abgeleitet werden kann. Im Falle kontinuierlicher Charakteristika (wie im Beispiel der Augenabstand), ist das Bilden von sinnvollen Subintervallen notwendig.<sup>19</sup> Die in den beiden vorangegangenen Abschnitten diskutierten Möglichkeiten der Modellierung der Zustandsabhängigkeiten (ein- bzw. mehrdimensional) erfolgt dabei nicht für jedes Produkt (im Beispiel  $j^4$  Mal), sondern für jede Kategorie (im Beispiel  $4 \cdot j$  Mal). Dabei bildet die erste Spalte (vgl. Tabelle 1 und Tabelle 2) nicht das Produkt, sondern die jeweilige Produktkategorie.

#### 4. Zustandsklassifizierung zur Entscheidungsunterstützung

Mit der im vorigen Abschnitt vorgestellten Zustandsklassifizierung kann die Maschinen- bzw. Werkzeugzustandsabhängigkeit eines Produktes mit den beiden Variablen  $HP_{min}$  und  $\Delta HP$  beschrieben werden. Durch die Gegenüberstellung des Grenzwertes (Mindestzustand)  $HP_{min}$  mit dem aktuellen Maschinenzustand  $HP$ , kann entschieden werden, ob ein Produkt noch gefertigt werden kann, oder nicht.<sup>20</sup> Der Entscheidungsunterstützungsprozess ist in Abbildung 1 dargestellt.

Ausgangspunkt bilden das Condition Monitoring System (CMS) auf der einen, und das Produktionsprogramm auf der anderen Seite. Das CMS misst den aktuellen Maschinen- bzw. Werkzeugzustand  $HP$ . Im Produk-

---

<sup>17</sup> Zum Beispiel erhält man für  $j = 10$  eine Menge von 10.000 Variantenmöglichkeiten, die sich mit lediglich 40 Kategorien darstellen lassen.

<sup>18</sup> Voraussetzung dafür ist, dass die Merkmale voneinander unabhängig sind, was in den meisten Fällen gegeben ist. Sind zwei Merkmale voneinander abhängig, muss entweder (i) ihr funktioneller Zusammenhang modelliert werden, oder es müssen alle Kombinationen der beiden abhängigen Merkmale berücksichtigt werden, was zu einer erhöhten Kategorienanzahl führt (Im Beispiel  $2 \cdot j + j^2 = 120$  Kategorien).

<sup>19</sup> Alternativ dazu ist das Ableiten eines funktionalen Zusammenhangs zwischen Restriktion und Parameter denkbar.

<sup>20</sup> Liegt der aktuelle Maschinenzustand unter dem Mindestzustand entsteht ein hohes Risiko an Fehlproduktion.

tionsprogramm bildet Produkt x das nächste zu fertigende Produkt. Dieses weist einen Mindestzustand  $HP_{min}$  und einen Verschleißeffekt  $\Delta HP$  auf.

Zur Überprüfung, ob eine Fertigung möglich ist, kann nun der Mindestzustand  $HP_{min}$  dem aktuellen Zustand  $HP(i)$  gegenübergestellt werden. Dabei ergeben sich zwei Möglichkeiten:

- i) Ist der aktuelle Zustand ausreichend ( $HP(i) \geq HP_{min}$ ), kann Produkt x produziert werden und die Produktion wird den Maschinenzustand um voraussichtlich  $\Delta HP$  reduzieren.<sup>21</sup> Nach abgeschlossener Fertigung erfolgt eine erneute Messung des Maschinenzustandes und der Prozess beginnt von neuem.

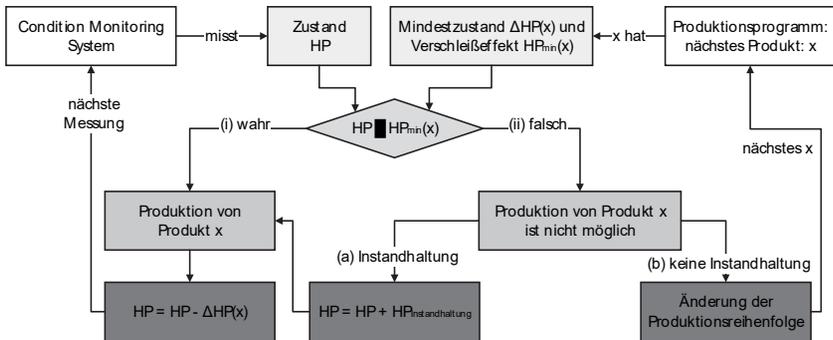


Abbildung 1: Einbindung der Zustandsklassifizierung in die Entscheidungsunterstützung.

- ii) Ist der aktuelle Zustand nicht ausreichend ( $HP(i) < HP_{min}$ ), kann Produkt x nicht produziert werden.<sup>22</sup> Stattdessen entstehen zwei neue Möglichkeiten: Es kann (a) eine Instandhaltungstätigkeit durchgeführt werden, oder (b) die Produktionsreihenfolge angepasst werden. Bei (a) wird der Anlagenzustand um eine instandhaltungstätigkeitsabhängige Anzahl an Healthpoints erhöht und die Produktion ermöglicht (die restlichen Schritte sind nun analog zu i)).

<sup>21</sup>  $\Delta HP$  stellt an dieser Stelle eine Prognose des Verschleißes durch Produkt x da. Der tatsächliche Verschleiß ergibt sich erst nach durchgeführter Fertigung.

<sup>22</sup> Würde dennoch produziert werden, besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass die Produktqualität nicht eingehalten werden kann und es folglich zu einer Fehlproduktion kommt, die Nacharbeit, oder Ausschuss impliziert.

Wird keine Instandhaltung durchgeführt, kann Produkt x nicht produziert werden und es verbleibt die Möglichkeit, die Produktionsreihenfolge zu ändern. Dabei wird ein anderes Produkt ausgewählt und der Prozess beginnt von vorne. Wird Fall (b) durchgeführt, so entspricht dies einer Erhöhung der Maschinen- bzw. Werkzeugstandzeit (Reduktion der Instandhaltungsaufwände), führt jedoch zu einer Veränderung der ursprünglichen Produktionsreihenfolge, was negative Auswirkungen auf die Zielgrößen der Produktionsplanung haben kann. Im Falle der Entscheidung zu (a) sind die Auswirkungen entgegengesetzt.

Speziell bei (ii) wird ersichtlich, dass die Entscheidungen (a) oder (b) einerseits instandhaltungsrelevante Zielgrößen und andererseits Zielgrößen aus der Produktionsplanung betreffen. Um dennoch eine nachvollziehbare Entscheidung fällen zu können, ist die Entwicklung einer geeigneten Zielfunktion notwendig, die eine integrierte Betrachtung der unterschiedlichen Zielgrößen ermöglicht. Der Prozess, der Abbildung 1 dargestellt ist, dient der Visualisierung der Entscheidung, ob ein Produkt an einer bestimmten Anlage noch gefertigt werden kann oder nicht, wobei Entscheidung (a) oder (b) durch eine anwendungsfallspezifischen Zielfunktion beschrieben werden kann. Die Entscheidungsunterstützung hat gegenüber einer subjektiven Berücksichtigung der Zustandsabhängigkeiten (vgl. Abschnitt 1) den Vorteil der Kontinuität, da die Prozessstabilität nicht mitarbeiterabhängig<sup>23</sup> ist. Die explizite Darstellung und Formulierung der Entscheidungen ermöglicht zudem die mathematische Modellierung des Planungsprozesses und in weiterer Folge die Entwicklung eines Algorithmus zur Reihenfolgeoptimierung.

Die Methode eignet sich zur Entscheidungsunterstützung speziell im Rahmen der kurzfristigen Produktionsreihenfolgeplanung. Neben der Entlastung der Produktionsmitarbeiter führt die objektive Beurteilung, ob ein Produkt noch gefertigt werden kann oder nicht, zu einer Reduktion von Nacharbeit und Ausschuss (Fehleinschätzungen werden vermieden). Speziell klein- und mittelständische Unternehmen könnten von dem Einsatz der Methode profitieren, da sie die in der Einleitung erwähnten subjektiven Berücksichtigung der Maschinenzustände in einen objektiven Rahmen rückt, ohne hohe Kosten zu verursachen.<sup>24</sup>

---

<sup>23</sup> Z.B. abhängig von der Erfahrung der jeweiligen Mitarbeiter.

<sup>24</sup> Um die Methode gezielt einsetzen zu können ist die Erstellung eines Condition Monitoring Systems notwendig, die wie in Abschnitt 2 hervorgehoben, in vielen Fällen kostengünstig durch Retrofitting möglich ist.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag behandelt die bidirektionale Abhängigkeit zwischen Produktqualität und Maschinen- bzw. Werkzeugzustand und adressiert somit die Integration von Condition Monitoring und der Produktionsplanung.

In Branchen wie zum Beispiel der metallverarbeitenden Industrie, ist das Produktionsprogramm abhängig vom Maschinen- und Werkzeugzustand. Während kritische Produkte einen guten Zustand benötigen, um eine fehlerfreie Produktion zu gewährleisten, sind andere unkritischer. Diese Abhängigkeiten werden in vielen Fällen nicht explizit modelliert und können somit im Rahmen der Produktionsplanung nicht berücksichtigt werden. Miteinbezogen werden die Zusammenhänge meist erst kurzfristig am Shopfloor, wodurch es aufgrund von Produktionsreihenfolgeänderungen zu Planabweichungen kommt.

Um dieses Problem zu adressieren, wurde im vorliegenden Beitrag ein Modellierungsansatz entwickelt, der die Zustandsabhängigkeiten (bzw. die Produkthanforderungen) in Form von Healthpoints abbildet, dadurch vorhandenes, implizites Mitarbeiterwissen expliziert und für die Produktionsplanung zugänglich macht. Dabei wurde im Speziellen die Herangehensweise zur Modellierung der Produkthanforderungen im Kontext der variantenreichen Fertigung thematisiert. Zur Nutzung des Klassifizierungsansatzes wurde zudem eine Methode zur Entscheidungsunterstützung für die Produktionsreihenfolgeplanung vorgestellt. Die Methode unterstützt die Prozesseigner bei der Entscheidung, ob die Produktion eines bestimmten Produktes in der jeweiligen Situation möglich ist oder nicht, bzw. welche Tätigkeiten notwendig sind, um eine Produktion zu ermöglichen. Der Mehrwert der Methode liegt in der expliziten Modellierung, die auch im Rahmen der Produktionsplanung eingesetzt werden kann. Die Berücksichtigung von Maschinen- und Werkzeugzustandsabhängigkeiten bleibt also nicht mehr nur auf kurzfristige ad hoc Anpassungen am Shopfloor beschränkt. Des Weiteren reduziert die objektive Modellierung der Maschinen- und Werkzeugzustandsabhängigkeiten die Wahrscheinlichkeiten von Fehlproduktion durch Fehleinschätzungen der Zustände.

Aktueller Forschungsinhalt ist die Entwicklung eines Produktionsreihenfolgeoptimierungsalgorithmus unter Einbeziehung von Werkzeug- und Maschinenzuständen auf der Basis der vorgestellten Methode zur Entscheidungsunterstützung. Im Speziellen wird die Erfassung und Abbildung von Zustandsabhängigkeiten, sowie die Modellierung des Pro-

duktionsprozesses<sup>25</sup> in Form eines mathematischen Repräsentationsmodells, thematisiert. Die Produktionsreihenfolgeanpassung erfolgt basierend auf der in diesem Beitrag vorgestellten Entscheidungsunterstützungsmethode mit dem Ziel einer multikriteriellen Optimierung logistischer Zielgrößen.

## Literatur

- Benbouzid, M. El Hachemi (2000). A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 47 (5), S. 984–993.
- Bernstein, Herbert (2014). *Messelektronik und Sensoren*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Bhuiyan, M. S.H., Choudhury, I. A. (2014). 13.22—Review of Sensor Applications in Tool Condition Monitoring in Machining. *Comp. Mater. Process*, Vol. 13, S. 539–569.
- Cooper, J. (2017). An overview of reliability. In *Proceedings of the SMTA Pan Pacific Microelectronics Symposium 2017*, S. 1–5.
- Delgado-Arredondo, P. A., Morinigo-Sotelo, D., Osornio-Rios, R. A., Avina-Cervantes, J. G., Rostro-Gonzalez, H., Jesus Romero-Troncoso, R. (2017). Methodology for fault detection in induction motors via sound and vibration signals. *Mechanical systems and signal processing*, Vol. 83, S. 568–589.
- Deterding, S., Dixon, D., Khaled, R., Nacke, L. (2011). From game design elements to gamefulness: defining gamification. In *Proceedings of the 15th international academic MindTrek conference: Envisioning future media environments* (S. 9–15). ACM.
- Dimla, D. E., Lister, P. M. (2000a). On-line metal cutting tool condition monitoring.: I: force and vibration analyses. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40 (5), S. 739–768.
- Dimla, D. E., Lister, P. M. (2000b). On-line metal cutting tool condition monitoring.: II: tool-state classification using multi-layer perceptron neural networks. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40 (5), S. 769–781.
- Fitouri, C., Fnaiech, N., Varnier, C., Fnaiech, F., Zerhouni, N. (2016). A Decision-Making Approach for Job Shop Scheduling with Job Depending Degradation and Predictive Maintenance. *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 49 (12), S. 1490–1495.

---

<sup>25</sup> Die Entwicklung erfolgt im Rahmen eines industrienahen Forschungsprojektes in der metallverarbeitenden Industrie.

- Glawar, R., Karner, M., Nemeth, T., Matyas, K., Sihm W. (2018). An approach for the integration of anticipative maintenance strategies within a production planning and control model. In 11th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '17 (67).
- Glawar, R., Kemeny, Z., Nemeth, T., Matyas, K., Monostori, L., Sihm, W. (2016). A holistic approach for quality oriented maintenance planning supported by data mining methods. *Procedia CIRP*, Vol. 57, S. 259–264.
- Honrubia, M. (2017). Industrial IoT is booming thanks to a drop in Sensor Prices. Online verfügbar unter <https://www.ennomotive.com/industrial-iot-sensor-prices/>, zuletzt geprüft am 05.08.2018.
- Irfan, M., Saad, N., Ibrahim, R., Asirvadam, V. S. (2017). Condition monitoring of induction motors via instantaneous power analysis. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 28 (6), S. 1259–1267.
- Jardine, A. K. S., Lin, D., Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical systems and signal processing*, Vol. 20 (7), S. 1483–1510.
- Karner, M., Glawar, R., Sihm, W., Matyas, K. (2018). Integrating Machine Tool Condition Monitoring and Production Scheduling in Metal Forming. In *Proceedings of MOTSP 2018* (in Press), Primosten, Croatia.
- Lee, J., Wu, F., Zhao, W., Ghaffari, M., Liao, L., Siegel, D. (2014). Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications. *Mechanical systems and signal processing*, Vol. 42 (1), S. 314–334.
- Lödding, H., Riedel, R., Thoben, K.-D., Cieminski, G., Kiritsis, D. (2017). Advances in Production Management Systems. In: H. Lödding, R. Riedel, K.-D. Thoben, G. von Cieminski, D. Kiritsis (Hrsg.): *The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Martin, K. F. (1994). A review by discussion of condition monitoring and fault diagnosis in machine tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 34 (4), S. 527–551.
- Matyas, K., Nemeth, T., Kovacs, K., Glawar, R. (2017). A procedural approach for realizing prescriptive maintenance planning in manufacturing industries. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 66 (1), S. 461–464.
- Meißner, A., Glass, R., Gebauer, C., Stürmer, S., Metternich, J. (2017). Hindernisse der Industrie 4.0 – Umdenken notwendig? *Zeitschrift für den Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)*, Vol. 112 (9), S. 607–611.
- Moeuf, A., Pellerin, R., Lamouri, S., Tamayo-Giraldo, S., Barbaray, R. (2017). The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, Vol. 56 (3), S. 1118–1136.
- Moghaddass, R., Ertekin, S. (2018). Joint optimization of ordering and maintenance with condition monitoring data. *Ann Oper Res*, Vol. 263 (1-2), S. 271–310.

- Nandi, S., Toliyat, H. A., Li, X. (2005). Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—A review. *IEEE transactions on energy conversion*, Vol. 20 (4), S. 719–729.
- Nourelfath, M., Nahas, N., Ben-Daya, M. (2016). Integrated preventive maintenance and production decisions for imperfect processes. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 148, S. 21–31.
- Rahmati, S. H. A., Ahmadi, A., Karimi, B. (2018). Multi-objective evolutionary simulation based optimization mechanism for a novel stochastic reliability centered maintenance problem. *Swarm and Evolutionary Computation*, Vol. 40, S. 255–271.
- Rivera-Gómez, H., Lara, J., Montañó-Arango, O., Hernández-Gress, E. S., Corona-Armenta, J. R., Santana-Robles, F. (2018a). Joint production and repair efficiency planning of a multiple deteriorating system. *Flex Serv Manuf J*, Vol. 96 (15), S. 1411.
- Rivera-Gómez, H., Montañó-Arango, O., Corona-Armenta, J., Garnica-González, J., Hernández-Gress, E., Barragán-Vite, I. (2018b). Production and Maintenance Planning for a Deteriorating System with Operation-Dependent Defectives. *Applied Sciences*, Vol. 8 (2), S. 165.
- Rostami, M., Nikraves, S., Shahin, M. (2018). Minimizing total weighted completion and batch delivery times with machine deterioration and learning effect. A case study from wax production. *Oper Res Int J*, Vol. 5 (2), S. 287.
- Salmasnia, A., Kaveie, M., Namdar, M. (2018). An integrated production and maintenance planning model under VP-T 2 Hotelling chart. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 118, S. 89–103.
- Wang, Y., Xiang, J., Markert, R., Liang, M. (2016). Spectral kurtosis for fault detection, diagnosis and prognostics of rotating machines: A review with applications. *Mechanical systems and signal processing*, Vol. 66, S. 679–698.
- Wuest, T., Weimer, D., Irgens, C., Thoben, K.-D. (2016). Machine learning in manufacturing: advantages, challenges, and applications. *Production & Manufacturing Research*, Vol. 4 (1), S. 23–45.
- Yin, S., Ding, S. X., Xie, X., Luo, H. (2014). A review on basic data-driven approaches for industrial process monitoring. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 61 (11), S. 6418–6428.

# Mobile Endgeräte in der Produktion

Engineering-Methode zur Gestaltung tangibler Mensch-Maschine-Schnittstellen

Michael Wächter, Danny Rüffert, Angelika C. Bullinger

Professur Arbeitswissenschaft und Innovationsmanagement, Institut für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme, Technische Universität Chemnitz

## 1. Einleitung

Im Zuge von Internet of Things (IoT) -Technologien und der allgegenwärtigen Verfügbarkeit von mobilen Endgeräten in allen Bereichen der menschlichen Arbeit und des menschlichen Lebens entstehen neue Möglichkeiten und Herausforderungen für die Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen (Gorecky et al. 2017; Schmitt et al. 2013). Für mobile Endgeräte sind nicht nur neue Software Interfaces zu entwickeln, sondern auch tangible Mensch-Maschine-Schnittstellen (tMMS) zur haptischen Steuerung des Endgerätes), die auch Hardwareelemente zur Handhabung und zum Betrieb enthalten (Pereira et al. 2013; Wächter/Bullinger 2016). Ein Paradebeispiel für mobile Geräte sind Tablets. Zunächst für den privaten Einsatz entwickelt, halten diese vermehrt Einzug in Produktionsumgebungen, z.B. zur Multimaschinensteuerung. Bei der Entwicklung einer gebrauchstauglichen tMMS für die Verwendung dieser Endgeräte in der Produktion, sind kontextspezifische Anforderungen aus der Industrie, z.B. einhändige und zweihändige Handhabung, zu berücksichtigen. Aktuell existieren jedoch nur rudimentäre Gestaltungsrichtlinien und die aktuellen Engineering-Methoden sind nicht umfassend genug, um den Gestaltungsprozess für Planer und Entwickler solcher Systeme abzudecken. Gerade kleine und mittlere Unternehmen (KMU) verfolgen oftmals Nischenstrategien (Specht/Lutz 2008). Jedoch fehlt es häufig an Forschungs- und Entwicklungsabteilungen zur Generierung benutzerfreundlicher tMMS. Passende Engineering-Methoden bieten dabei die Möglichkeit das Marktpotential zu erhöhen, wenn sie effektiv auf die Bedarfe/Anforderungen der Kunden abgestimmt sind. Dieser Artikel zeigt die Entwicklung und Evaluation einer solchen Engineering-Methode zur Gestaltung gebrauchstauglicher

Mensch-Maschine-Schnittstellen für Planer und Entwickler von Produktionsassistenzsystemen.

## 2. Forschungsdesign

Das verwendete Forschungsdesign basiert auf dem Rahmen des gestaltungsorientierten Forschungsansatzes (engl.: Design Science Research, DSR) nach Hevner et al. (2004). Dabei steht die systematische Realisierung von Lösungen für ein praxisrelevantes Problem - hier die Notwendigkeit eines praxistauglichen Ansatzes zur nutzerzentrierten Gestaltung von gebrauchstauglichen tangiblen Mensch-Maschine-Schnittstellen - durch die iterative und wissenschaftlich rigorose Gestaltung und Auswertung von Artefakten im Fokus der Forschung. Die detaillierte Analyse der Anforderungen aus der Praxis an eine solche Engineering-Methode und dessen Instanziierung in der Anwendungsumgebung werden hierbei genauer betrachtet.

Die Zielgruppe der Forschung sind Planer und Entwickler, d.h. die Verantwortlichen für die Planung und Umsetzung von industriellen Assistenzsystemen, deren Anforderungen die Praktikabilität der Engineering-Methode gewährleisten. Als Grundlage für die Entwicklung der Engineering-Methode dienen bereits vorhandene Erkenntnisse aus der wissenschaftlichen Wissensbasis Produkteergonomie, System-Engineering, Interaktionsdesign, User-Centered Design, Mensch-Computer-Interaktion und (Rapid) Prototyping. Die Evaluation der Engineering-Methode erfolgt iterativ im Rahmen von Fallstudien nach Venable et al. (2012). Um dies zu ermöglichen, werden die einzelnen Phasen der Engineering-Methode in Feldstudien angewendet. Abbildung 1 gibt einen Überblick über unsere Forschungsmethode als Instanziierung des Forschungsdesigns nach Hevner et al. (2004).

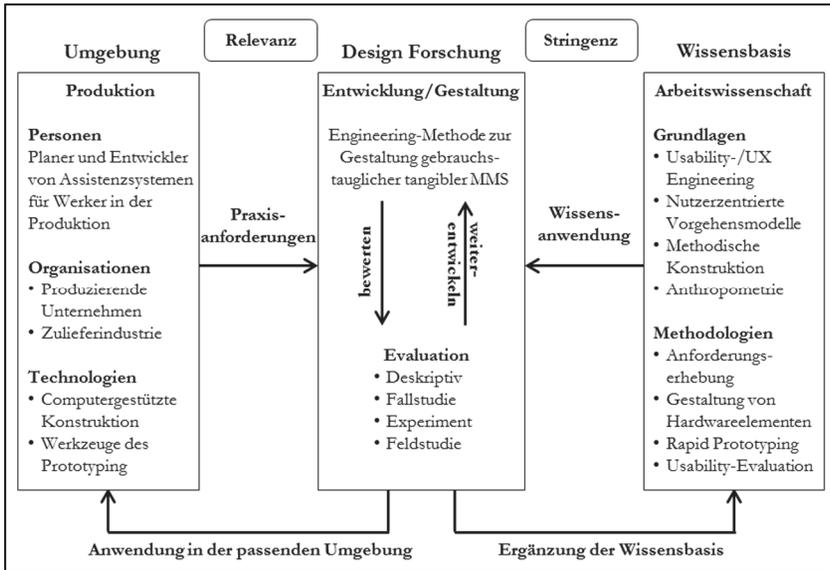


Abbildung 1: Instanziierung des Forschungsparadigmas Design Science Research nach Hevner et al. (2004).

### 3. Entwicklung der Engineering-Methode

#### 3.1. Anforderungsanalyse

##### *Zweck der Anforderungsanalyse*

Ein Artefakt in DSR wird als erfolgreich implementiert betrachtet, wenn es die zuvor identifizierten Anforderungen erfüllt. Dies umfasst zum einen die Anforderungen, die aus der Anwendungsdomäne (d.h. von Planern und Entwicklern in der Produktionsumgebung) stammen und zum anderen die Anforderungen, die sich aus der Lösungsdomäne (z.B. durch Limitationen bestehender Lösungen) ergeben (Hevner et al. 2004). Darüber hinaus lassen sich in der wissenschaftlichen Literatur Anforderungen an eine nutzerzentrierte Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen ableiten, die den Status quo der Wissensbasis repräsentieren.

##### *Methodisches Vorgehen*

Um die Anforderungen an eine Engineering-Methode zur Gestaltung gebrauchstauglicher tMMS zu identifizieren, erfolgt im ersten Schritt eine strukturierte Literaturrecherche zur Beurteilung der vorhandenen Wis-

sensbasis (Wächter 2018). Darüber hinaus werden im Rahmen einer Fokusgruppe (n=5) die Anforderungen der Planer und Entwickler, also der Anwender von nutzerzentrierten Entwicklungsprozessen in der industriellen Praxis, erhoben und analysiert.

### *Identifizierte Anforderungen*

Die identifizierten Anforderungen lassen sich in Anforderungen an nutzerzentrierte Vorgehensmodelle, allgemeine Anforderungen an darin verwendete Verfahren und Werkzeuge sowie spezifische Anforderungen an die Gestaltung von tMMS klassifizieren. Tabelle 1 zeigt die identifizierten Anforderungen an nutzerzentrierte Vorgehensmodelle aus Sicht der Planer und Entwickler.

Anforderung	Erläuterung	Quelle
Vorgabe von Verfahren u. Werkzeugen	Kontextspezifische Methoden für eine nutzerzentrierte Entwicklung in den einzelnen Phasen.	(Bruno/Dick 2007; Glende 2010; van Eijk et al. 2012; van Kuijk et al. 2015)
Zeitige Evaluation	Zeitige Beteiligung der Nutzer in die Evaluation von Gestaltungsvarianten.	(Bruno/ Dick 2007; Glende 2010; Hemmerling 2002; van Kuijk et al. 2015)
Frühzeitige Prototypen	Frühzeitige Gestaltung von Prototypen zur Integration der Nutzerrückmeldungen in die weitere Entwicklung	(Boivie et al. 2006; Hemmerling 2002; van Kuijk et al. 2015; Vredenburg et al. 2002)

Tabelle 1: Anforderungen von Planern und Entwicklern an nutzerzentrierte Vorgehensmodelle.

Die identifizierten Anforderungen ergänzen die Grundregeln einer nutzerzentrierten Entwicklung. Darüber hinaus ergeben sich die in Tabelle 2 dargestellten allgemeinen Anforderungen an verwendete Verfahren und Werkzeuge in nutzerzentrierten Vorgehensmodellen.

Anforderung	Erläuterung	Quelle
Standardisierte Verfahren und Werkzeuge	Verwendung von standardisierten Verfahren und Werkzeugen für eine vergleichbare Qualität der Ergebnisse.	(Glende 2010; van Kuijk et al. 2015)
Geringe Anwendungszeit	Anwendung ressourcenschonender Verfahren und Werkzeuge, um Kosten zu reduzieren.	(Bruno/ Dick 2007; Chilana et al. 2011; van Kuijk et al. 2015)
Einfache Auswertung	Verfahren und Werkzeuge zur Evaluation sollten ohne Vorkenntnisse anwendbar sein.	(Glende 2010; van Kuijk et al. 2015; Vredenburg et al. 2002)

Tabelle 2: Allgemeine Anforderungen an verwendete Verfahren und Werkzeuge.

Bestehende Verfahren und Werkzeuge zur nutzerzentrierten Gestaltung von Software-Schnittstellen lassen sich nur teilweise auf die Gestaltung von tangiblen MMS übertragen. Tabelle 3 zeigt die spezifischen Anforderungen für die Gestaltung von gebrauchstauglichen tMMS.

Anforderung	Erläuterung	Quelle
Verfahren und Werkzeuge zur Gestaltung	Unterstützung der Planer und Entwickler mit Verfahren und Werkzeugen zur Gestaltung von tMMS.	Fokusgruppe mit Planern und Entwicklern (n=5) von Assistenzsystemen für das Produktionsumfeld
Berücksichtigung der Anthropometrie	Anthropometrische Variablen stellen einen integralen Bestandteil bei der Gestaltung von tMMS dar.	
Verfahren und Werkzeuge zur Evaluation	Unterstützung der Planer und Entwickler mit Verfahren und Werkzeugen zur Evaluation von tMMS.	

Tabelle 3: Spezifische Anforderungen an die Gestaltung gebrauchstauglicher tMMS.

In der Literatur beschriebene Vorgehensmodelle zur nutzerzentrierten Entwicklung erfüllen diese Anforderungen nur bedingt, insbesondere im Hinblick auf die verwendeten Verfahren und Werkzeuge. Die identifizierten Anforderungen an diese sind daher eine wesentliche Grundlage für die Erstellung der Engineering-Methode.

### 3.2. Engineering-Methode

Die Grundstruktur der vorgeschlagenen Engineering-Methode resultiert aus der Analyse bestehender Vorgehensmodelle aus dem Usability-Engineering, UX-Engineering sowie der methodischen Konstruktion und besteht aus den vier Phasen Ideation, Konzeption, Konkretisierung und Umsetzung (Abbildung 2). Jede Phase beinhaltet die grundlegenden Schritte einer nutzerzentrierten Entwicklung Analyse, Gestaltung, Prototyping und Evaluation (Norman 2013). Den Anwendern der Engineering-Methode werden dabei kontextspezifisch Verfahren und Werkzeuge zur Verfügung gestellt, die den identifizierten Anforderungen der Planer und Entwickler entsprechen. Vor dem Hintergrund der Gestaltung einer tMMS besitzt das methodische Prototyping dabei eine besondere Bedeutung innerhalb der Engineering-Methode.

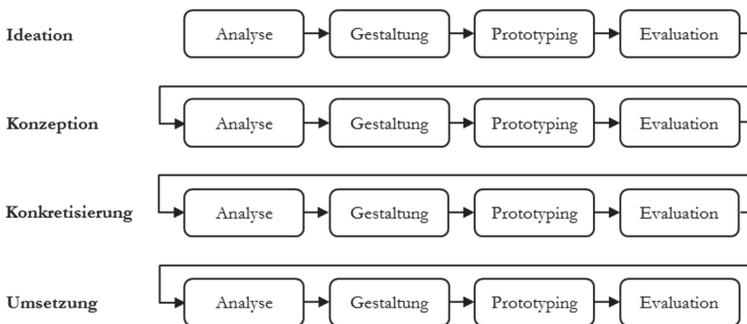


Abbildung 2: Grundstruktur der Engineering-Methode.

- *Ideation*, um die Nutzeranforderungen an ein Assistenzsystem sowie den Nutzungskontext und die zentralen Funktionen zu identifizieren. Verschiedene Entwürfe für die Funktionen bilden zudem die Basis für die folgenden Phasen.
- *Konzeption*, um zunächst ergonomische tMMS zu gestalten und bestehende Lösungen in Literatur und Praxis zu analysieren. Zusammen mit den Ergebnissen der Ideation werden verschiedene tMMS erstellt, die von zukünftigen Nutzern bewertet werden und Hinweise für eine endgültige tMMS liefern.

- *Konkretisierung*, um basierend auf den Erkenntnissen der Konzeption eine endgültige tMMS zu entwerfen. Identifizierte Funktionen aus der Ideation werden von zukünftigen Nutzern analysiert, entworfen, prototypisiert und bewertet.
- *Umsetzung*, um ein funktionales Modell zu entwerfen, das alle identifizierten Funktionen prototypisch umsetzt und hinsichtlich seiner Verwendbarkeit im Kontext eines realen Anwendungsszenarios bewertet wird. Die Ergebnisse dieser abschließenden Studie zeigen die Verwendbarkeit der entwickelten tMMS.

## 4. Evaluation der Engineering-Methode

### 4.1. Anwendungsfall

Die digitalisierte Instandhaltung im Rahmen der industriellen Produktion stellt dem Instandhalter alle relevanten Informationen wie Maschinenzustand, Wartungshistorie und Reparaturanleitungen vor Ort über mobile Endgeräte zur Verfügung (Scheer 2013; Schröder 2016). Gegenwärtig verfügbaren mobilen Endgeräten für den industriellen Gebrauch fehlt es an der Berücksichtigung von systemischen Anforderungen, die sich aus Veränderungen in der Domäne durch die Digitalisierung und Benutzeranforderungen ergeben. Obwohl Hardwarehersteller mobile Lösungen für die Produktions- und Logistikbranche anbieten, berücksichtigen diese lediglich industrielle Anforderungen wie robuste Konstruktion, Staub- und Spritzwasserschutz (Gorecky et al. 2017), ohne spezifische Anforderungen an die tMMS bspw. Griffe zur ergonomischen Handhabung des mobilen Endgerätes zu betrachten.

Die Evaluation der Engineering-Methode erfolgte iterativ über vier Fall-/Feldstudien, um die Eignung der identifizierten Verfahren und Werkzeuge für Analyse, Gestaltung, Prototyping und Evaluation zu testen. Im Rahmen der sukzessiv durchgeführten Studien entsteht die tangible Mensch-Maschine-Schnittstelle eines mobilen Assistenzsystems für Instandhalter. Dabei wurde jede Phase der Engineering-Methode gemeinsam mit Planern, Entwicklern und Anwendern aus der Instandhaltung von drei großen deutschen Automobilherstellern/-zulieferern durchgeführt. Abbildung 3 zeigt die entworfenen Prototypen als Endergebnisse der jeweiligen Phasen.

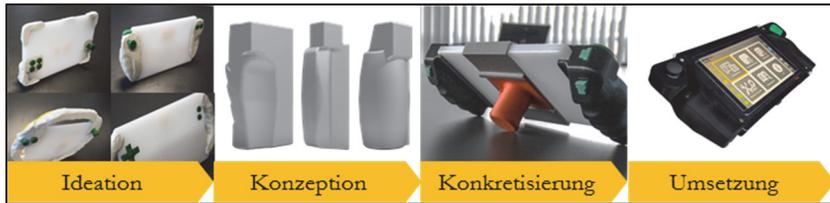


Abbildung 3: Prototypen in den verschiedenen Phasen der Instanziierung der Engineering-Methode.

## 4.2. Subjektive Evaluation - Fallstudie

### *Ideenfindung*

In der ersten Phase bewerteten Nicht-Anwender ( $n=6$ ) die prototypischen Griffformen aus Modelliermasse. Ihr positives Feedback zeigt, dass die prozessbegleitenden Verfahren und Werkzeuge eine effiziente und praktikable Identifikation der Anforderungen ermöglichen. Die resultierenden Anforderungen wurden im Rahmen von drei Fokusgruppen von Instandhaltern ( $n=15$ ) bestätigt und zeigen den erfolgreichen Einsatz der vorgeschlagenen Verfahren und Werkzeuge.

### *Konzeption*

Die Bewertung der drei resultierenden Griffformen wurde in drei Fokusgruppen mit Instandhaltern ( $n=15$ ) durchgeführt. Während Griffform 1 die anthropometrischen Maße für Stellteile (DIN EN 894-3) berücksichtigt, basiert Griff 2 auf einem mobilen Anlagen-Panel, das derzeit in der Produktion verwendet wird. Die Grundlage für Griff 3 stellt der kombinierte Entwurf aus der Ideationsphase dar. Die Evaluierungsaufgabe bestand darin, die drei verschiedenen Konzeptmodelle mit einer Hand und zwei Händen zu verwenden, wie es die Nutzer bei ihren täglichen Aufgaben tun würden. Randomisiert nach dem lateinischen Quadrat (Sedmeier/Renkewitz 2008), bewerteten die Instandhalter nach jedem Durchgang den Komfort der Griffe mit dem Comfort Questionnaire for Handtools von Kuijt-Evers et al. (2007). Dadurch konnten detaillierte Informationen zum Griffkomfort bei beidhändiger Bedienung mittels physischer Eingabehilfen und für die einhändige Touchscreen-Bedienung erhoben werden.

Die Analyse der Bewertungsdaten zeigt, dass die Instandhalter die Griffformen 1 und 3 bevorzugen. Auf einer 7-stufigen Likert-Skala von A (sehr unbequem) bis B (sehr komfortabel) bewerteten die Instandhalter den Gesamtkomfort von Griff 1 mit  $M=5,00$  ( $SD=1,41$ ) und Griff 3 mit  $M=4,40$  ( $SD=1,54$ ) am besten, während Griff 2 mit  $M=2,27$  ( $SD=1,10$ )

deutlich schlechter bewertet wird. Die qualitative Inhaltsanalyse (Glaser/Strauss 1967) für das gesammelte Feedback und das Verbesserungspotential der Griffe unterstützt die quantitativen Ergebnisse des Fragebogens. In der Konzeption zeigte sich, dass die Nutzer eine Kombination aus der Größe von Griff 1 und der ergonomischen Gestaltung des Griffs 3 mittels Fingermulden bevorzugen.

### *Konkretisierung*

Aufgrund des hohen Einflusses der Griffform auf die Handhabung eines Assistenzsystems werden die drei Griffformen und die neu gestaltete, finale Griffform in der Konkretisierungsphase erneut nach dem gleichen Bewertungsansatz wie in der vorherigen Konzeption bewertet. Dadurch wird die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet.

Die deskriptive Auswertung der Fragebögen ( $n=15$ ) bestätigt eine bessere Bewertung des Gesamtkomforts für die Griffformen 1, 3 und den finalen Griff im Vergleich zu Griff 2. Dieser wird mit  $M=2,21$  ( $SD=0,58$ ) erneut deutlich schlechter bewertet. Die Daten zum wahrgenommenen Komfort bei einhändiger- und beidhändiger Handhabung zeigen interessante Unterschiede: Der finale Griff wird bei einhändiger Handhabung mit  $M=5,5$  ( $SD=1,40$ ), Griff 3 mit beidhändiger Bedienung mit  $M=6,21$  ( $SD=0,70$ ) am besten bewertet. Dieses Ergebnis ist auf die ergonomische Gestaltung der finalen Griffform zurückzuführen, die dem Benutzer mehr Halt im Umgang mit einer Hand bietet (Abbildung 4).

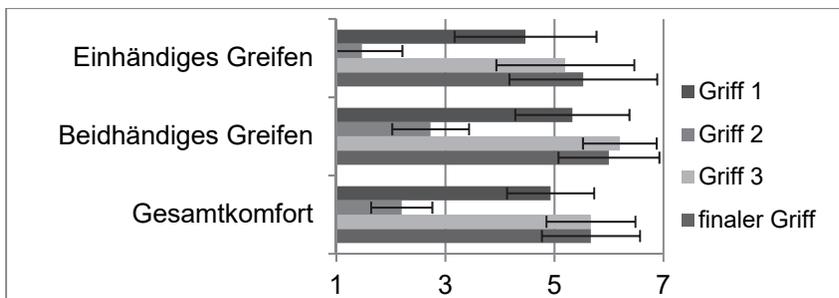


Abbildung 4: Evaluation des Gesamtkomforts der verschiedenen Griffvarianten.

Während die quantitativen Daten keine deutliche Verbesserung der finalen Griffvariante (Konkretisierungsphase) im Vergleich zu Griff 3 (Konzeptionsphase) aufweisen, zeigen die qualitativen Daten, dass die

befragten Instandhalter die finale Griffvariante aufgrund der vorhandenen Fingermulden und der anthropometrisch angepassten Griffform bevorzugen.

### *Implementierung*

Für die finale Evaluation wurde ein funktionsfähiger Prototyp entwickelt (Wächter et al. 2017), der einen Usability-Test in einem realen Instandhaltungsszenario mit potentiellen Nutzern ( $n=20$ ) gewährleistet. Um die Vergleichbarkeit der gestalteten tangiblen Mensch-Maschine-Schnittstelle mit einer herkömmlichen MMS zu gewährleisten, führten die Probanden den Usability-Test zweimal durch. In einem Within-Subject-Design testeten die Probanden randomisiert ein konventionelles Tablet oder den gestalteten Funktionsprototyp. Nach jedem Durchgang bewerteten die Instandhalter das getestete Endgerät mithilfe des System Usability Scale (SUS). Die Ergebnisse des SUS zeigen, dass die Instandhalter die nach der Engineering-Methode gestaltete tMMS mit  $M=88,75$  ( $SD=7,27$ ) im Vergleich zum konventionellen Tablet mit  $M=68,25$  ( $SD=11,73$ ) deutlich begünstigen ( $p < 0,01$ ).

Die subjektive Bewertung der gestalteten tangiblen Mensch-Maschine-Schnittstelle zeigt, dass die Engineering-Methode mit den identifizierten Verfahren und Werkzeugen die Anforderungen der Anwendungsdomäne erfüllt. Dieser nutzerzentrierte Ansatz ermöglicht es, in Zusammenarbeit mit potenziellen Nutzern eines Assistenzsystems eine gebrauchstaugliche tMMS für Assistenzsysteme zu gestalten und zu evaluieren. Um die Ergebnisse der subjektiven Bewertung zu bestätigen, wurde zusätzlich eine objektive Bewertung der vier Griffe durchgeführt.

### 4.3. Objektive Evaluation - Laborstudie

#### *Methodisches Vorgehen*

Für den Vergleich der subjektiven Wahrnehmung zum Komfort der verschiedenen Griffvarianten mit objektiven Messdaten, erfolgt eine Laborstudie mittels Oberflächen-Elektromyografie (EMG) zur Untersuchung der elektrischen Aktivität ausgewählter Muskeln während der Handhabung. Unter Berücksichtigung der Griffbewertungen in der Konzeptions- und Konkretisierungsphase adressiert die Laborstudie die einhändige Handhabung der Griffvarianten bei der Bedienung der Softwareoberfläche eines Tablets. Während der Auswertung halten die Teilnehmer ( $n=32$ , männlich, mittleres Alter: 31,6 Jahre, alle rechtshändig) das Tablet mit ihrer linken Hand, um es mit der dominanten rechten Hand zu bedienen. Nach dem Start der Versuchssoftware werden in zwei Runden zehn Zufallszahlen angezeigt, die der Proband über eine Tastatur

auf der Touch-Oberfläche (Pereira et al. 2013) eingibt. Eine Randomisierung der Ordnung nach dem lateinischen Quadrat (Sedlmeier/ Renkewitz 2008) berücksichtigt mögliche Sequenz- und Lerneffekte. Während des Experiments wurden die fünf Muskeln mittels EMG (Frequenz: 1500 Hz) gemessen, die in einem solchen Anwendungsszenario am stärksten belastet sind: Musculus biceps brachii (BB), M. flexor carpi ulnaris (FCU), M. flexor carpi radialis (FCR), M. brachioradialis (BR) und M. flexor pollicis brevis (FPB). Bevor die Probanden den ersten Versuchslauf begannen, wurde die maximale elektrische Aktivierung jedes Muskels bei maximaler Kontraktion (engl.: Maximum Voluntary Contraction, MVC) durch drei statische Messungen über jeweils drei Sekunden bestimmt. Die individuell bestimmte elektrische Aktivierung des jeweiligen Muskels während der MVC dient dabei als Grundlage, um während des Experiments aufgezeichnete EMG-Daten zu normalisieren und somit inter- und intraindividuell vergleichbar zu machen. Die normalisierten Werte stellen den prozentualen Anteil der elektrischen Aktivierung der Muskeln in Relation zur maximalen Aktivierung dar und liefern einen Indikator für die aktuelle Beanspruchung der einzelnen Muskeln in Abhängigkeit von der betrachteten Griffform (Bischoff et al. 2009). Nach einer dreiminütigen Erholungsphase starteten die Probanden mit der ersten Griffform. Für jeden Griff wurden drei Messungen mit zweiminütigen Ruhezeiten durchgeführt.

### *Statistische Analyse*

Für die statistische Analyse der aufgezeichneten Daten mit SPSS wurden diese im ersten Schritt bereinigt. Alle durch Boxplot identifizierte Ausreißer (dreifacher Interquartilsbereich) wurden extrahiert und der resultierende saubere Datensatz unter Verwendung einer RMANOVA mit anschließenden Bonferroni Post-hoc-Test untersucht. Die Ergebnisse der RMANOVA zeigen deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Griffformen. Ihre Freiheitsgrade wurden in Abhängigkeit von der Sphärizität nach Greenhouse Geisser korrigiert. Abhängig von den untersuchten Muskeln zeigt der Bonferroni Post-Hoc Test signifikante Unterschiede in der Muskelspannung zwischen den verschiedenen Griffarten.

### *Ergebnisse*

Die Unterschiede in der prozentualen Belastung des M. biceps brachii (BB) der Probanden zeigen interessante Ergebnisse. Griffvariante 2, beim subjektiv wahrgenommenen Komfort am schlechtesten bewertet, bewirkt mit  $M=12,93$  Prozent vom MVC ( $SD=7,21$ ) eine signifikant ( $p=0,01$ ) geringere Beanspruchung als die anderen Griffvarianten. Der BB ist ein großer Muskel des Oberarms, der aufgrund der Flexion für das

Halten des Tablets verantwortlich ist. Da die verwendeten Endgeräte einschließlich der Griffe das gleiche Gewicht besitzen, wird dieser Faktor ausgeschlossen. Mit dem gemessenen Beanspruchungsbereich im unteren Drittel (zwischen 12-18%) ist jedoch davon auszugehen, dass der subjektiv wahrgenommene Komfort der Griffe nur gering beeinflusst wird (Abbildung 5, niedrigere Werte sind besser).

Die Ergebnisse für den M. flexor carpi ulnaris (FCU) zeigen ähnliche Ergebnisse. Bei  $M=18,22$  ( $SD=7,5$ ) verursacht Griff 2 eine signifikant geringere Beanspruchung ( $p=0,01$ ,  $p=0,05$ ) des Muskels, was auf eine vergleichsweise höhere Ulnarabduktion bei den anderen Griffvarianten schließen lässt (Schünke et al. 2007).

Die Auswertung des M. flexor carpi radialis (FCR) zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Griffvarianten. Die signifikant ( $p=0,05$ ) geringere Beanspruchung des M. brachioradialis (BR) der finalen Griffvariante ( $M=11,82$ ,  $SD=7,09$ ) im Vergleich zur Griffvariante 2 ( $M=13,48$ ,  $SD=8,09$ ) kann eine veränderte Halbpronationsposition indizieren (Schünke et al. 2007), die eine Konsequenz der unterschiedlichen Griffform ist, aber keinen signifikanten Unterschied in der subjektiven Komfortbewertung anzeigt.

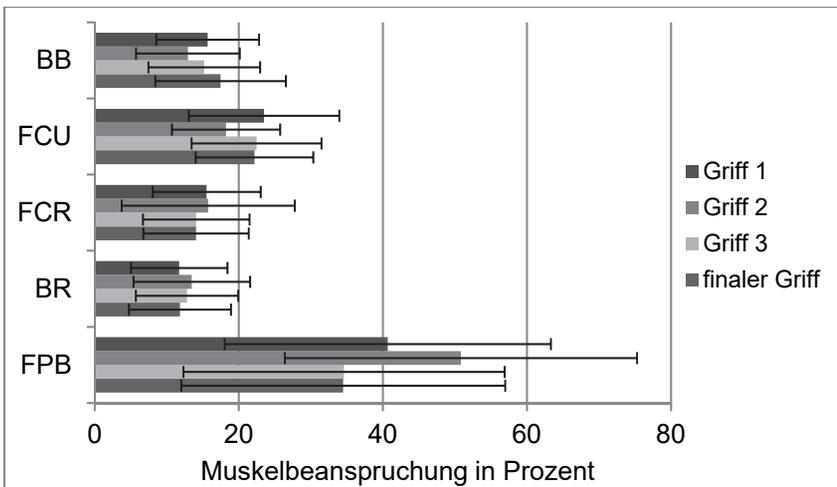


Abbildung 5: Beanspruchung der Muskeln bei einhändiger Handhabung.

In den Ergebnissen des M. flexor pollicis brevis (FPB), der für die Greifbewegung der Hand verantwortlich ist, zeigen die Probanden bei Griffvariante 2 eine signifikant höhere Beanspruchung ( $M=50.84$ ,  $SD=24.45$ ) im Vergleich zu den in der subjektiven Komfortwahrnehmung am besten bewerteten Griffvarianten 3 und 4 ( $p=0,001$ ). Der direkte Einfluss dieses Muskels auf das Halten der Griffe und die hohen Unterschiede in der Beanspruchung von etwa 15 Prozent deuten, vorbehaltlich weiterer Untersuchungen, auf einen direkten Zusammenhang mit der subjektiven Komfortbeurteilung durch den CQH und dem qualitativen Feedback der Nutzer hin.

Die Ergebnisse des Laborexperiments zeigen, dass die subjektiven Ergebnisse auch objektiv reproduziert werden können und die in der Engineering-Methode eingesetzten Methoden und Werkzeuge valide Aussagen über die ergonomische Gestaltung von Griffen zulassen. Zusammenfassend zeigt der eingesetzte Methodenmix, dass die Einbeziehung von qualitativen Rückmeldungen für eine nutzerzentrierte Produktgestaltung unbedingt notwendig ist, da die Verbesserungsvorschläge der Anwender über einen Fragebogen schwer zu ermitteln sind und andernfalls die Planer und Entwickler nicht erreichen würden und dadurch unbemerkt blieben.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Die In-situ-Anwendung der Engineering-Methode zur Gestaltung einer gebrauchstauglichen tMMS für ein mobiles Assistenzsystem in der Instandhaltung zeigt:

- dass die Engineering-Methode verschiedene Verfahren und Werkzeuge zur Analyse der Anforderungen und des Entwurfs der Funktionen bereitstellt, die geeignet sind, um die Bedürfnisse und Anforderungen der Anwender sowie die Anforderungen, die sich aus dem Anwendungskontext ergeben, umfassend und effizient zu erfassen,
- dass die Gestaltung der Griffe für ein Assistenzsystem einen wesentlichen Einfluss auf die Wahrnehmung des Nutzerkomforts hat und sich somit auf die Akzeptanz des Gesamtsystems auswirkt,
- dass die vorgeschlagenen Verfahren und Werkzeuge zur Evaluation im Rahmen der vier Phasen des Entwicklungsprozesses erfolgreich umgesetzt werden können. Darüber hinaus liefern sie wichtige Erkenntnisse von zukünftigen Nutzern für die nachfolgende Phase.

Die Auswertung des entworfenen Artefakts verdeutlicht, dass die in der Engineering-Methode eingesetzten Verfahren und Werkzeuge die Anforderungen der Planer und Entwickler erfüllen. Die Instanziierung am Beispiel des mobilen Assistenzsystems für Instandhalter beweist, dass der nutzerzentrierte Ansatz die Gestaltung und Evaluation einer subjektiv und objektiv gebrauchstauglichen tMMS von Assistenzsystemen in Zusammenarbeit mit potenziellen Nutzern ermöglicht.

Der aus der Instanziierung der Engineering-Methode resultierende Funktionsprototyp wird von den Nutzern als hochgebrauchstauglich wahrgenommen und wird signifikant besser als am Markt verfügbare Endgeräte bewertet.

Kostengünstige Prototyping-Technologien wie 3D-Druck ermöglichen schnelle Gestaltungs- und Evaluationszyklen innerhalb der einzelnen Ablaufphasen und sind somit auch für KMU von hoher Bedeutung. Planer und Entwickler sowie Anwender können ihre Anforderungen an die reale tMMS schon in frühen Phasen bzw. während des gesamten Gestaltungsprozesses überprüfen und erhalten damit die Möglichkeit, Nutzeranforderungen ressourcenschonend über den gesamten Gestaltungsprozess hinweg zu integrieren, und eine hohe Gebrauchstauglichkeit der tangiblen MMS sicherzustellen.

Zur empirischen Evaluation der Engineering-Methode erfolgte die Instanziierung in der Anwendungsdomäne Instandhaltung. Dabei wurde die tangible MMS eines mobilen Assistenzsystems für Instandhalter gestaltet. Die Ergebnisse der iterativen Evaluation zeigen, dass die mit Hilfe der Engineering-Methode erstellte tMMS mittels CQH und SUS signifikant besser von Instandhaltern wahrgenommen wird, als aktuell verfügbare mobile Endgeräte. Objektive Daten aus der Messung der Muskelaktivität mittels EMG während der Handhabung eines Tablets mit verschiedenen Griffvarianten bestätigen diese Ergebnisse. Der resultierende Funktionsprototyp aus der Instanziierung, stellt eine Basis für gebrauchstaugliche mobile Geräte in einem industriellen Kontext dar und wird als hochgebrauchstauglich eingestuft. Daher kann die vorgeschlagene Engineering-Methode als einer der ersten umfassenden Ansätze betrachtet werden, der alle Aspekte der Analyse, Gestaltung, Prototyping und Evaluation von tMMS - insbesondere für IoT-Geräte in Produktionsumgebungen - abdeckt.

Nichtsdestoweniger besteht ein zusätzlicher Forschungsbedarf in der Fortsetzung der Erprobung der Engineering-Methode an weiteren Beispielen. Zusätzliches Potenzial liegt in der Anwendung der Engineering-Methode in anderen Anwendungsdomänen bspw. zur Gestaltung von tangiblen Mensch-Maschine-Schnittstellen bei Assistenzsystemen für

spezielle Interessengruppen wie Senioren und Menschen mit Behinderungen sowie tMMS in bestimmten Nutzungsszenarien, z.B. im Fahrzeug oder im Sport. Bei einer Eignung der eingesetzten Verfahren und Werkzeuge auch außerhalb der Domäne Produktion bestände durch den kostengünstigen Einsatz der 3D-Prototyping-Verfahren die Möglichkeit, die Engineering-Methode in der aufstrebenden Gründer- und Maker-Szene zu etablieren und den Stellenwert der Produktergonomie wirksam zu stärken.

## Literatur

- Bischoff, C., Schulte-Mattler, W. J., Conrad, B. (2009). Das EMG-Buch: EMG und periphere Neurologie in Frage und Antwort (2. Aufl.). Thieme e-book library. Stuttgart: Thieme.
- Boivie, I., Gulliksen, J., Göransson, B. (2006). The lonesome cowboy: A study of the usability designer role in systems development. *Interacting with Computers*, Vol. 18 (4), S. 601–634.
- Bruno, V., Dick, M. (2007). Making usability work in industry. In: B. Thomas (Hrsg.): *Conference of the computer-human interaction special interest group (CHISIG) of Australia* (S. 261–270).
- Chilana, P. K., Ko, A. J., Wobbrock, J. O., Grossman, T., Fitzmaurice, G. (2011). Post-deployment usability. In: D. Tan, G. Fitzpatrick, C. Gutwin, B. Begole, und W. A. Kellogg (Hrsg.): *The 2011 Annual Conference* (S. 2243).
- DIN EN 894-3 (2010). Berlin: Beuth Verlag.
- Glaser, B. G., Strauss, A. L. (1967). *The discovery of grounded theory: Strategies for qualitative research. Observations*. Chicago: Aldine Pub. Co.
- Glende, S. (2010). *Entwicklung eines Konzepts zur nutzergerechten Produktentwicklung - mit Fokus auf die "Generation Plus"*. Dissertation. Berlin.
- Gorecky, D., Schmitt, M., Loskyll, M. (2017). Mensch-Maschine-Interaktion im Industrie 4.0-Zeitalter. In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, und M. t. Hompel (Hrsg.), *Handbuch Industrie 4.0 Allgemeine Grundlagen*. Allgemeine Grundlagen (Vol. 4, S. 219–236). Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Hemmerling, S. (2002). Evaluation in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses am Beispiel von Gebrauchsgütern. In: K.-P. Timpe und R. Baggen (Hrsg.), *Mensch-Maschine-Systemtechnik. Konzepte, Modellierung, Gestaltung, Evaluation* (2nd ed., S. 299–317). Düsseldorf: Symposion.
- Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., Ram, S. (2004). Design Science in Information Systems Research. *MIS Quarterly*, Vol. 28 (1), S. 75–105.

- Kuijt-Evers, L. F. M., Vink, P., de Looze, M. P. (2007). Comfort predictors for different kinds of hand tools: Differences and similarities. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 37 (1), S. 73–84.
- Norman, D. A. (2013). *The design of everyday things* (Revised and expanded edition): Basic Books.
- Pereira, A. L., Miller, T., Huang, Y.-M., Odell, D., Rempel, D. (2013). Holding a tablet computer with one hand: effect of tablet design features on biomechanics and subjective usability among users with small hands. *Ergonomics*, Vol. 56 (9), S. 1363–1375.
- Scheer, A.-W. (2013). *Industrie 4.0: Wie sehen Produktionsprozesse im Jahr 2020 aus?*: IMC AG.
- Schmitt, M., Meixner, G., Gorecky, D., Seissler, M., Loskyll, M. (2013). Mobile Interaction Technologies in the Factory of the Future. *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 46 (15), S. 536–542.
- Schröder, C. (2016). Herausforderungen von Industrie 4.0 für den Mittelstand. *Gute Gesellschaft - soziale Demokratie #2017plus*.
- Schünke, M., Schulte, E., Schumacher, U., Voll, M., Wesker, K. (2007). *Prometheus - Lernatlas der Anatomie: Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem* (2., überarb. und erw. Aufl.). Stuttgart [u.a.]: Thieme.
- Sedlmeier, P., Renkewitz, F. (2008). *Forschungsmethoden und Statistik in der Psychologie*. PS Psychologie. München [u.a.]: Pearson Studium.
- Specht, D., Lutz M. (2008). Outsourcing von F&E. *Entwicklungsperspektiven für KMU*. In Specht (eds) *Produkt- und Prozessinnovationen in Wertschöpfungsketten* (S. 33-55). Wiesbaden: Gabler Verlag.
- van Eijk, D., van Kuijk, J., Hoolhorst, F., Kim, C., Harkema, C., Dorrestijn, S. (2012). Design for Usability; practice-oriented research for user-centered product design. *Work* (Reading, Mass.), Vol. 41 Suppl 1, S. 1008–1015.
- van Kuijk, J., Kanis, H., Christiaans, H., van Eijk, D. (2015). Barriers to and Enablers of Usability in Electronic Consumer Product Development: A Multiple Case Study. *Human-Computer Interaction*, Vol. 32 (1), S. 1–71.
- Venable, J., Pries-Heje, J., Baskerville, R. (2012). A Comprehensive Framework for Evaluation in Design Science Research. In: K. Peffers, M. A. Rothenberger, und B. Kuechler (Hrsg.): *Lecture Notes in Computer Science, Design Science Research in Information Systems. Advances in Theory and Practice. Proceedings of the 7th International Conference of Design Science Research in Information Systems and Technology* (S. 423–438). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Vredenburg, K., Mao, J.-Y., Smith, P. W., Carey, T. (2002). A survey of user-centered design practice. In: D. Wixon (Hrsg.): *the SIGCHI conference* (S. 471).
- Wächter, M. (2018). *Engineering-Methode zur Gestaltung gebrauchstauglicher tangibler Mensch-Maschine-Schnittstellen für Planer und Entwickler von Produktionsassistenzsystemen*. Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme: Heft 127. Chemnitz.

- Wächter, M., Bullinger, A. C. (2016). Gestaltung gebrauchstauglicher tangibler MMS für Industrie 4.0 – ein Leitfaden für Planer und Entwickler von mobilen Produktionsassistenzsystemen. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, Vol. 70, (2), S. 82–88. doi:10.1007/s41449-016-0020-0
- Wächter, M., Neumann, C., Bullinger, A. C. (2017). Internet of Things für KMU: Low-Cost-Prototypen zur Realisierung der Digitalisierung in KMU. In: N. Gronau (Hrsg.), *Schriftenreihe der Wissenschaftliche Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation (WGAB) e.V. Industrial Internet of Things in der Arbeits- und Betriebsorganisation*. Berlin: GITO mbH Verlag.



# Beitrag zur Strukturplanung und -absicherung der Smart Factory

Bewältigung exogener und endogener Komplexität in der vernetzten, adaptiven Produktion

Samuel Horler, Egon Müller

Professur Fabrikplanung und Fabrikbetrieb, Institut für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme, Technische Universität Chemnitz

## 1. Einleitung und Problemaufriss

Bereits in der Vergangenheit sahen sich produzierende Unternehmen Makrotrends gegenübergestellt, welche entscheidende Einflüsse auf die Art und Rahmenbedingungen der Produktion ausübten. Neben einigen nur temporär relevanten Trends, wurden als wesentliche Veränderungstreiber in jüngerer Vergangenheit insbesondere die weiter voranschreitende Globalisierung, die hohe Volatilität und Dynamik der Märkte sowie ein Wertewandel hin zur Individualisierung und Nachhaltigkeit identifiziert (Grundig 2018, Schenk et al. 2014).

Auch kleine und mittlere Unternehmen, deren Anteil mit 98,2 Prozent den Großteil des deutschen produzierenden Gewerbes ausmacht, müssen auf diese langfristige Einflüsse hoch flexibel reagieren (Söllner 2016, Statistisches Bundesamt 2017). Dabei kommt dem Mittelstand in Deutschland eine entscheidende Rolle im nationalen und internationalen Wirtschaftsgeschehen zu. Mittelständische Unternehmen sind geprägt durch Flexibilität, schnelle Anpassungsfähigkeit an den Markt, kurze Entscheidungswege und Nähe zum Kunden. (BVMW 2018) Gerade der Mittelstand ist mit seiner starken Vernetzung dem wachsenden globalen Wettbewerbsdruck sowie den kürzeren Produktlebenszyklen ausgesetzt, um mit individuellen Produkten auf die sich ständig verändernde Nachfrage reagieren zu können. Disruptive Veränderungen im Markt verringern zudem die langfristige Planbarkeit des Kundenbedarfes sowie Kooperationen im Produktionsnetz. Damit steigen die Anforderungen an den Mittelstand an dessen Flexibilität und Effizienz ständig an. (Wolff/Göbel 2018) Bedingt durch eine vergleichsweise geringe Finanzkraft ist es umso essenzieller, die wirtschaftliche Auswirkung sowie den potenziellen Nutzen dieser Veränderungen im Unternehmen vorab

beurteilen zu können, um die Gefahr von Fehlentscheidungen zu minimieren.

In jüngerer Vergangenheit wird die digitale Transformation der Wertschöpfung auch im Mittelstand als der wesentliche Lösungsansatz für diese Herausforderungen angesehen (Kagermann et al. 2012, Vogel-Heuser et al. 2017). Mit dem Schlagwort 'Industrie 4.0' wurde ein Zukunftsprojekt initiiert, welchem bereits durch das Synonym 'Vierte industrielle Revolution' die nötige Signifikanz beigegeben wurde. Die Industrie 4.0 wird durch die freie und selbstständige Vernetzung aller beteiligten Instanzen der Wertschöpfungskette charakterisiert. Im Kern zeichnet sich diese durch den Umgang mit hoch individuellen Kundenprodukten sowie durch die Selbstorganisation der cyber-physischen Fabrikobjekte (CPS) aus (Gruhn 2016, Lucke/Dominik 2013). Folglich erfassen Fertigungsobjekte und Logistiksysteme quasi in Echtzeit ihre Umwelt und organisieren ihre Beziehungen ohne menschliche Eingriffe weitgehend selbst (Gruhn 2016). Der Mensch nimmt indes immer mehr die Rolle des Problemlösers auf allen Ebenen der Fabrik ein (Lucke & Dominik 2013).

Ein zentrales Konzept, das den Ort der zukünftigen Wertschöpfung beschreibt, ist die ‚Smart Factory‘, welche sich durch eine vernetzte, adaptive und selbstorganisierte Produktion auszeichnet. Es wird ein Produktionssystem definiert, welches die Optimierung des Fabrikbetriebs durch Verbesserung und Beschleunigung der Kommunikation anstrebt und gleichzeitig den Menschen bei der Ausführung seiner Aufgaben kontextbezogen unterstützt. (Lucke/Dominik 2013) Dieses Verhalten ermöglicht es, den Anforderungen nach hoch individualisierten Kundenprodukten bei gleichzeitig hohen Stückzahlen zu begegnen. Der klassische Produktlebenszyklus verringert sich im Extremfall so weit, dass er nur noch ein individuelles Produkt umfasst. Die daraus folgende Verkürzung der Prozesslebenszyklen wird durch die Selbstorganisation der Smart Factory realisiert, wodurch ebenfalls die Fabrikausrüstung (Fabriklebenszyklus) beeinflusst wird.

Die anhaltende intensive wissenschaftliche aber auch praxisorientierte Forschung und Umsetzung der vierten industriellen Revolution beinhaltet eine Vielzahl von Facetten, vorangetrieben durch verschiedenste Fachdisziplinen. Getrieben von der Informationstechnik sowie Vorreiter-Branchen, können viele technische Lösungen als marktreif bewertet werden und finden zumindest punktuell Einsatz in der industriellen Praxis. Insbesondere auf den Gebieten des Wissens- und Kompetenzmanagements sowie den Mensch-Maschine-Schnittstellen wird die hu-

manzentrierte Forschung forciert. Gronau stellt dazu beispielsweise diverse Kompetenz-Facetten für Industrie 4.0 zusammen (Gronau et al. 2017).

Nicht nur die Betriebsphase, sondern auch die Planung und Organisation der Produktionsstätte wird von diesen einschneidenden Veränderungen betroffen sein. Es resultieren zahlreiche neuartige Anforderungen, welche durch klassische Planungsvorgehen nicht abgedeckt werden können. (Aurich et al. 2015, Horler/Müller 2017) Die folgenden Ausführungen besitzen somit für eine Vielzahl produzierender Unternehmen Relevanz und insbesondere für den Mittelstand, der im besonderen Maße darauf angewiesen ist, permanent den externen Marktanforderungen durch die optimale Gestaltung der Produktion zu begegnen.

Ziel des Beitrags ist es, ausgehend von neuartigen Anforderungen an das Planen und Betreiben der Fabrik, einen Ansatz vorzustellen, mit dem zukünftig über den Lebenszyklus der Produktion hinweg, insbesondere die anforderungsgerechte Gestaltung der Fabrikstruktur abgesichert werden kann. Dazu werden diese neuen Herausforderungen an die Fabrikstruktur auf der Basis der theoretischen Grundlagen in Abschnitt 2 identifiziert, insbesondere unter dem Aspekt interner und externer Komplexitätstreiber. Anschließend gibt Abschnitt 3 einen kompakten Überblick über den vorherrschenden Stand der Wissenschaft. In Abschnitt 4 wird eine systemische Beschreibung der Smart Factory Fabrikstruktur zur Verfügung gestellt. Der sich im Abschnitt 5 anschließende Lenkungsansatz zur Absicherung der Fabrikstruktur bildet den Kern des Beitrags. Der Beitrag schließt mit einem Fazit sowie der Identifikation des weiteren Forschungsbedarfs.

## 2. Komplexitätsausprägungen in der Fabrikstruktur der Smart Factory

### 2.1. Die Fabrikstruktur in Planung und Betrieb

Im allgemeinen Sinn zielt die Fabrikplanung darauf ab, die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens durch eine dem Kundennutzen zuträglichen Wertschöpfung zu sichern (Schmigalla 1995). Die Fabrikplanung dient damit der Gestaltung des Objektbereiches 'Fabrik' selbst, während der Fabrikbetrieb die Gestaltung und Lenkung der Leistungserstellung im Fokus hat. Theoretische Grundlage ist das Verständnis der Fabrik als komplexes soziotechnisches System, welches sich durch den Systemzweck von seiner Umwelt abgrenzt (Schenk et al. 2014). Aus mengentheoretischer Sicht lassen sich die Hauptaktivitäten der Produktionssystemplanung aus der Gleichung  $\sum = (M, P, S)$  ableiten. Dabei gilt

es, die für die Produktionsaufgaben notwendigen Prozesse (P) zu identifizieren und charakterisieren, welche über die zu dimensionierende Elementmenge (M) die Struktur in Sinne von zweistelligen Relationen (S) bilden (Schenk et al. 2014, Schmigalla 1995). Die sich darauf zurückzuführenden Aktivitäten sind der Ausgangspunkt für die Analyse, Bewertung und Gestaltung von Fabriken.

Der Fabrikbetrieb hat dagegen das Ziel, die effiziente Ablauforganisation zu gestalten, d.h. er muss eine dem Kundenwunsch entsprechende effiziente Produktion von Gütern in vernetzten Leistungseinheiten wirtschaftlich realisieren und ist damit maßgeblich verantwortlich für die in der Fabrikplanung geschaffenen Potenziale. (Riedel 2012, Schenk et al. 2014) Dies verdeutlicht zugleich, dass die Aufgaben der Fabrikplanung nicht mit der Finalisierung der Planungsergebnisse abgeschlossen ist, sondern in Sinne der gesamthaften Betrachtung des Fabriklebenszyklus auch in der Betriebsphase Rückkopplungen einzubauen sind, die Planungsbedarf generieren, um neue Potenziale zur Verfügung zu stellen. Fabrikplanung und -betrieb sind demnach als Einheit zu verstehen (Eversheim/Schuh 1999). Der Mensch als Problemlöser und Entscheidungsträger ist in diesem Prozess der Potenzialbildung die entscheidende Instanz. Gegebene Probleme sind in diesem Zusammenhang immer dort zu lösen, wo auch die dafür nötige Kompetenz vorhanden ist (Riedel 2012).

Planungsschwerpunkte stellen die Grob- und Strukturplanung dar, in welchen der eigentliche Lösungsentwurf der Fabrik erarbeitet wird und damit der innovative, schöpferisch-gestalterische Schwerpunkt im Fabrikplanungsprozess zu finden ist (Grundig 2018). Der vorliegende Beitrag rückt die Struktur des Fabriksystems in den Fokus der Betrachtung. Eine einheitliche Definition des Begriffes ‚Fabrikstruktur‘ besteht in der Fachliteratur nicht. In diesem Beitrag wird der Definition der Autoren Kobylka und Hildebrand gefolgt, nach welchen die Fabrikstruktur die Art und Anzahl der technischen und personellen Ressourcen eines Fabriksystems sowie deren zeitlichen und räumlichen Relationen untereinander beschreibt (Hildebrand 2005, Kobylka 2000) Daraus resultiert die gezielte Auslegung, welche folgende Inhalte zum Schwerpunkt hat:

- Einsatz von Fertigungstechnologien
- Dimensionierung der Ressourcen
- Zeitliche Struktur (Prozesse)
- Räumliche Struktur (Layouts)

Aufgrund ihres hohen Umfangs, der Vielseitigkeit sowie der Mitwirkung mehrerer Disziplinen, haben sich verschiedene klassische und jüngere Planungsansätze und -vorgehen in der Praxis bewährt. Allen diesen Ansätzen ist gemein, dass zur Strukturierung und Komplexitätsbeherrschung der Fabrikplanungsprozess in verschiedene Teilphasen unterteilt wird. Schuh liefert eine Zusammenstellung verschiedener Planungsvorgehen (Schuh et al. 2007).

## 2.2. Exogene und endogene Komplexität und Dynamik im Untersuchungsbereich

Das Komplexitätsphänomen wurde bereits in der Vergangenheit in unterschiedlichen Wissenschaftsgebieten erforscht sowie Ansätze zum Umgang mit komplexen Situationen entwickelt. Eine einheitliche Definition des Komplexitätsbegriffes existiert jedoch nicht (Malik 2009). Komplexe Handlungssituationen zeichnen sich stets durch die Komplexität der Gegebenheit selbst, durch die Vernetzung, Intransparenz sowie durch die Dynamik der Situation aus (Dörner 2005).

In der Literatur existieren zwei Richtungen, mit denen die Komplexität beschreiben und bewerten lässt. Die strukturelle Perspektive fokussiert die Anzahl der Systemelemente sowie die Beziehungen zwischen diesen. Die informatorische Perspektive hingegen misst die Komplexität in der Menge an Informationen, die für die Beschreibung des Systems benötigt werden. Daraus resultiert die Varietät, welche die Anzahl unterscheidbarer Zustände beschreibt, die ein System annehmen kann (Malik 2015). Auch Patzak unterscheidet die Komplexität als Merkmal der Systemstruktur in folgende Aufgliederung (Patzak 1982):

- Varietät
  - Arten von Elementen (Unterschiedlichkeit)
  - Anzahl von Elementen (Elementmenge)
- Konnektivität
  - Art der Beziehungen (Beziehungsinhalt)
  - Anzahl von Beziehungen (Verknüpfungsdichte)

Nach dem Gesetz von Ashby kann ein System mit einer gegebenen Komplexität nur mit einem mindestens ebenso komplexen System kontrolliert werden (Ashby 1970). Dieses Gesetz der erforderlichen Varietät besagt demnach, dass Systeme zur Beherrschung und Lenkung von Komplexität ebenso viele Zustände wie das Originalsystem bereithalten müssen. Die Disziplin des Komplexitätsmanagements befasst sich mit dem

Umgang mit Komplexität und stellt Basisstrategien für die Vermeidung, Reduzierung sowie Beherrschung von Komplexität bereit.

Generell findet eine Unterscheidung des Komplexitätsursprungs in eine aus dem inneren Verhalten (endogene) sowie in eine von außen induzierte (exogene) Komplexität statt. Systeme müssen mit beiden Arten umgehen können (Grübner 2007). Dabei werden Systeme als am produktivsten angesehen, wenn sie sich am 'Edge of Chaos' befinden. Dieser Punkt manifestiert sich in der Balance zwischen Produktivität und Flexibilität der Unternehmensgestaltung (Beer 1995).

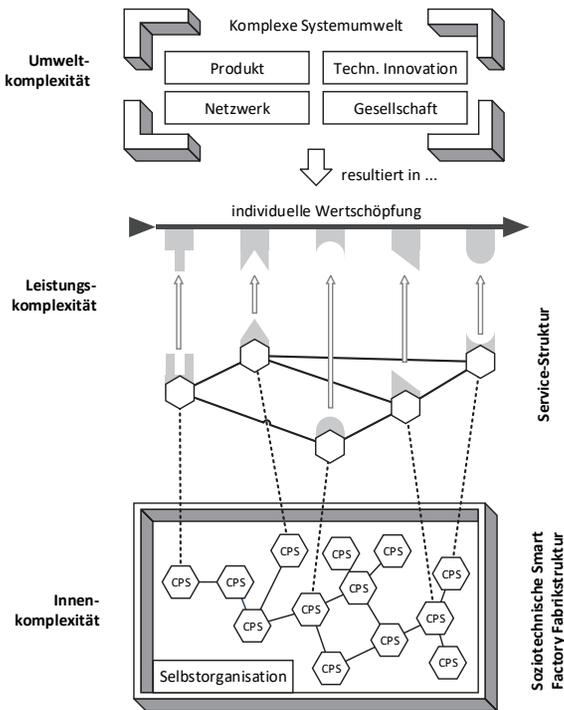


Abbildung 1: Endogene und exogene Komplexität der Fabrikstruktur.

Auf das Fabrikssystem wirken drei Komplexitätstreiber (Abbildung 1). Hervorgerufen durch die angedeuteten Trends und Einflüsse des Umfeldes einer Fabrik, entsteht im Schwerpunkt eine Komplexität und Dynamik bzgl. der Produktvarianz (z.B. Kundenindividualität), neuer technologischer Innovationen (z.B. Fertigungstechnologien), der Zusam-

menarbeit im Produktionsnetzwerk (z.B. neue Partner) sowie als Resultat gesellschaftlicher Einflüsse (z.B. Wertewandel). Diese Umweltkomplexität mündet in einer benötigten Leistungskomplexität, welche an die Funktionen der Fabrik, repräsentiert durch die angebotenen Dienste der Smart Factory, gestellt werden. Es gilt demnach eine Dienste-Struktur bereitzustellen, die den komplexen und dynamischen Anforderungen einer individuellen Wertschöpfung gewachsen ist. Aus den Anforderungen dieser Dienste folgt deren Umsetzung in der eigentlichen physischen Fabrikstruktur. Im Sinne des Smart Factory Ansatzes, kommen dabei soziotechnische CPS zum Einsatz, die durch einen definierten Grad an Selbstorganisation eine adaptive Fertigung realisieren und damit die eigentliche Fertigungssteuerung der Produkte an Bedeutung verliert. Neben der statischen Strukturkomplexität entsteht so zusätzlich eine aus diesen autonomen Einheiten resultierende Verhaltenskomplexität. Die Kombination wird hier als Innenkomplexität bezeichnet.

Als Teilwissenschaft der Systemtheorie, versteht sich die Kybernetik als Wissenschaft der Steuerungsmechanismen für die Beherrschung von komplexen Systemen. Auch als wissenschaftliche Lehre von dynamischen Systemen aller Art bezeichnet, werden drei Arten von Lenkungsmechanismen unterschieden (Bäcker 2002):

- Steuerung
- Regelung
- Anpassung

Innerhalb der Unternehmens- und Managementkybernetik findet diese Wissenschaft Anwendung auf das System des Unternehmens sowie auf die Aufgabe des Managements zur Lenkung der Unternehmung mit dem primären Ziel der Komplexitätsbeherrschung (Malik 2015). Im Kontext der aufgeführten Problemstellung gilt es folglich einen Ansatz für den Umgang mit der Komplexität und Dynamik der Fabrikstruktur zu entwickeln. Nicht nur das Fabrikssystem selbst kann als komplex und dynamisch charakterisiert werden, sondern auch die Planungs- und Entscheidungssysteme sind mit diesen Eigenschaften auszustatten. Diese sind in eine dynamische und komplexe Umwelt eingebettet und müssen auf diese reagieren, um das Systemüberleben zu sichern (Riedel 2012).

Traditionell wird die Kybernetik in eine erste und zweite Ordnung unterschieden. Innerhalb der ersten Ordnung steht der Manager außerhalb des Systems, d.h. Ziele werden von außen vorgegeben. Innerhalb der zweiten Ordnung ist der Manager selbst Teil des Systems. (Schwaninger 1994) Bei der Lenkung der Smart Factory kann von einer Betrachtung

zweiter Ordnung ausgegangen werden, was bedingt, dass im Gegensatz zu rein technischen Systemen in derartigen sozialen Systemen auch Themen der Gestaltung und Entwicklung des Managements eine Rolle spielen (Schwaninger 1994). Das heißt, auch das Fabrikssystem der Smart Factory darf nicht als stabiler technischer Zustand verstanden werden, sondern ist soziotechnisch kontinuierlich an gegebene Bedingungen anzupassen und zu optimieren. Zur Bewältigung des erhöhten Veränderungsbedarfes sind technische und organisatorische Potenziale von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit notwendig.

Mit der Komplexität und Dynamik des Smart Factory Systemverhaltens steigt auch der Bedarf an Informationen über Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge aktueller Zustände und alternativer Entscheidungen. Durch die teilweise Abgabe von Tätigkeiten der Fertigungssteuerung an die sich selbst organisierenden Fabrikobjekte sind diese Zusammenhänge nicht mehr direkt sichtbar, sondern müssen durch neue Ansätze der Prozessanalyse untersucht werden. Information wird also zum wesentlichen Produktionsfaktor. Unsicherheiten lassen sich auf den Mangel an Informationen zurückführen, der mit zunehmender Komplexität und wachsender Dynamik im Zusammenhang steht (Bäcker 2002).

### 2.3. Legitimation für Handlungsbedarf und Anforderungen

Im turbulenten Umfeld zeichnet sich die Produktionsaufgabe durch eine hohe Komplexität und Dynamik aus. Mit dem Ansatz der Industrie 4.0 wird in der Smart Factory versucht, mittels dezentraler autonomer Einheiten eine selbstorganisierte Fertigungssteuerung zu realisieren. Für die Kombination aus interner und externer Komplexität und Dynamik genügen klassische planende und steuernde Aktivitäten nicht, um über den Lebenszyklus hinweg den resultierenden Veränderungsbedarf zu leisten.

Der Charakter des Fabriksystems wird sich durch diese veränderte Art der Produktion entscheidend wandeln – ein neues Verständnis der Strukturelemente sowie des gesamten Systems sind nötig. Dabei gewinnt insbesondere die technische Struktur an Autonomie, sodass direkt steuernde Eingriffe des Menschen in die Produktion an Bedeutung verlieren. Vielmehr agiert der Mensch als Problemlöser innerhalb eines komplexen Systems.

In der Vergangenheit stand bei der Betrachtung der Fabrikstruktur die Neu- bzw. Umplanung lediglich im Fall von entscheidenden Veränderungen an. Im Gegensatz zu diesem statischen Charakter, bedarf es in Zukunft eines Managements der kontinuierlichen Potenzialkontrolle und -adaptation. Damit muss die Planung aus kybernetischer Sicht in ein

umfassendes Management eingebunden werden, welches den Wandel des Objektbereiches sowie der eingesetzten Methoden als festen Aufgabenbestandteil ansieht. Das Ziel und der Handlungsbedarf bestehen demnach darin, ein Managementsystem für die Absicherung der Fabrikstruktur zu konzipieren, welches die Lenkung, Gestaltung und Entwicklung dieser komplexen und dynamischen Produktion ermöglicht. Dabei sollten von den einzelnen angebotenen Services bis hin zu einer langfristigen Ausrichtung operative, taktische und strategische Perspektiven Berücksichtigung finden. Es sollen mittelständische Unternehmen im komplexen, volatilen Umfeld die anforderungsgerechte Gestaltung des Fabriksystems zu gewährleisten, durch:

- frühzeitiges Erkennen externer Entwicklungen,
- Bewertung und Integration dieser Entwicklungen in die strategische Strukturplanung sowie
- Umsetzung und Aufrechterhaltung der cyberphysischen Fabrikstruktur.

Im Detail resultieren Anforderungen aus den Aspekten Mensch, Technik, Organisation sowie bzgl. der Methodik. Abbildung 2 gibt einen Überblick über Kernanforderungen, die an ein System für die Absicherung der Smart Factory Fabrikstruktur gerichtet sind.

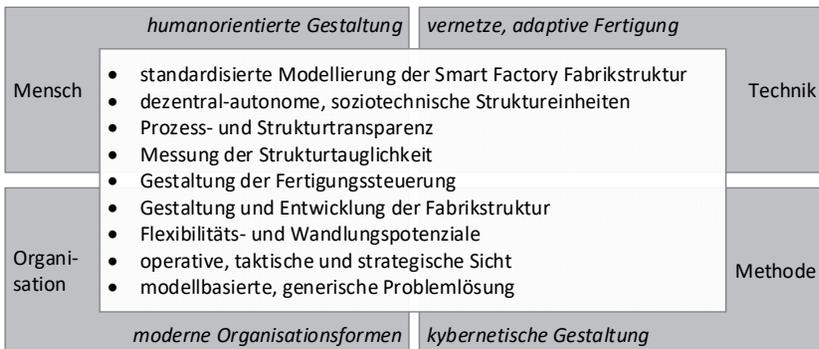


Abbildung 2: Kernanforderungen an ein System zur Absicherung der Smart Factory Fabrikstruktur.

### 3. Stand der Wissenschaft

Die dargestellten Anforderungen verlangen eine umfassende Analyse des aktuellen Standes der Wissenschaft. Nachfolgend sollen exemplarische Aspekte aus den Wissenschaftsgebieten der Fabrikplanung, des Komplexitätsmanagements sowie der digitalen Transformation herausgegriffen werden.

Die Smart Factory ist ein neuartiger Typ der Produktion, welcher sich durch eine umfassende Vernetzung und Informationsaustausch sowie autonom agierender Fabrikobjekte auszeichnet, durch welche die Realisierung kundenindividueller Produkte bei gleichzeitiger Effizienzsteigerung gefördert wird. Die klassische Fertigungssteuerung verliert an Bedeutung (acatech 2013). Etablierte Vorgehen der Fabrikplanung berücksichtigen die an sie gestellten neuen Anforderungen nicht. Es kann demnach nicht garantiert werden, dass die Fabrikstruktur über den Fabriklebenszyklus hinweg den gestellten Anforderungen genügt (Gronau 2015, Horler/Müller 2017). Zudem liegt ein starker Fokus auf definierten Planungsphasen sowie vorgegebenen Abläufen (Aurich et al. 2015). Jüngere Ansätze berücksichtigen zwar einen iterativen oder modularen Planungsablauf, betrachten jedoch keine autonom agierenden, sozio-technischen Fabrikobjekte sowie eine funktions- und hierarchieübergreifende Lenkung.

Mit dem Ansatz der Wandlungsfähigkeit wird versucht, Wandlungs- und Flexibilitätspotenziale für die Abfederung von externen und internen Einflüssen abzubilden. Aus technischer Sicht wird dies beispielsweise durch den Plug&Produce-Ansatz erreicht (Hildebrand 2005). Methodisch wird durch den Ansatz von Hernández die Szenario-Technik verwendet, um zukünftige Handlungsszenarien zu identifizieren, zu bewerten und die Wandlungspotenziale daran auszurichten (Hernández 2003). Jentsch überträgt die Wandlungsfähigkeit auf das Management produzierender Unternehmen (Jentsch 2015). Diese Forschungsarbeiten adressieren die gestellten Anforderungen nicht gänzlich. Wichtige Leitgedanken können jedoch eingebracht werden.

Ein Modell, wie sich eine Population komplexer adaptiver Systeme entwickelt und welche Formen von Strukturen langfristig überleben, wurde von Kauffman entwickelt (Kauffman 1993). Das Modell der 'Fitness-Landschaft' stellt einen Zusammenhang her zwischen verschiedenen Kombinationen alternativer Systemstrukturen und deren Beitrag zur Sicherung des Systemfortbestandes. Das Ausmaß, mit dem eine bestimmte Struktur den Fortbestand sichert, wird als organisationale 'Fitness' bezeichnet. Gemeint ist damit der Grad an Leistungsfähigkeit im

Sinne einer Überlebensfähigkeit. Eine Fitness-Landschaft wird über einen mehrdimensionalen Raum aufgespannt, in dem jede mögliche Eigenschaft eines Systems durch eine einzelne Dimension abgebildet wird. Die Ausprägungen dieser Eigenschaften stellen die Wahlmöglichkeiten für die Systemgestaltung dar. Eine Kernfrage ist, wie sich ein Suchvorgang gestaltet, um ein höheres Niveau an Fitness zu erreichen. (Grübner 2007)

Der Methoden- und Werkzeugumfang der Digitalen Fabrik hat sich seit Beginn der Weiterentwicklung dieses Ansatzes stark erweitert. Insbesondere die Ablaufsimulation bietet umfassende Möglichkeiten, dynamische Abläufe vorzudenken und komplexe Szenarien zu testen. Auch in Zeiten der Industrie 4.0 kommt der Ablaufsimulation eine Schlüsselrolle zu, was dem Trend nach digitalen Testumgebungen entspricht (Schluse/Rossmann 2016; Wenzel et al. 2017). Die Methoden der Digitalen Fabrik können einen entscheidenden Beitrag für die Absicherung der Fabrikstruktur hinsichtlich der digitalen Lösung spezifizierter Probleme liefern.

Das vermutlich bekannteste Modell der Managementkybernetik ist das Modell lebensfähiger Systeme (Viable System) (Beer 1995). Das Modell entstand aus einer Analogiebetrachtung zur Funktionsweise des zentralen Nervensystems des Menschen und basiert auf verschiedenen Gestaltungsprinzipien. Es fußt auf dem Grundgedanken, dass jedes lebensfähige System aus fünf Einzelsystemen besteht, welches jeweils Lenkungsaufgaben zugeordnet sind und damit die Lebensfähigkeit des Gesamtsystems ermöglichen. Weiterhin unterscheidet Malik in unterschiedliche Arten der Komplexitätsbeherrschung. Zum einen ist dies durch Systemstrukturen (spontan, taxis) möglich; zum anderen durch Problemlösen (konstruktivistisch, evolutionär). Diese Ansätze bilden einen Ausgangspunkt für die methodische Systemgestaltung. (Malik 2015) Diese Ausführungen sollen als wesentlicher Bestandteil in eine Absicherung der komplexen, adaptiven Fabrikstruktur einfließen. Der ganzheitlichen soziotechnischen Betrachtung kommt dabei eine entscheidende Rolle zu. Ein derartiges System obliegt der Notwendigkeit der strategischen Lenkung (Malik 2015).

Für die Strukturierung der Inhalte der Industrie 4.0 sowie im Sinne deren Implementierung, wurden in der Vergangenheit diverse Rahmen- und Architekturmodelle entwickelt (Horler/Müller 2017). Das wohl bekannteste ist das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0). In diesem werden für die Industrie 4.0 zwei grundlegende Modelle (Architektur Industrie 4.0, Industrie 4.0-Komponente) beschrieben, welche zukünftig als Basis weiterer Architekturen und Teilmodelle dienen

(Deutsches Institut für Normung e.V. 2016). Die darin ausgeführten Rahmendaten geben wichtige Hinweise auf die spätere Funktionsweise der Smart Factory.

#### 4. Modellierung der Smart Factory Fabrikstruktur

Unter dem Begriff Modellierung wird allgemein eine Abbildung eines „geplanten oder real existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System“ verstanden (Verein Deutscher Ingenieure 2014). Wesentliche Grundlagen liefert dabei die Systemtheorie. Im Rahmen dieses Beitrages wird in eine Modellierung der Smart Factory Fabrikstruktur eingeführt, mit dem Ziel, die einheitliche Beschreibung des Objektbereiches als Grundlage für die spätere Absicherung zu schaffen. Die systemische Beschreibung dient zudem als Basis für ein Metamodell, welches wiederum bei der Generierung spezifischer Strukturmodell Anwendung findet (siehe Abschnitt 5).

Nach Ropohl sind für eine vollständige Beschreibung eines Systems drei Sichtweisen notwendig. Dabei wird in das funktionale, strukturelle sowie hierarchische Konzept unterschieden. (Ropohl 2009) Eine vereinfachte Darstellung der systemischen Beschreibung der Smart Factory Fabrikstruktur zeigen die Abbildungen 3-5.

Die funktionale Sicht (Abbildung 3) gibt Auskunft über die Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften eines Systems, wie sie bei einem Blick von außen zu sehen sind. Dazu erfolgt die Darstellung als black box, welche durch gewisse Inputs und Outputs sowie Systemzustände gekennzeichnet ist. Der innere Aufbau bleibt hingegen unberücksichtigt. (Ropohl 2009) Die Elemente der Smart Factory Fabrikstruktur sind durch Inputs und Outputs stofflicher, informationeller sowie energetischer Art geprägt. Diese treten über den Zeitverlauf in unterschiedlichen räumlichen und mengenmäßigen Ausprägungen auf. Des Weiteren kann ein Element der Fabrikstruktur gewisse Konstellationen an Strukturzuständen einnehmen, die sich auf die Konfiguration der Elemente beziehen. Im Kontext der Fabrikstruktur treten besonders die Dienste in den Vordergrund, welche innerhalb der Smart Factory Produktion angeboten werden und definierte technische Ressourcenanforderungen an die menschliche Arbeit (M) sowie die Technik (T) nach sich ziehen. Jede Ressource besitzt eine Kapazität, mit der die Dienste realisiert werden können. Zudem liefert jedes Element der Fabrikstruktur einen gewissen Beitrag zur Gesamt-Fitness der Struktur bzgl. der in sie gestellten Anforderungen. In Anknüpfung an RAMI 4.0, besitzen die Struktureinheiten ein unterschiedliches Maß an Kommunikationsfähigkeit sowie Selbstorganisation. Diese Ausprägung wirkt sich wiederum auf den Grad

aus, mit die vorzusehende inhärente Flexibilität und Wandlungsfähigkeit ausgenutzt werden.

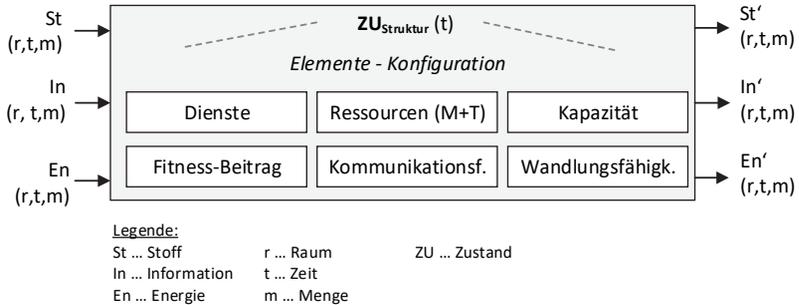
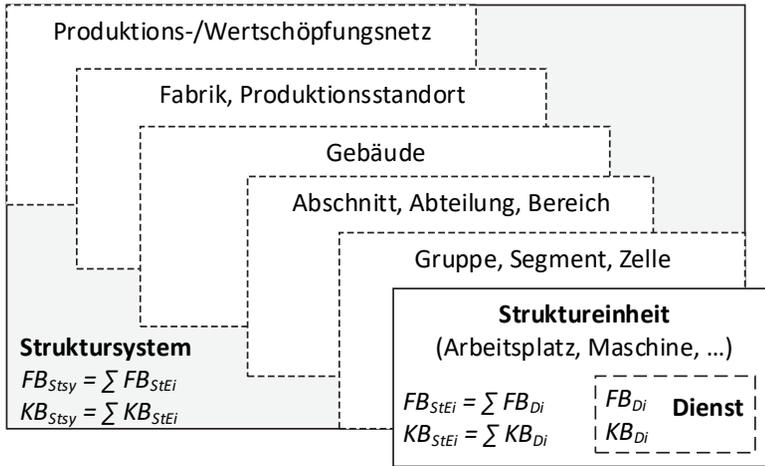


Abbildung 3: Systemische Darstellung - funktionale Sicht (vereinfacht).

Aus hierarchischer Sicht (Abbildung 4) ist ein System aus Teilsystemen zusammengesetzt, welches wiederum detailliert werden können. Systeme lassen sich wiederum zu Supersystemen aggregieren. (Ropohl 2009) Im Sinne der Strukturbetrachtung wird ein Dienst als kleinste sinnvolle logische Einheit definiert. Ein oder mehrere Dienste werden von einer Struktureinheit bereitgestellt, welche das kleinste physische Element der Smart Factory Fabrikstruktur darstellt. Die Struktureinheit ist ein Element, was in der Lage ist, eigenständig Dienste bereitzustellen und im Netzwerk zu interagieren, um adaptiv auf Veränderungen zu reagieren. Struktureinheiten besitzen soziotechnischen Charakter und können demnach menschliche als auch technische Ausprägungen annehmen. In der weiteren Abstraktion setzt sich die Fabrikstruktur nach der in der Fabrikplanung üblichen hierarchischen Gliederung zusammen (siehe z.B. Schenk et al. 2014). Jede dieser Ebenen lässt sich je nach Problemfall selbst als Struktureinheit mit angebotenen Diensten auffassen. Jedes der gezeigten Elemente trägt mit einem bestimmten Beitrag zur Struktur-Fitness sowie zur Komplexität des Struktursystems bei.



**Legende:**

- |  |   |
|--|---|
| FB <sub>Di</sub> ... Fitness-Beitrag Dienst            | KB <sub>Di</sub> ... Komplexitäts-Beitrag Dienst            |
| FB <sub>StEi</sub> ... Fitness-Beitrag Struktureinheit | KB <sub>StEi</sub> ... Komplexitäts-Beitrag Struktureinheit |
| FB <sub>Stsy</sub> ... Fitness-Beitrag Struktursystem  | KB <sub>Stsy</sub> ... Komplexitäts-Beitrag Struktursystem  |

Abbildung 4: Systemische Darstellung - hierarchische Sicht (vereinfacht).

Die strukturelle Sicht (Abbildung 5) betrachtet ein System als eine Gesamtheit miteinander verknüpfter Elemente. Dabei stehen sowohl die Beziehungsgeflechte zwischen diesen als auch die Beschaffenheit der Elemente als Grundlage für deren Integration in das Gesamtsystem im Fokus. (Ropohl 2009) Für die Darstellung der strukturalen Sicht der Fabrikstruktur wurde die Methodik für Fabrikssystemmodellierung nach Hopf gewählt (Hopf 2016). In Anlehnung an Patzak setzen sich Handlungssysteme aus den Bestandteilen 'Ausführungssystem', 'Informationssystem' sowie 'Zielsystem' zusammen (Patzak 1982).

Auf dieser Grundlage wurden dem Ausführungssystem die Prozesse zugeordnet, die mit dem Materialfluss einer Struktureinheit in Verbindung stehen. Es werden Speicher-, Transport- und Transformationssysteme innerhalb einer Struktureinheit unterschieden, welche typische Bestandteile eines normierten Objektes der Fabrik bilden (Wirth/Reich 1989). Dem Informationssystem wurden alle Prozesse zugeordnet, die im Rahmen der Industrie 4.0-konformen Kommunikation nach RAMI 4.0 notwendig sind. Die darin beschriebene Verwaltungsschale dient demnach der informationellen Einbindung des Strukturobjekts (Asset) in die Produktion (Deutsches Institut für Normung e.V. 2016). Auf der Ebene des Zielsystems sind jene Ziele der Struktureinheit verankert, die von dessen übergeordneten Lenkungseinheiten vorgegeben werden

(Zielsystem Struktureinheit), um die Fitness der Fabrikstruktur sicherzustellen. Diese Ebene dient damit der Aufnahme und Analyse der aktuellen strukturellen Situation sowie der individuellen Anpassung der dezentralen Struktureinheiten (normative Strukturplanung).

Zusätzlich stehen Struktureinheiten durch räumliche, zeitliche, mengenmäßige sowie rangmäßige Beziehungen miteinander in Verbindung, woraus die räumliche und zeitliche Struktur des Fabriksystems resultiert. Im vorliegenden Fall der Smart Factory definieren sogenannte Metaprozesse den informationellen Freiheitsgrad jeder Struktureinheit sowie deren Verhaltensspielraum im Sinne der Fertigungssteuerung.

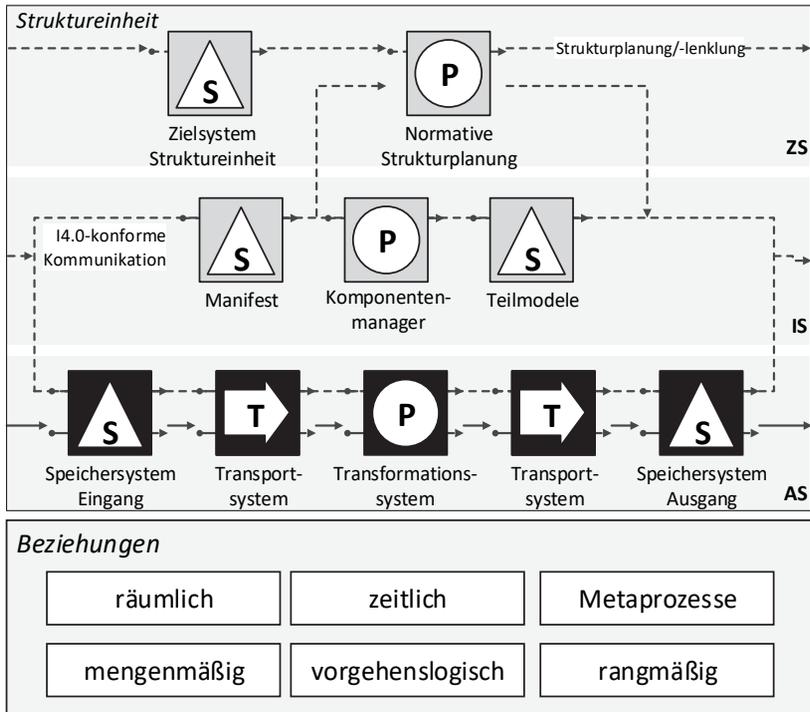


Abbildung 5: Systemische Darstellung - strukturelle Sicht (vereinfacht).

Auf Grundlage dieser systemischen Betrachtung kann ein Metamodell für die Fabrikstruktur der Smart Factory abgeleitet werden, das die Umsetzung spezifischer Strukturmodelle ermöglicht, an denen wiederum Erkenntnisse am virtuellen Modell gewonnen werden können. Anwendung findet dieses Metamodell in den Problemlösungsprozessen im Rahmen des kybernetischen Lenkungsmodells (siehe Abschnitt 5). Für die Umsetzung von Metamodellen dieser Art eignet sich beispielsweise die standardisierte Systems Modeling Language (SysML), welche im Speziellen Vorteile hinsichtlich einer umfassenden Modellierung sowie Transformation von Modellen bietet (Schönherr 2014).

## 5. Ansatz zur Absicherung der Smart Factory Fabrikstruktur

Auf Grundlage der Problemkonstellation, des Standes der Wissenschaft sowie aus den in Abschnitt 2 aufgeführten Anforderungen an die Smart Factory Fabrikstruktur, wurde das in Abbildung 6 illustrierte kybernetische Lenkungsmodell abgeleitet. Folgende Kernaufgaben soll das Gesamtmodell über den Lebenszyklus der Fabrik hinweg unter Berücksichtigung operativer, taktischer sowie strategischer Gesichtspunkte erfüllen:

- Gestaltung der Lenkung der dezentralen Fertigungssteuerung
- Gestaltung der Fabrikstruktur auf Basis der Fitness-Anforderungen
- Entwicklung der Fabrikstruktur im Abgleich mit übergeordneten und externen Anforderungen (Fitness-Landschaft)

Diese Aufgaben werden von folgenden wesentlichen Teilmodellen in Form eines Regelkreises realisiert, auf welche im Nachfolgenden eingegangen wird:

- Regelstrecke Objektbereich Fabrikstruktur
- Regeleinrichtung für die Strukturabsicherung
- modellbasierte Problemlösung

### Regelstrecke Objektbereich Fabrikstruktur (Ziffer 1, Abbildung 6)

Die aus drei Kernelementen bestehende Regelstrecke beinhaltet die den Aufgaben zugrunde liegenden Objektbereiche, d.h. die Absicherungsobjekte der Smart Factory Fabrikstruktur. Zum einen wird der physische Teil der abzusichernden Fabrikstruktur, also die räumliche Struktur,

einbezogen. Zum anderen dient die dezentrale Steuerung als Gestaltungsobjekt, also die zeitliche Struktur. Ausgehend von Produktionsaufträgen, nutzt die dezentrale Steuerung Flexibilitäts- und Wandlungspotenziale der physischen Struktur aus, um eine effiziente Produktion der Aufträge umzusetzen.

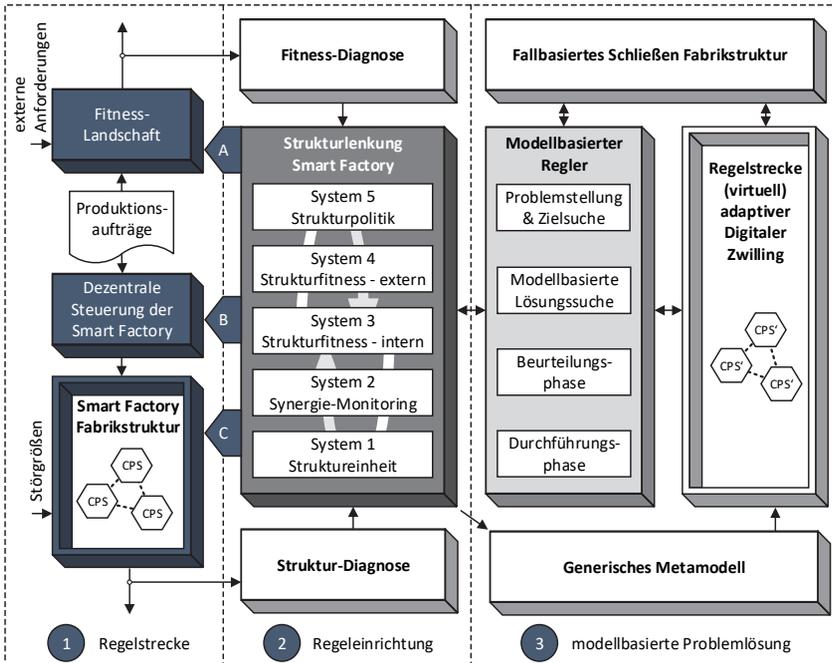


Abbildung 6: Kybernetisches Lenkungsmodell Smart Factory.

Des Weiteren wird eine strukturelle Fitness als Teil der Regelstrecke definiert. Dieser Ansatz lehnt sich an die Übertragung der Theorie der Fitness-Landschaften auf die Fertigung von McCarthy an (McCarthy 2004). Bezugnehmend auf dessen Ausführungen sowie nach Übertragung auf das Struktursystem der Smart Factory, ist strukturelle Fitness hier als eine Eigenschaft der Fabrikstruktur zu verstehen, über einen längeren Zeitraum gegenüber Veränderungen ihrer Umwelt anpassungsfähig zu sein und gleichzeitig die wirtschaftliche Wertschöpfung sicherzustellen. Dies bedarf der Voraussetzung, dass relevante Veränderungen erkannt werden und geeignete Maßnahmen zur Anpassung ausgewählt und umgesetzt werden können (McCarthy 2004). Das Modell

der Struktur-Fitness stellt hier also die obersten Leitlinien für die strukturelle Ausrichtung der Smart Factory zur Verfügung, spannt gleichzeitig eine mehrdimensionale Fitness-Landschaft auf und dient als Wegweiser für die Optimierung des Fitness-Grades. Dieser ist so zu gestalten, dass die übergeordnete Lebensfähigkeit der Unternehmung sichergestellt ist und gleichermaßen als Leitbild für die eigentliche, interne Strukturauslegungen dienen kann. Sowohl externe Anforderungen als auch konkrete Aufträge dienen als Input für die Gestaltung der Fitness-Landschaft, aber gleichzeitig auch als Referenz, ob die Lebensfähigkeit bei gegebenen Anforderungen vorhanden ist.

### Regeleinrichtung für die Strukturabsicherung (Ziffer 2, Abbildung 6)

Um in der Betriebsphase die kontinuierliche Aufnahme von Ist-Daten sowie den Soll-Abgleich umzusetzen, wurden im Lenkungsmodell Diagnose-Bausteine für den direkten Output der Smart Factory (Struktur-Diagnose) sowie für die Eignung des Fitnessgrades (Fitness-Diagnose) vorgesehen. Diese erhobenen Strukturdaten dienen wiederum als Eingangsgrößen für den Kern der Regeleinrichtung, der ganzheitlichen Strukturlenkung.

Übergeordnet besitzt das Teilmodell also die Funktion der Stelleinrichtung bei gleichzeitiger Erarbeitung von Zielgrößen für die Fabrikstruktur. In Anlehnung an das Viable System Model von Beer (Beer 1995), besteht die Aufgabe in der Lenkung von abgegrenzten, autonomen Einheiten eines Systems. Unter der Maßgabe, dass auch das Struktursystem als komplex und adaptiv betrachtet werden kann, ergeben sich fünf Einzelsysteme, die ausgehend von der Lenkung der Struktureinheiten (System 1) bis hin zur Stabilität der Gesamtstruktur (System 5) die operative, taktische und strategische Lenkung der Fabrikstruktur vollziehen:

- System 1: Strukturelle Lenkung durch bestmögliche individuelle Ausgestaltung der Struktureinheiten
- System 2: Lenkung der zeitlichen Struktur zwischen den Struktureinheiten im Sinne größtmöglicher Synergieausnutzung
- System 3: Lenkung der räumlichen Struktur unter Einbezug von dezentraler Selbstorganisation und übergeordneten Leitlinien
- System 4: Erfassung, Aufbereitung und Integration externer strukturrelevanter Entwicklungen

● System 5: Lenkung der gesamtstrukturellen Fitness und Bereitstellung von Leitlinien

Diesen Zeithorizonten können wiederum die Kernaufgaben Gestaltung der Lenkung der Fertigungssteuerung, die Gestaltung der Fabrikstruktur sowie deren Entwicklung zugeordnet werden. Die enthaltenen Aufgaben sind organisatorisch in unterschiedlichen Einheiten des Unternehmens verankert. Dieses Modell der Strukturlenkung stellt demnach die personifizierte Schnittstelle des kybernetischen Lenkungsmodells zur Produktion sowie zur Unternehmensumwelt dar. Über die Lenkungseingriffe (A, B, C in Abbildung 6) finden Anpassungen der Regelstrecke statt.

Modellbasierte Problemlösung (Ziffer 3, Abbildung 6)

Ausgehend von der Diagnose der Regelstrecke auf Basis von Zielgrößen der Strukturlenkung sowie erkannten Handlungsbedarfen durch die Strukturlenkung, besitzt die modellbasierte Problemlösung den Zweck für die in den Systemen 1-5 relevanten Fragestellungen Lösungen herbeizuführen. Die Grundstruktur dieses Modells stützt sich auf den Schritten eines modellbasierten Erkenntnisprozesses (Nyhuis 2008) kombiniert mit dem Problemlösungszyklus des Systems Engineering (Haberfellner 2015).

Malik appelliert bei Umgang mit komplexen Systemen an eine Kombination von konstruktivistischen mit evolutionären Ansätzen der Problemlösung (Malik 2015). Ausgangspunkt für die Vorgehensweise ist der vermehrte Mangel an für die Lösung notwendigen Informationen, wodurch ein vollständig konstruktivistisches Vorgehen unmöglich wird. Auch im Kontext der soziotechnischen, sich selbst organisierenden Smart Factory Fabrikstruktur findet diese Sichtweise Anwendung.

Der modellbasierte Regler dient einer der vorliegenden Situation angepassten Erkenntnisgewinnung. Er ist damit adaptiv auf diverse Problemsituationen der Regeleinrichtung auszulegen. Im Schritt der Problemstellung und Zielsuche wird dieses Vorgehen im spezifischen Problemfall definiert, welches sich auf die spätere Modellbildung auswirkt. In den nachfolgenden Schritten des Reglers wird eine modellbasierte Lösungssuche durchgeführt. Insbesondere für die Modellsuche und -wiederverwendung kommt dafür das Fallbasierte Schließen mittels Problemlösung durch Analogieschluss zum Einsatz. In der Fallbasis werden dabei für ein gegebenes Problem ähnliche und früher bereits genutzte Modelle vorgehalten und wieder herangezogen.

Gerade in der Industrie 4.0 eröffnen virtuelle Modelle und Testumgebungen und digitale Zwillinge neue Möglichkeiten in der Planung und im Betrieb von technischen Systemen (Schluse & Rossmann 2016). Nyhuis unterscheidet in vier Arten von Modellen, welche generell je nach Zweck und Entwicklungsstand Anwendung finden: (Nyhuis 2008)

- Beschreibungsmodelle
- Erklärungsmodelle
- Prognosemodelle
- Entscheidungsmodelle

Auch in der Fabrikstrukturbetrachtung können diese unterschiedlichen Arten für den Erkenntnisprozess notwendig sein. Je nach zeitlicher Orientierung, Dynamikverhalten oder Detaillierung können zudem bspw. räumliche Strukturmodelle (Layoutgestaltung), Verhaltensmodelle (Ablaufsimulation) oder auch Strategiemodelle (Geschäftsmodelle) Teil der Problemlösung sein. Ein generisches Metamodell, welches unternehmensspezifisch zu generieren ist, beinhaltet dafür einen generalisierten Modellierungsansatz sowie den nötigen Beschreibungsvorrat an Modellelementen. In diesem Bereich versprechen aktuelle Forschungen des Modeling and Simulation-Based Systems Engineering vielversprechende Potenziale, um in interdisziplinären Teams modell- und simulationsgestützte Erkenntnisse zu gewinnen (Gianni et al. 2017).

## 6. Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf

Die in der aktuellen Forschungslandschaft allgegenwärtige digitale Transformation, gipfelnd in der Vision der Industrie 4.0, treibt die Entwicklung von zukünftigen Technologien in der Produktion voran. Die Planung sowie der Einsatz dieser Technologien im industriellen Umfeld werden hingegen bisher weitgehend vernachlässigt. Dabei wirkt sich das Konzept der vernetzten, sich selbst organisierenden Produktion entscheidend auf die Fabrikplanung aus. Vor allem die Fabrikstrukturplanung bleibt durch die neuartigen Anforderungen nicht unbeeinflusst, wodurch traditionelle Planungsvorgehen an ihre Grenzen geraten.

Insbesondere erhöhen sich die externe Komplexität aufgrund von Anforderungen der Kunden und aus dem Wertschöpfungsnetz sowie die interne Verhaltenskomplexität durch die sich selbst organisierenden Fabrikobjekte. Die Smart Factory Produktion kann deswegen als ein komplexes adaptives System charakterisiert werden, deren Fabrikstruk-

tur an die sich wandelnden Bedingungen über den gesamten Lebenszyklus der Fabrik abgesichert und gelenkt werden muss. Diese Problematik ist insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen relevant, welche im besonderen Maße darauf angewiesen sind, hoch flexibel auf Umfeldveränderungen bei gleichzeitiger Wahrung der Wirtschaftlichkeit in der Produktion zu reagieren. Nur so ist es für Unternehmen möglich, in Zeiten technologischer Innovationen und disruptiver Veränderungen am Markt zu bestehen.

Es ist daher ein System notwendig, das die Kernaufgaben Lenkung der Fertigungssteuerung, Gestaltung der Fabrikstruktur sowie Entwicklung der Fabrikstruktur übernimmt. Die Untersuchung des Standes der Wissenschaft ergab, dass im Objekt- und Methodenbereich bereits diverse Ansätze vorhanden sind, die Teilbereiche der Problemstellung abdecken, jedoch der Gesamtheit von Anforderungen an ein System zur Absicherung der Smart Factory Fabrikstruktur nicht gerecht werden.

Im vorliegenden Beitrag wurde aus diesem Grund ein Ansatz für die Modellierung der Fabrikstruktur einer vernetzten, adaptiven Produktion vorgestellt. Dabei wurde auf die funktionale, hierarchische sowie strukturelle Sicht eingegangen. Diese einheitliche Beschreibung des Objektbereiches bildet die Basis für Metamodelle, die in einer modellbasierten Absicherung Anwendung finden.

Weiterhin wurde in ein kybernetisches Lenkungsmodell für die Absicherung der Fabrikstruktur eingeführt, dessen Zweck es ist, die identifizierten Kernaufgaben in operativer, taktischer und strategischer Sicht über den Fabriklebenszyklus hinweg umzusetzen. Kernelemente des Modells sind eine auf der Theorie der Fitness-Landschaften aufbauende übergeordnete Bewertung, das Modell der Strukturlenkung mit fünf Einzelsystemen sowie der modellbasierte Regler für die Lösung spezifischer Strukturprobleme.

Insgesamt bilden diese Ausführungen die Säulen für die weitere Forschung zum Zweck der Detaillierung des Ansatzes. Zu nennen ist folgender Forschungsbedarf:

- Ableitung eines generischen Metamodells der Smart Factory Fabrikstruktur, welches als Grundlage einer effizienten, problemadäquaten Modellerstellung dient.
- Entwicklung einer übergeordneten Messmethode für die strukturelle Fitness sowie Verfahren zur Entwicklung des Fitness-Grades.

- Detaillierung des Modells der strukturellen Lenkung sowie dessen Zusammenspiel mit der modellbasierten Problemlösung des Reglers.

## Literatur

- acatech (Ed.). (2013). Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0.
- Ashby, W. R. (1970). *An Introduction to Cybernetics*. London: Chapman & Hall Ltd.
- Aurich, J. C., Steimer, C., Meissner, H., Menck, N. (2015). Einfluss von Industrie 4.0 auf die Fabrikplanung: Auswirkungen der besonderen Charakteristika cybertronischer Produktionssysteme auf die Fabrikplanung. *wt Werkstattstechnik*, Vol. 105 (4), S. 190–194.
- Bäcker, M. (2002). Ein modellbasiertes Managementsystem für eine wandlungsfähige Fertigung. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme / Institut für Automatisierungstechnik, Lehrstuhl für Produktionssysteme: Bd. 2002.3. Aachen: Shaker.
- Beer, S. (1995). *Brain of the firm: The managerial cybernetics of organization; companion volume to "The heart of enterprise"* (2. ed., paperback ed., Reprinted.). *The managerial cybernetics of organization*. Chichester u.a.: Wiley.
- BVMW. (2018). Der Mittelstand ist Garant für Stabilität und Fortschritt. Online verfügbar unter <https://www.bvmw.de/themen/mittelstand/zahlen-fakten/>, zuletzt geprüft am 05.08.2018.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (2016). Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0): DIN SPEC 91345. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Dörner, D. (2005). *Die Logik des Misslingens: Strategisches Denken in komplexen Situationen* (4. Aufl.). Rororo: 61578 : Science. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt.
- Eversheim, W., Schuh, G. (Eds.). (1999). *Produktion und Management 3: Gestaltung von Produktionssystemen*: Springer.
- Gianni, D., D'Ambrogio, A., Tolk, A. (2017). *Modeling and Simulation-Based Systems Engineering Handbook*: CRC PRESS.
- Gronau, N. (2015). Der Einfluss von Cyber-Physical Systems auf die Gestaltung von Produktionssystemen. *Industrie 4.0 Management*, Vol. 31 (3), S. 16–20.
- Gronau, N., Ullrich, A., Bender, B. (2017). Hybride Lernfarbik im Anwendungszentrum Industrie 4.0: Szenariobasiertes Lernen im Industrial Internet of Things-Labor. In: N. Gronau (Hrsg.), *Schriftenreihe der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation (WGAB) e.V. Industrial Internet of Things in der Arbeits- und Betriebsorganisation* (S. 1–24). Berlin: Gito mbH Verlag.

- Grübner, A. (2007). Bewältigung marktinduzierter Komplexität in der industriellen Fertigung: Theoretische Ansätze und empirische Ergebnisse des International Manufacturing Strategy Survey. Europäische Hochschulschriften. Reihe 5, Volks- und Betriebswirtschaft Publications universitaires européennes. Série V, Sciences économiques, gestion d'entreprise European university studies. Series V, Economics and management: v. 3244. Frankfurt am Main, New York: P. Lang.
- Gruhn, V. (2016). Cyber-Physical Systems: Intelligenz ist eine Summe von Eigenschaften. *Industrie 4.0 Management*, Vol. 32 (6), S. 7–11.
- Grundig, C.-G. (2018). *Fabrikplanung: Planungssystematik - Methoden - Anwendungen* (6., neu bearbeitete Auflage). München: Hanser Verlag.
- Haberfellner, R. (2015). *Systems Engineering: Grundlagen und Anwendung* (13., aktualisierte Aufl.). Zürich: Orell Füssli.
- Hernández, R. (2003). *Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung*. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2002 (Als Ms. gedr). Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft: Vol. 149. Düsseldorf: VDI-Verl.
- Hildebrand, T. (2005). *Theoretische Grundlagen der bausteinbasierten, technischen Gestaltung wandlungsfähiger Fabrikstrukturen nach dem PLUG+PRODUCE Prinzip*. Chemnitz.
- Hopf, H. (2016). *Methodik zur Fabriksystemmodellierung im Kontext von Energie- und Ressourceneffizienz*. Research. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Horler, S., Müller, E. (2017). *Strukturplanung zukünftiger Produktionssysteme - Die erforderliche Transformation für die Planung und den Betrieb der Smart Factory*. *Industrie 4.0 Management*, Vol. 33 (3), 47–55.
- Jentsch, D. (2015). *Wandlungsfähigkeit im Management produzierender Unternehmen: Dissertation*. Chemnitz: Wissenschaftliche Schriftenreihe des Instituts für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, Technische Universität Chemnitz.
- Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J. (2012). *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*.
- Kauffman, S. A. (1993). *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. New York, Oxford, Toronto, Delhi, Bombay, Calcutta: Oxford University Press.
- Kobylka, A. (2000). *Simulationsbasierte Dimensionierung von Produktionssystemen mit definiertem Potential an Leistungsflexibilität: Dissertation TU Chemnitz*. Wissenschaftliche Schriftenreihe des IBF, Heft 24, Chemnitz.
- Lucke, D. (2013). *Smart Factory*. In: E. Westkämper, D. Spath, C. Constantinescu, und J. Lentés (Hrsg.): *Digitale Produktion* (S. 251–269). Berlin [u.a.]: Springer Vieweg.
- Malik, F. (2009). *Systemisches Management, Evolution, Selbstorganisation: Grundprobleme, Funktionsmechanismen und Lösungsansätze für komplexe Systeme* (Neuausg., 5. Aufl.). Bern, Stuttgart, Wien: Haupt.
- Malik, F. (2015). *Strategie des Managements komplexer Systeme: Ein Beitrag zur Management-Kybernetik evolutionärer Systeme* (11th ed.). Bern: Haupt.

- McCarthy, I. P. (2004). Manufacturing strategy: understanding the fitness landscape. In *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 24 (2), S. 124–150.
- Nyhuis, P. (2008). Entwicklungsschritte zu Theorien der Logistik. In: P. Nyhuis (Hrsg.), *Beiträge zu einer Theorie der Logistik* (S. 2–17). Dordrecht: Springer Verlag.
- Patzak, G. (1982). *Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme: Grundlagen, Methoden, Techniken*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Riedel, R. (2012). *Sytemische Fabrikbetriebsplanung auf Basis eines kybernetisch-sozio-technischen Modells: Habilitationsschrift*.
- Ropohl, G. (2009). *Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik* (3., überarb. Aufl.). Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.
- Schenk, M., Wirth, S., Müller, E. (2014). *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik* (2., vollst. überarb. und erw. Aufl.). Berlin [u.a.]: Springer Vieweg.
- Schluse, M., Rossmann, J. (2016). From Simulation to Experimentable Digital Twins: Simulation-based Development and Operation of Coplex Technical Systems. Second IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE 2016), October 3-5, Edinburgh, Scotland, S. 273-278,
- Schmigalla, H. (1995). *Fabrikplanung: Begriffe und Zusammenhänge* (1. Aufl.). REFA-Fachbuchreihe Betriebsorganisation. München, Wien: Hanser.
- Schönherr, O. (2014). *Modellierung, Simulation und Transformation von diskreten Prozessen in der Produktion und Logistik auf der Basis von SysML: Dissertation*. München.
- Schuh, G., Gottschalk, S., Lösch, F., Wesch, C. (2007). *Fabrikplanung im Gegenstromverfahren*. wt Werkstattstechnik, Vol.97 (4), S. 195–199.
- Schwanger, M. (1994). *Managementsysteme*. St. Galler Management-Konzept: Bd. 4. Frankfurt, New York: Campus.
- Söllner, R. (2016). *Der deutsche Mittelstand im Zeichen der Globalisierung*. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt. (2017). *Statistisches Jahrbuch 2017 - Produzierendes Gewerbe und Dienstleistungen im Überblick*.
- Verein Deutscher Ingenieure. (2014). *VDI 3633 - Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen: Blatt 1: Grundlagen*.
- Vogel-Heuser, B., Bauernhansl, T., Hompel, M. t. (2017). *Handbuch Industrie 4.0 Bd.4: Allgemeine Grundlagen* (2. Auflage). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Wenzel, S., Jessen, U., Stolipin, J. (2017). Rolle der Ablaufsimulation in Industrie 4.0: Aufgaben und Integration. In: N. Gronau (Hrsg.), *Schriftenreihe der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation (WGAB) e.V. Industrial Internet of Things in der Arbeits- und Betriebsorganisation* (S. 177–198).

- Wirth, S., Reich, S. (1989). Zur flusssystemtheoretischen Systematisierung materieller CIM-Strukturen. Karl-Marx-Stadt: Wissenschaftliche Schriftenreihe Karl-Marx-Stadt.
- Wolff, D., Göbel, R. (2018). Digitalisierung: Segen oder Fluch: Wie die Digitalisierung unsere Lebens- und Arbeitswelt verändert. Berlin: Springer Verlag.



# Entwicklung eines flexiblen, inkrementell lernenden Programmiersystems für kollaborative Roboterapplikationen

Eine Kombination von kollaborativer Robotik, Machine-Learning und -Vision für industriell relevante Demonstrationen

Andrea Giusti<sup>1</sup>, Dieter Steiner<sup>1</sup>, Sebastian Bertoli<sup>1</sup>, Dominik T. Matt<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer Italia Research s.c.a.r.l., Bozen; <sup>2</sup>Industrial Engineering and Automation, Freie Universität Bozen

## 1. Einleitung und State of the Art

Erfahrungen aus der Projektakquise und laufenden Forschungsprojekten zeigen, dass für viele Kunden, insbesondere aus dem Bereich der kleinen und mittleren Unternehmen (KMU), der effektivste Weg zum schnellen Verständnis die Praxis ist. Was Stunden von Gesprächen und Präsentation nicht erklären - das können fünf Minuten einer Live-Demonstration (Matt et al. 2018). Dies zeigt, wie wichtig es ist, Plattformen zu realisieren, auf denen komplexe Konzepte aus der Grundlagenforschung in einfach verständlichen Paketen praktisch erfahrbar sind.

Betrachtet man beispielsweise die potenziellen Vorteile der Automatisierung für KMUs (z.B. verbesserte Time-to-Market, Effizienz und Qualität), kann ein Demonstrator ein überzeugendes Mittel sein, um den potenziellen Wandel von klassischen starren Automationssystemen hin zu modernen, flexibleren Gegenstücken aufzuzeigen. In diesem Zusammenhang können KMUs direkt von einem Demonstrator profitieren, indem sie mit flexiblen Produktionssystemen vertraut gemacht werden. Sie können dadurch ihr Investitionsrisiko in die Automation verringern und ihre Anpassungsfähigkeit an Marktveränderungen erhöhen. Im Vergleich zu herkömmlichen Robotersystemen erlauben moderne, flexible Produktionsanlagen die Anpassung an neue Aufgaben ohne großen Aufwand, Kosten oder Standzeiten - dadurch steigt ihr Nutzen und Return of Investment (ROI).

Im Laufe der letzten Jahre beobachten wir ein zunehmendes Interesse an der Weiterentwicklung klassischer Produktionssysteme unter Einbeziehung moderner Konzepte wie Digitalisierung, kollaborativer Robotik und künstlicher Intelligenz (KI), welche als Eckpfeiler der Vierten industriellen Revolution angesehen werden, siehe z.B. (Mittal et al. 2016). Diese Entwicklung zielt auf mehr Flexibilität, Effizienz und verbesserte Arbeitsbedingungen und wird auch durch verschiedene Investitions- und Gründungsprogramme weltweit gefördert (siehe z.B. "Piano Nazionale Industria 4.0" in Italien, "Industrie 4.0" in Deutschland und "Smart Manufacturing" in den USA).

Zu den wegbereitenden Arbeiten, welche die Verwendung intelligenter Systeme in der Fertigung begründen, gehört (Hatvany/Nemes 1978), in dem das Konzept eines Intelligent Manufacturing Systems (IMS) eingeführt wurde. In dieser Arbeit wird die wachsende Komplexität von Produktionssystemen bis hin zur flexiblen Automation vorausgesehen. Damals waren jedoch die verfügbaren Rechnersysteme noch nicht in der Lage, die großen Mengen an Informationen zu verarbeiten welche notwendig sind, um ausreichend komplexe Modelle zu erstellen und sie effektiv zu nutzen (Sharp et. al. 2018). In den letzten zwei Jahrzehnten stieg jedoch die verfügbare Rechenleistung in Embedded Systems und neue Methoden und Hilfsmittel (wie das Industrial Internet of Things (Xu et. al 2014) und Cloud-Computing (Tao et. al 2014)) wurden verfügbar, welche nun die Umsetzung von IMSs in der modernen Industrie begünstigen.

Es gibt vielerlei Methoden der KI welche zur erfolgreichen Lösung realer Probleme in der Produktion eingesetzt werden können. Eine vollständige Beschreibung dieser Methoden findet sich in (Russel/Norvig 2009). Die grundlegenden Konzepte mit hohem Anwendungspotenzial lassen sich in drei Kategorien einteilen: (i) Methoden, die darauf abzielen Probleme zu lösen welche auf einer vorbestimmten Wissensbasis beruhen, (ii) Methoden die zusätzlich den Unsicherheitsfaktor von realen Daten und Sensorsystemen berücksichtigen und (iii) Methoden, für die beide vorherigen Kategorien fundamental sind und darauf abzielen, automatisch das notwendige Wissen zu erwerben, damit das intelligente System seine Aufgabe erfüllen und sich an unvorhergesehene Szenarien anpassen kann. Die dritte Kategorie wird im Folgenden zusammenfassend als *Machine Learning* (ML) bezeichnet und gewinnt in der Praxis zunehmend an Bedeutung.

Die Vorteile und Herausforderungen für den Einsatz von ML-Methoden in der Fertigung sind in (Wuest 2016) ausführlich beschrieben. Zusammenfassend bieten ML-Techniken die Möglichkeit, hochdimensionale Daten zu verarbeiten, implizite Zusammenhänge und Muster in großen Datenmengen zu entdecken (z.B. um Vorhersagen zu treffen) und die Möglichkeit, eine kontinuierliche Qualitätsverbesserung in komplexen Szenarien durchzuführen. Die Herausforderungen für ihre Anwendungen werden von der oft begrenzten Verfügbarkeit, Qualität und Vollständigkeit der Datensätze dominiert, was sich negativ auf die erzielbaren Ergebnisse auswirken kann. Eine große Auswirkung auf die Qualität der Ergebnisse hat auch die Datenvorverarbeitung, da ML-Algorithmen hier sehr sensibel reagieren können. Weitere gemeinsame Herausforderungen sind die Auswahl der am besten geeigneten ML-Algorithmen für bestimmte Probleme und die korrekte Interpretation von Ergebnissen, welche z.B. durch Overfitting und Bias beeinflusst werden können.

Viele Anwendungen von KI und insbesondere von ML-Techniken in der Fertigung wurden in umfangreichen Studien wie (Monostori 2003) und (Pham/Afifi 2005) vorgestellt und gesammelt. Neuere Entwicklungen von ML-Anwendungen in der Produktion wurden in (Wuest et al. 2016) und (Sharp et al. 2018) diskutiert. Eine besonders interessante Anwendung für maschinelles Lernen in der Robotik ist das *Imitation Learning*, welches darauf abzielt, Roboter ausschließlich anhand von Demonstrationen zu programmieren (Billard et al. 2016). Zu den neuesten Entwicklungen in diesem Bereich gehört die Arbeit in (Giusti et al. 2018). Dabei wird Imitation Learning mit modularer Robotik kombiniert, um die Anwendbarkeit für industriell relevante Aufgaben aufzuzeigen und eine grundlegende Basis für ein neues Framework zur flexiblen Fertigung zu bilden.

Der Absatz von Industrierobotern wächst kontinuierlich, ihre Anwendung beschränkt sich nach wie vor überwiegend auf die Automobil- und Elektronikindustrie (Zanchettin et al. 2018). Dies kann damit zusammenhängen, dass das Risiko von Investitionen in Automatisierungssysteme mit kostspieliger oder gar unpraktischer Anpassung an Produktionsänderungen nach wie vor ein Hindernis für KMUs darstellt. Ein vielversprechendes Mittel zur Risikoreduzierung in diesem Zusammenhang ist die Erhöhung der Flexibilität von Roboterlösungen, die KMUs einen einzigartigen Vorteil bei der Massen Anpassung bringt. Ein moderner Ansatz zur Steigerung der Flexibilität von Produktionssystemen ist die Realisierung industrieller Umgebungen, in welchen Mensch und Roboter kooperieren können, während sie sich den selben Arbeitsbereich tei-

len (Robla-Gomez et al. 2017). Dieser Ansatz ermöglicht die Kombination von Kraft, Wiederholbarkeit, Präzision und Ausdauer von Robotern mit den kognitiven Fähigkeiten und der Fingerfertigkeit des Menschen. Eine solche Kombination war bisher in der klassischen Industrierobotik nur eingeschränkt möglich und erforderte aus Sicherheitsgründen eine räumliche Trennung von Mensch und Maschine. In den letzten Jahrzehnten wurden viele Forschungsergebnisse im Bereich der physischen Mensch-Roboter-Interaktion (oder kollaborative Roboter) vorgestellt (siehe z.B. (Haddadin/Croft 2016)). Leichte und konforme Roboter wurden ebenso zur Verfügung gestellt wie Steuerungssysteme, welche die Sicherheit von Menschen in unmittelbarer Nähe von Robotern gewährleisten, während sie sich den selben Arbeitsbereich teilen (siehe z.B. (Zanchettin et al. 2016) und (Pereira/Althoff 2017)).

Im Gegensatz zur klassischen Industrierobotik stellen gemeinsame Arbeitsbereiche von Mensch und Robotern neue Sicherheitsanforderungen. Diese neuen Anforderungen sind in den Normen ISO 10218-1, ISO 10218-2 und der neueren technischen Spezifikation ISO/TS 15066 zusammengefasst. Neben der Sicherheit wird von kollaborativen Robotern auch eine benutzerfreundliche Programmierung für häufig wechselnde Aufgaben erwartet. Letzteres kann durch die Einbeziehung von maschinellen Lerntechniken wie dem bereits erwähnten Imitation Learning erreicht werden.

Fehlende Erfahrungen in KMUs mit den oben genannten Ansätzen können zu einer weitreichenden Einschränkung der Umsetzbarkeit führen. Um einen Beitrag zur Beseitigung dieser Herausforderung zu leisten, entwickeln wir einen Demonstrator, welcher praktische Anwendungen in der Fertigung für kollaborative Robotik und maschinelle Lerntechniken zeigt. Unser Demonstrator soll zeigen, wie ein Mensch und ein Robotersystem bei industriell relevanten Aufgaben zusammenarbeiten können, wobei der Roboter laufend vom Menschen lernt, wie er ihn besser unterstützen kann. Dies ermöglicht im Laufe der Zeit eine Reduzierung des menschlichen Arbeitsaufwands, vorausgesetzt, dass effektive Systeme für Machine-Vision und Incremental-Learning eingesetzt werden. Der Demonstrator soll zeigen, wie ein menschlicher Mitarbeiter und ein Roboter zusammenarbeiten und einander helfen können - der Roboter als unermüdlicher Arbeiter, der sich um die monotone Aufgabe des Sortierens von farbigen Würfeln kümmert, und der menschliche Mitarbeiter, welcher die Entscheidungen für das Unterrichten trifft und das Führen des Roboters übernimmt, wenn das Lernsystem nicht in der Lage ist eine sichere Entscheidung zu treffen.

## 2. Konzept

In diesem Abschnitt erläutern wir das Grundkonzept des zuvor vorgestellten Demonstrators, seine Funktionen und die Art und Weise, wie sie umgesetzt werden, unter Berücksichtigung sowohl der Hardware- als auch der Softwareseite.

### 2.1. Idee des Demonstrators

Auch wenn heutzutage eine hohe Flexibilität von robotischen Anwendungen erreicht werden kann, bleibt die Programmierung komplexer Aufgaben sehr zeitaufwändig. Dies wird umso schwieriger, wenn man unstrukturierte Szenarien betrachtet, in denen Menschen und Roboter physisch interagieren oder zusammenarbeiten können. Dies liegt vor allem an den möglichen Variationen der geometrischen Parameter der Aufgabe, die typischerweise bei der Programmierung des Robotersystems für klassische Anwendungen als bekannt und festgelegt angenommen werden und für neuartige Fälle eine Umprogrammierung erfordern. Eine Möglichkeit, diese Einschränkungen zu umgehen bietet das als *Imitation Learning* oder Programmieren durch Demonstration genannte Forschungsgebiet.

Das z.B. in (Billard et al. 2016) betrachtete Framework zielt auf einen vollständigen Paradigmenwechsel von der klassischen Programmierung von Robotern (z.B. mit Hilfe einer Programmiersprache oder eines Handterminals) hin zu Roboterprogrammierung, welche nur auf Demonstration beruht. Abgestimmt auf diesen Forschungsbereich zielen wir auf die Realisierung eines Systems, das nicht völlig unprogrammiert ist, aber flexible Operationen für eine Klasse von zuvor definierten Anwendungen ermöglicht, die sich auf Demonstrationen und die Zusammenarbeit mit einem Menschen stützen. Die hier betrachtete Anwendung ist die Sortierung von Bauteilen, die auf einem Förderband transportiert werden, in verschiedene Kisten. Wir bleiben hier sehr flexibel, da wir Variationen in Farbe, Form, Pose und Zuständen der zu sortierenden Objekte zulassen. Die industrielle Relevanz des gewählten Sortier-Demonstrators wird sofort deutlich, wenn man sich die Aufgabe ansieht, nach der (automatischen) maschinellen Bearbeitung oder dem Laserschneiden verschiedene Bauteile für unterschiedliche Aufträge zu sortieren oder fehlerhafte, bzw. nicht den Qualitätsansprüchen genügende Bauteile von einem Förderband auszusortieren. Insbesondere erlaubt uns die betrachtete Roboterplattform mit einfachen Testfällen (z.B. zunächst nur mit Farbvariabilität) zu beginnen, aber später auch komplexere Aufgaben zu bearbeiten (z.B. auch mit Formen zusätzlich zu Farben), welche robustere Verallgemeinerungsfähigkeiten erfordern.

Die Grundfunktionen des vorgeschlagenen Demonstrators können wie folgt beschrieben werden. Zu Beginn der Arbeitsphase weiß das Robotersystem nur, dass eine Pick-and-Place-Aufgabe von Objekten vom Transportband zu vorgegebenen Boxen durchgeführt werden soll. Zusätzlich wurde das Robotersystem unter Berücksichtigung der Sicherheitsvorschriften (ISO/TS 15066 2016) vorprogrammiert (z.B. sicheres Unterbrechen der Bewegung, wenn ein Mitarbeiter, der den Arbeitsbereich mitbenutzt, gefährdet ist). In der oben genannten technischen Spezifikation werden vier Methoden des kollaborativen Betriebs berücksichtigt: Handführung, sicherheitsgerichteter, überwachter Stopp, Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung sowie Leistungs- und Kraftbegrenzung.

Bei der Handführungsmethode kann der Benutzer den Roboter direkt über Betätigungseinrichtungen am (oder in der Nähe des) Endeffektors des Roboters bewegen. Damit lassen sich einfache Aufgaben ohne autonome Anpassungsfähigkeit in einem Record und Replay-Modus demonstrieren. Bei der sicherheitsgerichteten überwachten Stoppmethode muss die Bewegung des Roboters im kollaborativen Arbeitsbereich gestoppt werden, wenn ein Mensch den kollaborativen Arbeitsbereich betritt. Die ursprüngliche Bewegung kann erst wieder aufgenommen werden, nachdem der Mensch diesen Arbeitsbereich wieder verlassen hat. Dieser Umstand impliziert, dass der Beitrag des Roboters zu der gemeinsamen Arbeit erheblich eingeschränkt wird, wenn sich sowohl der Roboter als auch der Anwender häufig im gemeinsamen Arbeitsbereich befinden. Die Geschwindigkeits- und Abstandsmethode hingegen ermöglicht gleichzeitige Präsenz des Roboters und des Anwenders im gemeinsamen Arbeitsbereich. Bewegungen des Robotersystems können ausgeführt werden solange ein genügender Sicherheitsabstand zwischen dem Robotersystem und dem Anwender eingehalten wird. Im Gegensatz zum sicherheitsgerichteten überwachten Stopp, bei dem nur der menschliche Standort überwacht wird, ist die Geschwindigkeits- und Abstandsmethode schwieriger zu realisieren, da sie zusätzlich die Position der Roboterglieder (und eventuell auch deren Geschwindigkeit) berücksichtigt. Diese Methode verbessert jedoch den potenziellen Beitrag des Robotersystems zu den gemeinsamen Arbeiten und reduziert die Anzahl der notwendigen Roboterstopps. Die Leistungs- und Kraftbegrenzungsmethode erlaubt sogar den physischen Kontakt zwischen dem Robotersystem und dem Anwender während einer Bewegung. Diese Methode kann dann eingesetzt werden, wenn aufgabenspezifische Risikobewertungs- und -reduzierungsverfahren durchgeführt wurden und das Robotersystem so ausgelegt ist, dass es diesen Betriebsmodus unter-

stützt. (Sensoren und Kraftbegrenzer verbaut) Für eine detaillierte Beschreibung der beschriebenen kollaborativen Methoden verweisen wir den interessierten Leser auf (ISO/TS15066 2016).

Auch wenn die Methode der Kraft- und Leistungsbegrenzung die flexibelsten kollaborativen Szenarien zulässt (z.B. indem Roboter und Menschen in unmittelbarer Nähe arbeiten und sogar Kontaktkräfte auf möglicherweise nutzbringende Weise austauschen), muss für jede Aufgabe Risikobewertungs- und -reduzierungsverfahren durchgeführt werden. Dieser Aspekt schränkt die Flexibilität des Robotersystems ein, den menschlichen Arbeitsablauf zu unterstützen, wenn sich die Aufgabe häufig ändert. Um für unseren Demonstrator ein Höchstmaß an Flexibilität zu erreichen, ist die Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung daher die geeignetste Betriebsart. Einzelheiten zur Umsetzung sind in Abschnitt 2.3 beschrieben.

Der Anwender beginnt mit dem Sortieren der Komponenten die ihm auf dem Förderband präsentiert werden. Währenddessen erfasst das RGBD-Kamerasystem Informationen über die vom Menschen entnommenen Bauteile und den zugehörigen Ablageort. Diese Informationen dienen als Trainingsbeispiele für das Robotersystem. Das Robotersystem prüft laufend für jedes Objekt, ob es eine Klassifizierung mit ausreichender Sicherheit durchführen kann, um dann den Menschen bei der Sortierung zu unterstützen. Dies benötigt für eine ausreichend hohe Anzahl von Demonstrationen, welche der Mensch für jede Art von Bauteil vorführt. Das Robotersystem, entsprechend seiner beabsichtigten Funktionalität, wird den Anwender zunehmend unterstützen und Arbeit abnehmen, während es weiterhin von ihm lernt.

Eine derartige Anwendung ermöglicht es uns die vorgeschlagene Kombination von kollaborativer Robotik, Machine Learning und Machine Vision-Konzepten für andere industrielle Anwendungen zu adaptieren, für die das Grundkonzept dieses Demonstrators ebenfalls verwendet werden kann (*mutatis mutandis*). Unter der Voraussetzung, dass die Sicherheit von Menschen die zusammen mit Robotern arbeiten immer gewährleistet wird, können menschliche Arbeitsabläufe erfasst und genutzt werden um die Roboter lernen zu lassen, wie sie im Laufe der Zeit immer häufiger unterstützend eingreifen können. Um lange Trainingsphasen zu vermeiden, welche in solchen Anwendungen die Gesamtflexibilität des Systems einschränken würden, ist es entscheidend, dass Lernalgorithmen eine genügend hohe Zuverlässigkeit erreichen können, auch wenn nur wenige Demonstrationsmöglichkeiten vorhanden sind.



Abbildung 1: Hardware-Aufbau.

## 2.2. Hardware

Wie in Abbildung 1 gezeigt, besteht der Demonstrator aus einem leichtgewichtigen Roboterarm mit 7 Freiheitsgraden und Drehmomentsensorik in den Gelenken (Panda-Arm von Franka Emika GmbH) (1), einem speziell angefertigten Förderband (2) und Vision-Systemen bestehend aus einer RGB- (1920x1200, 30 fps) (3) und einer RGBD-Kamera (Microsoft Kinect V2) (4) zur Erkennung und Verfolgung von Werkstücken auf dem Förderband und Menschen im Roboterarbeitsbereich. Dabei werden Steuerungskonzepte für eine sichere Mensch-Roboter-Kooperation und maschinelle Lernansätze für einen benutzerfreundlichen Wissenstransfer implementiert und verglichen. Wie auf den Bildern dargestellt, werden zwei Computer eingesetzt. Der Erste (Intel i7-6700 3,4 GHz, 16 GB RAM, dedizierte Nvidia Quadro GPU) (5), läuft unter Windows und erlaubt die Verwendung von modernen Computer Vision Libraries und gleichzeitiger CUDA-Beschleunigung. Der Zweite (Intel i5-M3200 2,4 GHz, 8 GB RAM) (6) verwendet Ubuntu 16.04 mit dem Robot Operating System (ROS) (Kinetic Kame). Die Details der gesamten Software-Architektur mit einer detaillierteren Beschreibung der einzelnen Module folgen im nächsten Unterabschnitt.

## 2.3. Software

Die für den Demonstrator entwickelte Software besteht aus verschiedenen logischen Teilen (siehe Abbildung 2). Aus Effizienzgründen sind einige davon in gemeinsamen Modulen implementiert.

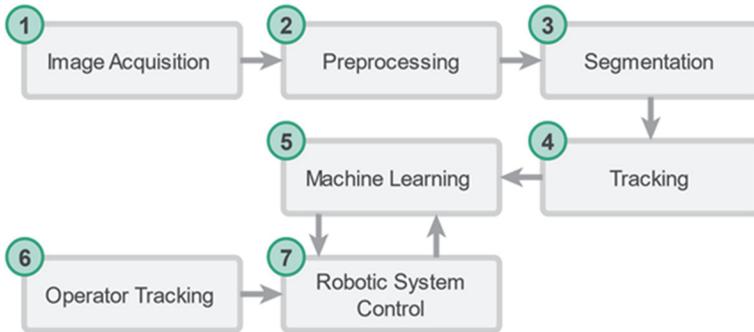


Abbildung 2: Struktur der Software.

### 1) Bilderfassung

Der Bilderfassungsschritt besteht aus einem Kamera-Interface-Modul (siehe Abbildung 3), welches eine Abstraktionsschicht für die verwendete Kamera-Hardware bereitstellt, und einem Resampling-Schritt, der die Bildauflösung auf die gewünschte Bildgröße reduziert. Es enthält einen Regelkreis, der eine niedrig aufgelöste Version des aktuellen Bildes verwendet, um die Belichtung abzuschätzen und die Belichtungsparameter der Kamera (Belichtungszeit und Verstärkung) im laufenden Betrieb anzupassen und die Gesamthelligkeit des Bildes konstant zu halten.

### 2) Vorverarbeitung

Die Vorverarbeitung besteht aus zwei Phasen. Zunächst wird eine adaptive Hintergrundsubtraktion durchgeführt, die das aufgenommene Bild in eine Vorder- und eine Hintergrundebene aufteilt. Dieses Teilmodul stellt auch Zugriff auf das Hintergrundmodell bereit. Der zweite Schritt führt auf die Vordergrundebene eine Kantenextraktion mit dem gängigen Canny-Algorithmus (Canny 1983) und einem morphologischen Operator durch und liefert als Ergebnis eine Edge-Map.

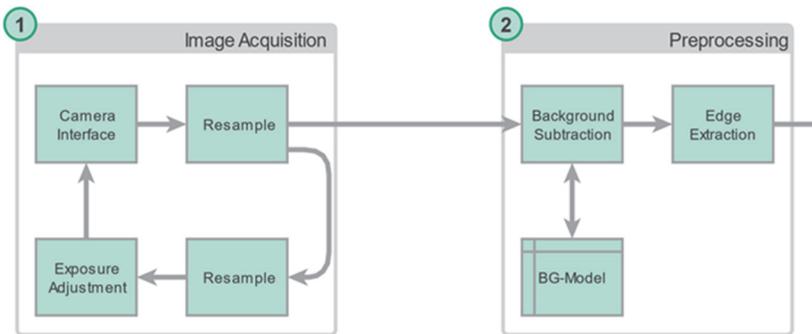


Abbildung 3: Bilderfassung und Vorverarbeitung.

### 3) Segmentierung

Der Segmentierungsschritt extrahiert die enthaltenen Konturen aus der durch den vorherigen Schritt erzeugten Edge-Map (siehe Abbildung 4). Die extrahierten Konturen werden dann angenähert, so dass nur die wichtigen Schlüsselpunkte erhalten bleiben. Die eingeschlossene Fläche innerhalb der Kontur entspricht dann einem erkannten Objekt und seine Merkmale werden extrahiert (z.B. Fläche, Schwerpunkt, Histogramm).

### 4) Tracking

Das Tracking-Modul übernimmt die aus dem aktuellen Frame extrahierten Objekte und vergleicht sie mit anderen kürzlich erkannten Objekten. Wenn eine passende Übereinstimmung gefunden wird, wird diese aktualisiert und die Trajektorie gespeichert. Wenn keine Übereinstimmung gefunden wird, wird die aktuelle Detektion als neues Objekt betrachtet und der Liste der getrackten Objekte hinzugefügt. Dieser Schritt erfolgt durch die Berechnung von Ähnlichkeitsmaßen zwischen den Objektmerkmalen. Die gefundenen und getrackten Objekte werden dann mit einem ZeroMQ<sup>1</sup> (ZMQ) basierten Publisher/Lazy-Subscriber-Modell an das ML-Modul gesendet. Dies ermöglicht es uns, das Lernsystem um mehrere parallele Methoden zu erweitern und die horizontale Skalierbarkeit durch die Verwendung mehrerer Workstations für die Berechnungen zu nutzen.

<sup>1</sup> <http://zeromq.org/>

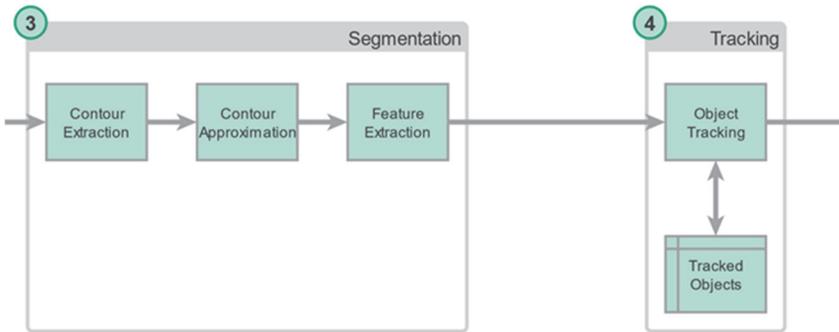


Abbildung 4: Segmentierung und Tracking.

### 5) Machine Learning

Das Machine Learning Modul (siehe Abbildung 5) besteht im Wesentlichen aus zwei Teilmodulen. Ein Lerner und ein Klassifikator. Dieser flexible Ansatz ermöglicht es uns, das Modul in einer Multi-Thread-Umgebung zu betreiben: Der Lerner aktualisiert das Modell, sobald neue Trainingsbeispiele eingehen, der Klassifikator verwendet dieses aktualisierte Modell, um nicht klassifizierte Beispiele zu kategorisieren. Jedes Submodul verfügt über eigene ZMQ-Sockets zur Kommunikation untereinander und mit den anderen Modulen des Systems.

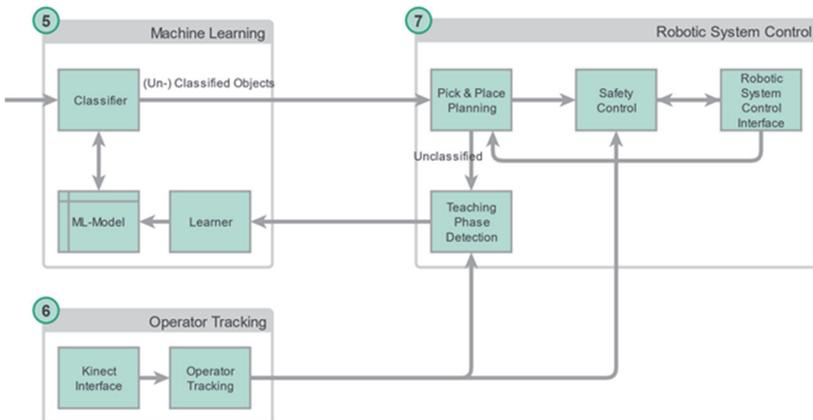


Abbildung 5: Machine Learning, Operator Tracking und Steuerung des robotischen Systems.

Das Lerner-Submodul wartet auf neue Trainingsbeispiele. Sobald ein neues Trainingsbeispiel eingegangen ist, wird es einem Stochastic Gradient Descent (SGD)<sup>2</sup> Klassifikator zugeführt, der uns die Möglichkeit gibt, iteratives Lernen ohne vorherige Schulung durchzuführen. Dies wird auch als Incremental-Learning oder Out-of-Core-Learning bezeichnet. Wir verwenden eine logistische Verlustfunktion, die unter anderem den Vorteil hat, dass die Vorhersagen unseres Modells probabilistisch interpretiert werden. Nachdem der Lerner das Modell aktualisiert hat, wird der Klassifikator veranlasst, noch nicht klassifizierte Bilder durch Anwendung des aktualisierten Modells neu zu bewerten (mehr dazu im nächsten Abschnitt).

Wie der Lerner hat auch das Klassifikator Submodul ein eigenes ZMQ-Socket, welches auf neue Objekte wartet. Nach dem Empfang neuer Bilddaten führt der Klassifikator eine Reihe von Vorarbeiten durch, bevor er versucht das Bild zu klassifizieren. Dazu gehört die Überprüfung des "Alters" des Bildes<sup>3</sup> und die Sicherstellung, dass das aktuelle Bild nicht zu sehr von dem abweicht, was das Lerner Modul bereits gesehen hat. Sobald ein Bild diese Vorabprüfungen bestanden hat, wird eine Vorhersage gemacht. Ist der Klassifikator von der Vorhersage überzeugt<sup>4</sup>, wird das Ergebnis über ein weiteres ZMQ-Socket ausgegeben. Andernfalls wird das Bild in die zuvor genannte Unklassifizierte-Liste aufgenommen.

Die Stärke unseres Aufbaus ist seine Flexibilität - neue Beispiele können in wenigen Iterationen eingelernt und mehrere ML-Algorithmen parallel verwendet werden. In Zukunft werden wir komplexere Objekte mit unterschiedlichen Formen und Eigenschaften klassifizieren. An diesem Punkt werden wir höchstwahrscheinlich auf leistungsfähigere maschinelle Lernalgorithmen zurückgreifen, die möglicherweise mit Techniken wie Boosting kombiniert werden (Schapire 1990).

## 6) Mitarbeiter-Tracking

Das Online-Tracking des Menschen ist sowohl für die Sicherheit als auch für das Lernen aus seinen Handlungen erforderlich. Dazu nutzen wir die Bibliotheken des Software Development Kits der Microsoft Kinect (C)

---

<sup>2</sup> Siehe: [http://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear\\_model.SGDClassifier.html](http://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear_model.SGDClassifier.html)

<sup>3</sup> Es besteht keine Notwendigkeit, "alte" Bilder zu klassifizieren, da sich das Förderband ständig bewegt und der Roboter es nicht mehr greifen kann.

<sup>4</sup> Mit anderen Worten: wir haben ausreichend hohe Wahrscheinlichkeit für die Vorhersage.

zur Skeletterkennung, Segmentierung und Tracking der Körperteile. Diese Daten werden ohne Vorverarbeitung über das verbreitete User-Datagramm-Protokoll (UDP) an das auf der Linux-Maschine laufende Robotersteuerungsmodul übertragen.

## 7) Steuerung des Robotischen Systems

Aus Effizienzgründen sind die Module 1-4 (vgl. Abbildung 2) als ein einziges C++-Programm implementiert, das auf der CUDA-beschleunigten Workstation läuft und zur Steigerung der Performance stark auf Multi-Threading setzt. Teil 5 ist in Python implementiert, um die umfassende Verfügbarkeit von Machine-Learning-Bibliotheken auszunutzen. Durch die Verwendung von ZMQ steht es uns allerdings frei zukünftige Module in beliebigen anderen Sprachen zu entwickeln und in das System zu integrieren.

Die Steuerung des Robotersystems (siehe Abbildung 5, Teil 7) ist auf einem dedizierten PC mit ROS implementiert. Diese Komponente enthält vier Module: Pick & Place Planung, Lehrphasenerkennung, Sicherheitssteuerung und die Schnittstelle zum Robotersystem zur Bewegungssteuerung. Das Pick-and-Place-Modul nimmt den Zustand des Robotersystems auf, um das Aufnehmen und Ablegen der Werkstücke vom Förderband in die richtigen Boxen zu planen. Diese Aktion ist für diejenigen Werkstücke durchzuführen, welche mit ausreichender Sicherheit klassifiziert wurden. Das Lehrphasenerkennungsmodul zielt darauf ab, ein vom Menschen initiiertes Lehrereignis zu erkennen und dem Lernmodul sukzessive die entsprechenden Informationen in Form von Trainingsbeispielen zur Verfügung zu stellen. Das Sicherheitskontrollmodul ist so implementiert, dass es die Sicherheitsanforderungen an kollaborative Arbeitsbereiche berücksichtigt. Dieses Modul überprüft online die Position des menschlichen Operators und die jeweils aktuelle Roboterkonfiguration, um den Roboter vor potentiellen Kollisionen während der aktuellen Bewegung sicher anzuhalten. Wir berechnen potentielle Kollisionen, indem wir Kapseln um den Roboter und den Menschen herum berücksichtigen. Kapseln werden in der Literatur auch als sog. *sphere swept volumes* bezeichnet und können als Minkowski-Summe aus einem Segment und einer Kugel betrachtet werden (Ericson 2004). Während der Radius der den menschlichen Körperteilen zugeordneten Kapselkugeln groß genug gewählt wird, um sie zu umschließen, wird der Radius der den Roboter umgebenden Kapselkugeln ausreichend groß gewählt, um den Anforderungen der (ISO/TS15066 2016) für den kollaborativen Modus der Geschwindigkeitsabstandsüberwachung zu entsprechen. Die Umsetzung einer Anwendung mit sicherheitsrelevanten

Anforderungen an die komplette Hard- und Software geht über den Zweck des Demonstrators hinaus und wird daher nicht berücksichtigt. Dies ermöglicht uns ein maximales Demonstrationspotenzial bei gleichzeitig niedrigen Entwicklungskosten zu erreichen.

### 3. Diskussion und aktueller Status

Der vorgestellte Demonstrator ermöglicht es uns, den potenziellen Nutzen der Kombination von kollaborativer Robotik, Machine Learning und Vision in der Industrie anhand einer beispielhaften und bewusst einfach gehaltenen Anwendung aufzuzeigen. In diesem Fall konnten wir durch diese Kombination das Potenzial eines Incremental-Learning-Robotersystems aufzeigen, welches flexibel in Bezug auf Änderungen der Aufgaben ist, selbst wenn diese kurzfristig erfolgen.

Die Software-Architektur und insbesondere der Machine Learning-Teil sind so flexibel, dass neue Algorithmen und Klassifikationsstrategien schnell integriert werden können und wir uns schnell an neue oder veränderte Verhältnisse anpassen können (z.B. neue Fallstudien von Partnern aus dem öffentlichen oder privaten Bereich). Ziel dieses Aufbaus war es, die Komplexität bewusst zu reduzieren, um schnell zu einer funktionierenden Lösung zu gelangen und dennoch grundlegende Funktionalität zu demonstrieren. Daher ergeben sich für uns mehrere Einschränkungen: Größe, Gewicht (aufgrund der Abmessungen des Aufbaus), Objektfrequenz (die Bewegungsgeschwindigkeit des Roboters ist begrenzt), Form und Material (manche Objektarten/-formen können vom installierten Greifer nicht aufgenommen werden), .... Einige dieser Beschränkungen können mit fortgeschritteneren Algorithmen angegangen werden, andere werden von der Hardware auferlegt und erfordern ein Upgrade, um sie zu beseitigen.

Zukünftige Arbeiten werden jedoch sowohl die Berücksichtigung von Objekten mit unterschiedlicher Form und Farbe als auch die Analyse der Robustheit in Bezug auf suboptimale Lichtverhältnisse beinhalten. Außerdem planen wir, verschiedene Methoden der Robotersteuerungs- und Sicherheitssteuerungsalgorithmen für die reaktive Bahnplanung zu evaluieren. Das Machine-Learning-System wird auch erweitert werden, um verschiedene Lernsysteme und Klassifikatoren miteinander zu vergleichen und ihre jeweilige Performance hinsichtlich z.B. Anlerndauer, Fehlerwahrscheinlichkeit, usw. zu untersuchen. Es ist des Weiteren geplant, das Robotersystem auf ROS2 zu migrieren, sobald dieses ausreichend ausgereift ist, um so die Echtzeit-Steuerungsmöglichkeiten der gesamten Anwendung zu verbessern.

Dieser Demonstrator konzentriert sich darauf, die Vorteile der Kombination von Mensch-Roboter-Kollaboration, Machine-Vision und -Learning zu demonstrieren. Für eine effektive Umsetzung des vorgeschlagenen Konzepts in KMUs sind spezielle Machbarkeitsstudien erforderlich, der Demonstrator kann hierbei aber bereits für den initialen Proof-of-Concept eingesetzt werden.

## Literatur

- Billard, A. G., Calinon, S., Dillmann, R. (2016). Handbook of Robotics 2nd Edition, ch. Learning from humans, S. 1995-2014. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Bouras B. A. (2016). Product Lifecycle Management for Digital Transformation of Industries. PLM. IFIP Advances in Information and Communication Technology, Vol. 492. Cham: Springer Verlag, S. 539-548.
- Canny, J. F. (1983). Finding edges and lines in images. MSc. Thesis. Boston: MIT.
- Ericson, C. (2004). Real-time collision detection. CRC Press, 2004.
- Hatvany, J., Nemes, L. (1978). Intelligent manufacturing systems— a tentative forecast, IFAC Proceedings Volumes, Vol. 11, (1), S. 895 – 899. 7th Triennial World Congress of the IFAC on A Link Between Science and Applications of Automatic Control, Helsinki, Finland.
- Giusti A., Zeestraten, M. J., Icer, E., Pereira, A., Caldwell, D. G., Calinon, S., Althoff, M. (2018). Flexible Automation Driven by Demonstration: Leveraging Strategies that Simplify Robotics, IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 25 (2), S. 18-27.
- Haddadin, S., Croft, E. (2016). Physical human–robot interaction, Springer Handbook of Robotics, S. 1835–1874, Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- ISO/TS 15066 (2016): Robots and robotic devices - Collaborative robots, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Matt, D. T., Rauch, E., Riedl, M. (2018). Knowledge transfer and introduction of Industry 4.0 in SMEs – a five step methodology to introduce Industry 4.0. In: R. Brunet-Thornton und F. Martinez (Hrsg.): Analyzing the Impacts of Industry 4.0 in Modern Business Environments, S. 256-282. Hershey, PA: IGI Global.
- Mittal, S., Khan, M. A., Wuest, T. (2016). Smart Manufacturing: Characteristics and Technologies. In: R. Harik, L. Rivest, A. Bernard, E. Benoit, A. Bouras (Hrsg.): IFIP International Conference on Product Lifecycle Management, S. 539-548. Cham: Springer Verlag.
- Monostori, L. (2003). AI and machine learning techniques for managing complexity, changes and uncertainties in manufacturing, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 16, (4), S. 277-291.

- Pereira A., Althoff, M. (2018). Overapproximative Human Arm Occupancy Prediction for Collision Avoidance, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 15 (2), S. 818-831.
- Pham D. T., Affify, A. A. (2005). Machine-learning techniques and their applications in manufacturing, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 219 (5), S. 395-412.
- Robla-Gomez, S., Becerra, V. M., Llata, J. R., Gonzalez-Sarabia, E., Torre-Ferrero, C., Perez-Oria, J. (2017). Working together: a review on safe human- robot collaboration in industrial environments, *IEEE Access* 5 S. 26754–26773.
- Russell, S., Norvig, P. (2009). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall Press.
- Schapire, R. E. (1990). The strength of weak learnability, *Machine Learning*, Vol. 5, S. 197–227.
- Sharp, M., Ak, R., Hedberg, T. (2018). A survey of the advancing use and development of machine learning in smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems* (in press).
- Tao, F., Cheng, Y., Xu, L. D., Zhang, L., Li, B. H. (2014). Cciot-cmfg: Cloud computing and internet of things-based cloud manufacturing service system, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 10, S. 1435-1442.
- Wuest, W., Weimer, D., Irgens, C., Thoben, K.-D. (2016). Machine learning in manufacturing: advantages, challenges, and applications. *Production & Manufacturing Research*, Vol. 4 (1), S. 23-45.
- Xu, L. D., He, W., Li, S. (2014). Internet of things in industries: A survey, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 10, S. 2233-2243.
- Zanchettin, A. M., Ceriani, N. M., Rocco, P., Ding, H., Matthias, B. (2016). Safety in human-robot collaborative manufacturing environments: Metrics and control, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 13 (2), S. 882–893.
- Zanchettin, A. M., Croft, E., Ding, H., Li, M. (2018). Collaborative Robots in the Workplace [From the Guest Editors], *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 25 (2), S. 16-17.

# Untersuchung des Potenzials für KMU zur Unterstützung der Baulieferkette mit Building Information Modeling: eine Fallstudie eines ETO-Fassadenlieferanten

Patrick Dallasega<sup>1</sup>, Christoph P. Schimanski<sup>2</sup>, Andrea Revolti<sup>1</sup>, Carmen Marcher<sup>2</sup>, Dominik T. Matt<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Industrial Engineering and Automation, Freie Universität Bozen;

<sup>2</sup>Fraunhofer Italia Research s.c.a.r.l., Bozen

## 1. Einführung

Die termingerechte und budgetgerechte Lieferung von Projekten ist in der Baubranche oft eine Herausforderung. Budgetüberschreitungen werden oft erst in der Endphase eines Bauvorhabens erkannt, sobald jedoch die Eingriffsmöglichkeiten begrenzt sind. Dies liegt nach Ansicht der Autoren vor allem daran, dass 1) wichtige Informationen in der Planungsphase nicht ausreichend berücksichtigt werden und 2) Änderungen vor Ort nicht in Echtzeit berücksichtigt werden können. Building Information Modeling (BIM) kann als eine der wichtigsten Technologien zur Digitalisierung der Bauindustrie betrachtet werden (Eastman et al., 2011). BIM birgt großes Potenzial für den Austausch und die Visualisierung von Informationen sowie für die Berücksichtigung von Planungsänderungen im Laufe der Durchführung eines Bauprojekts. Alle Informationen werden zentral im Modell gespeichert, so dass sie transparent und für alle Baubeteiligten zugänglich sind. Laut (Alizadehsalehi/Yitmen, 2016), "kann BIM als leistungsfähige Basis für die Fortschrittskontrolle und die Visualisierung von Diskrepanzen dienen". Tatsächlich birgt BIM aufgrund seiner mächtigen Fähigkeit, das physische Gebäude in eine digitale Umgebung abzubilden, Potenzial für die Visualisierung des Baufortschritts, da es Informationen intuitiver visualisieren und ausdrücken kann (Jeong et al., 2016, Ding et al., 2012). BIM wird bei zukünftigen Bauprojekten Pflicht. Großbritannien hat es bereits für öffentlich finanzierte Projekte übernommen, Europa wird es kurzfristig (z.B. Deutschland) und mittelfristig (z.B. Italien) einführen (Cheng/Lu 2015, Ingenieurkammer Thüringen 2018, Masterplan Bauen 4.0 2018,

Il ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 2018). Bisher wird BIM jedoch hauptsächlich zur Unterstützung des Bauplanungsprozesses eingesetzt und es wurde viel weniger Aufwand in die Entwicklung von IT-Tools zur Unterstützung des Ausführungsprozesses vor Ort und zur Anbindung an die Planungsphase investiert (Sacks et al. 2010, Jeong et al. 2016). Im Bauprojektmanagement sowie in der quantitativen Kontrolle des Fortschritts besteht ein großes Potenzial für Effizienzsteigerungen. Derzeit werden in vielen Fällen nach der Entwurfsphase wichtige Informationen, die im Gebäudemodell enthalten sind, bei der Ausführung von Bauarbeiten nicht mehr verwendet. Als praktisches Beispiel kann die Gesamtzahl der Bauteile, die bei einem bestimmten Arbeitsgang vor Ort installiert werden müssen, sehr nützlich sein, um die Dauer des Arbeitsgangs zuverlässig abzuschätzen. Im BIM wird der Detaillierungsgrad für den Austausch von Konstruktionsinformationen (Zeichnung) durch spezifische Level of Developments (LODs) formalisiert. Die LOD-Definitionen wurden vom American Institute of Architects (AIA) für das AIA G202-2013 Building Information Modeling Protocol Form entwickelt und werden vom Construction Specifications Institute (CSI) Uniformat (American Institute of Architects Contract Documents, 2018; Construction Specification Institute, 2018) gehandhabt. In LOD 100 und 200 wird das Modellelement im BIM mit nicht detaillierten Geometrieinformationen dargestellt. In LOD 300 wird das Modellelement innerhalb des Modells grafisch dargestellt und enthält Informationen über Größe, Menge, Form, Lage und Orientierung. LOD 350 stellt das Modellelement innerhalb des Modells hinsichtlich Menge, Größe, Form, Ausrichtung und Schnittstellen zu anderen Gebäudesystemen grafisch dar. In LOD 400 wird das Modellelement mit detaillierten Fertigungs-, Montage- und Installationsinformationen dargestellt. Der höchste Detaillierungsgrad wird in LOD 500 als feldgeprüfte Darstellung des Bauobjekts in Bezug auf Lage, Form, Menge und Orientierung dargestellt. Allerdings fehlt nach Kenntnis der Autoren bisher eine solche Formalisierung für die Ausführungsphase. Im Detail fehlen bisher noch konkrete Vorgaben über den Detaillierungsgrad bei der Definition von Arbeitsgängen vor Ort, die an benötigte Materialien (Objekte im BIM-Modell) gekoppelt werden sollen, sowie die Definition von Bauabschnitten, die eine quantitative Messung des Baufortschritts ermöglichen. So ist in vielen Projekten eine schwache Ausrichtung der Designphase zur Ausführungsphase zu erkennen. Eine weitere Formalisierung zur Ermittlung des Umfangs und der Art der benötigten Informationen wird mit den BIM-Dimensionen von Stufe 3 bis Stufe 7 festgelegt (Eastman et al. 2008). So wird das 3D-BIM-Modell mit spezifischen Informatio-

nen wie Zeit (4D), Kosten (5D) und Nachhaltigkeitsdaten wie Energieverbrauch (6D) angereichert, bis zum sogenannten "As-Build-Modell", welches feldgeprüfte Daten (7D) für das Facility Management enthält. Diese Daten werden jedoch hauptsächlich für die Bauvorbereitung verwendet. a) Zur Identifizierung von Kollisionen im 3D-Modell (3D). b) Zur Simulation des Bauablaufs mit besonderem Fokus auf die Logistik (4D). c) Zur Berechnung von Materialmengen in Bezug auf Größe, Flächennutzung und damit Gesamtkosten (5D). d) Zur Durchführung von Energieverbrauchsanalysen (6D). e) Zur Bereitstellung detaillierter Informationen über Bauelemente und deren Standort für Wartungsarbeiten wie Garantiezertifikate und Wartungsanweisungen (7D). Zusammenfassend wird BIM bisher hauptsächlich für den Planungsprozess (vor Baubeginn) sowie für die Dokumentation und weniger für die Steuerung des Ausführungsprozesses eingesetzt. Für den Austausch von Produkt- und Prozessdesigninformationen zwischen verschiedenen BIM-basierten Softwareprodukten wird hauptsächlich das Dateiformat Industry Foundation Classes (IFC) verwendet. Obwohl das Dateiformat den Austausch von bauprozessbezogenen Informationen unterstützt, wie z.B. erledigte Arbeitsgänge für ein bestimmtes Gebäudeobjekt (z.B. eine Tür oder ein Fenster), nutzt kommerziell erhältliche Software sehr oft nur die während der Entwurfsphase benötigten Entitäten im Dateiformat IFC (Braun 2013). Zudem unterstützen die meisten kommerziellen Softwareprodukte bisher auch nicht das sog. Round Tripping, d.h. ein Projekt aus dem proprietären Dateiformat in das IFC-Format zu exportieren und ohne Informationsverlust wieder korrekt zu importieren (Singh et al. 2017).

Der Artikel zeigt das Potenzial von BIM für das Management des Bauprozesses auf welches im Laufe des Forschungsprojekts "COCKPiT (Collaborative Construction Project Management)" untersucht wurde. Cockpit ist ein Forschungsprojekt in dem die Freie Universität Bozen (Fakultät für Naturwissenschaften und Technik und die Fakultät für Informatik) und Fraunhofer Italia Methoden und digitale Werkzeuge zur Bauablaufplanung und -steuerung entwickeln.

Ein besonderes Augenmerk in diesem Beitrag liegt darin, zu erörtern, welche Informationen aus dem BIM-Modell extrahiert werden sollen, um die Planung und Terminierung von Bauarbeiten vor Ort zu unterstützen. Darüber hinaus wird anhand eines Demonstrationsmodells gezeigt, wie die Informationen über den Baufortschritt vor Ort in das BIM-Modell importiert und visualisiert werden können, um einen grafischen Überblick über die aktuelle Leistung des Bauvorhabens zu erhalten. Das

vorgeschlagene Konzept wurde bei einem Engineer-to-Order (ETO) Fasadenslieferanten aus Norditalien am Beispiel eines mittelgroßen Bauprojekts in der Schweiz umgesetzt.

## 2. Stand der Forschung

Bereits in den 60er und 70er Jahren hatte die stationäre Industrie (Automotive, Marine, Luft- und Raumfahrt) die Vorteile erkannt, die sich aus dem Einsatz von computergestützter Planungsinstrumente (CAD) ergeben könnten. Diese bestanden insbesondere in einer schnelleren und effizienteren Projektbearbeitung und Einpflege von Änderungen, sowie in der drastischen Reduzierung von Fehlern und einem zunehmenden Automatisierungsniveau. Die Bauindustrie nutzte die Möglichkeiten der neuen Werkzeuge nicht sofort und begann CAD-Systeme erst mit der zunehmenden Preissenkung von Personal Computern (PC) (in der zweiten Hälfte der 70er Jahre) nur schrittweise einzuführen. Gleichzeitig verblieb die Bearbeitungsweise zudem im Wesentlichen im "2D"-Modus. Anschließend (in den 80er Jahren) wurde es möglich, Parameter und Regeln (zunächst geometrischer Art) mit grafischen Objekten zu verknüpfen, um wesentliche Vorteile für das Management des Gesamtprojekts nutzbar zu machen, was gleichbedeutend mit dem Beginn des BIM-Ansatzes zu verstehen ist. In den letzten 20 Jahren wurden diese ersten BIM-Modelle stark weiterentwickelt sowie vermehrt an Schnittstellen zur Übergabe der Modelle an weitere Planungsbeteiligte gearbeitet. Zu den Weiterentwicklungen gehörten insbesondere die Erweiterungen der Informationsdichte der Modellobjekte durch Zeit-, Kosten- und Prozessinformationen.

### 2.1. Vorteile der BIM-Methode

Einer der Hauptvorteile von BIM ist ein verbessertes Informationsmanagement gegenüber dem traditionellen Prozess. Ein gut strukturiertes und über die Zeit verwaltetes BIM-Modell ermöglicht die einfache Weitergabe von Daten und präzisen Informationen an das gesamte Projektteam. Laut Redwood et al. (2017) und Lin (2014) stellt BIM keine neue oder einzelne Software, sondern eine neue Form der Informationsverarbeitung und Zusammenarbeit auf Basis informationsangereicherter Gebäudemodellen. BIM-Systeme werden zunehmend in Bauprojekten eingesetzt, um mehr Transparenz und offenen Zugang zu Informationen über das Bauprojekt zu schaffen und die damit verbundene Informationsasymmetrie für das Projektteam zu reduzieren (Forsythe et al. 2015). Wichtige Projektinformationen werden zentral in einem einzigen Mo-

dell gespeichert und verwaltet, welches sich im Idealfall in einem gemeinsamen Projektdatenraum befindet. Laut Lin (2014) werden während der Bauphase durch die Abfrage des BIM-Modells als einzige verlässliche Informationsquelle (*single source of truth*) weniger Anfragen nach geänderten Aufträgen, eine höhere Produktivität, eine genauere Kostenschätzung und aussagekräftigere Visualisierungen möglich, was letztlich zu einer höheren Kundenzufriedenheit führt. Der Informationsaustausch gewährleistet eine wesentliche Verbesserung der Kollaboration für alle am Bauprozess beteiligten Akteure (Forsythe et al. 2015). Die Quantifizierung der beschriebenen BIM-Vorteile ist jedoch nach wie vor nicht unmittelbar zugänglich (Lu et al. 2013) und zum gegenwärtigen Zeitpunkt weiterhin Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen (Barlis/Sullivan, 2012, Won/Lee 2016). Vorläufige Erkenntnisse in diesem Zusammenhang beschränken sich bislang auf einzelne, nicht generalisierbare Kennwerte wie die BIM-bedingte Reduzierung von Informationsanfragen (*requests for information (RFI)*) und damit einhergehender schlanker Entscheidungsfindungsprozesse im Vergleich zum konventionellen Vorgehen (Barlish/Sullivan 2012). Unbestritten ist jedoch, dass der erhöhte Informationsaustausch durch den BIM-Ansatz insgesamt eine wesentliche Verbesserung der Kollaboration für alle am Bauprozess beteiligten Akteure mit sich bringt und somit zu einer partnerschaftlichen Projektabwicklung beiträgt (Forsythe et al. 2015).

Im Sinne der Fortschrittsüberwachung kann die Integration von Modellen mit Echtzeit-Felddatenerfassungssystemen zudem die Automatisierung im Bauprojektmanagement erhöhen. Darüber hinaus können Aktualisierungen, Analysen und das Erzeugen von Statusberichten regelmäßiger durchgeführt werden (Alizadehsalehi et al. 2016). Das geometrisch dreidimensionale Gebäudedatenmodell fungiert als Datenbank sämtlicher Projektdaten, wodurch wesentliche Dokumente und Information bauteilverknüpft visuell dargestellt werden können. Als daraus resultierender Vorteil kann eine wesentliche Unterstützung für den Entscheidungsfindungsprozess im Projekt genannt werden (Lin 2014, Redwood et al. 2017).

## 2.2. Gegenwärtige Unzulänglichkeiten der BIM-Methode:

Die korrekte Erstellung und Verwaltung eines BIM-Modells stellt viele kritische Punkte dar, welche, wenn sie nicht angemessen behandelt werden, den Nutzen des Ansatzes einschränken. Tatsächlich erfordert das BIM-Modellmanagement ein hohes Maß an Fachwissen, um die große Datenmenge und den hohen Detaillierungsgrad zu kontrollieren, die in

einem BIM-Modell enthalten sein können. Außerdem können verschiedene LOD-Stände der einzelnen Fachplaner zu Problemen der Datenkonsistenz bei der Modellübergabe führen (Mikyong Kim et al 2017). Die Bildung von Fachwissen (und / oder deren Aktualisierung) ist für Unternehmen mit hohen Kosten verbunden (Lin 2014) und bei sehr komplexen Gebäudemodellen ist es auch eine primäre Anforderung, das Projektteam mit leistungsfähiger Hardware auszustatten. Laut Forsythe et al. (2015), wirken sich die Kosten für Schulung und Hardware insbesondere bei kleineren und mittleren Unternehmen aus, die oft nicht in der Lage sind, diese hohen Kosten zu bewältigen.

Ein weiteres Manko, das von Forsythe et al. (2015), hervorgehoben wurde, ist die nicht automatische Aufzeichnung von Änderungen in Echtzeit, die zu verpassten Benachrichtigungen für die Projektgruppe führen kann. Tatsächlich gibt es keine automatischen Benachrichtigungen oder Hinweise auf die neuesten Änderungen oder Upgrades des Modells. Das Projektteam kann Änderungen, die von der letzten Person, die zuvor am Modell gearbeitet hat, nicht sofort erkennen.

Schließlich geben Kim et al. (2017) an, dass die BIM-Methode primär für die Planungsphase eines Bauvorhabens entwickelt wurde. Um ebenfalls eine effektive Nutzbarmachung zu ermöglichen und semantische Funktionalitäten für sekundäre Baustellenaktivitäten wie Lieferantenmanagement, Mängelmanagement etc. zu schaffen ist es derzeit noch erforderlich spezifische Plug-Ins oder Zusatzsoftware für die kommerziellen BIM-Modellierungssysteme zu entwickeln. Diese derzeitige Nicht-Berücksichtigung der Ausführungsphase ist vor allem darauf zurückzuführen, dass BIM-Modelle bauteilbasiert und nicht prozessbasiert erstellt werden, wodurch die modellinterne Eingabe von Bauausführungsrandbedingungen und zeitlichen Abhängigkeiten erschwert wird.

Außerdem wird eine Geolokalisierung des BIM-Modells mittels geographischen Koordinaten, die für das Flächenmanagement sehr nützlich wäre, durch die fehlende einfache Anbindung an GIS-Software erschwert (Bansal 2015).

Auch wenn es heute - insbesondere bei komplexeren Projekten - keine Ausnahme mehr ist, dass BIM-Modelle auch für 4D-Bauprozesssimulationen verwendet werden, ist der effektive Einsatz einer solchen Anwendung im täglichen Bauprozessmanagement nicht unbedingt gewährleistet. Dies liegt meist daran, dass der Ersteller des BIM-Modells üblicherweise nicht die gleiche Perspektive wie der spätere Terminplaner einnimmt. Um diesen Mangel zu beheben, müssten die BIM-Objekte nach

den Anforderungen der Terminplanung aufgegliedert werden, was derzeit noch nicht vollständig automatisiert möglich ist, so dass ein großer manueller Aufwand verbleibt, um BIM-Modelle unmittelbar für die Ausführungsphase nutzbar zu machen (Tulke/Hanff 2007).

### 3. Beschreibung der Methode/Ansatz

Der Ansatz für die effektive Anwendung von BIM im Bauprozessmanagement ist in Abbildung 1 dargestellt. Grundsätzlich sind zwei Informationsflüsse dargestellt. 1) *Quantity*: aus dem BIM - Modell werden wichtige Informationen wie z.B. die zu verbauende Menge (in Stück, Kubikmeter, Laufmeter, usw.) extrahiert und für die Planung zur Verfügung gestellt. 2) *Progress*: die Information über den Baufortschritt wird im BIM - Modell importiert und farbig bzw. intuitiv visualisiert bzw. allen beteiligten Akteuren zur Verfügung gestellt.

Die Autoren und auch die einschlägige Literatur haben die Integration mit Methoden des "Lean Construction Management" (LCM) als Ausgangspunkt für die mögliche Nutzung eines BIM-Modells in der Bauausführung identifiziert (Kröger 2018, Sacks et al. 2010). Der in Dallasega et al. (2015) beschriebene "Pitching"-Ansatz und seine Anwendung in der Bauindustrie werden in diesem Zusammenhang als LCM-Methodik verwendet, da sich diese im Kontext von lokalen KMUs bereits als zielführend erwiesen hat (Dallasega et al. 2016, Dallasega et al. 2018).

Dieser im Fassadenbau erfolgreich validierte Ansatz (Dallasega et al. 2016, Dallasega et al. 2018) wird derzeit im Forschungsprojekt "COCKPiT" - Collaborative Construction Process Management - unter Beteiligung norditalienischer KMU aus verschiedenen Baubereichen für eine integrierte Baustellenanwendung weiterentwickelt.

Ziel von COCKPiT ist es, eine geeignete Methodik zu definieren und darauf basierende IT-Tools zur Unterstützung des kollaborativen Prozessmanagements in der Bauausführung zu entwickeln. Das zu entwickelnde IT-System besteht aus den Modulen i) der kollaborativen Prozessmodellierung, ii) einer rollierenden kurzfristigen Arbeitsplanung auf Basis des Prozessmodells und iii) einer Fortschrittsüberwachung in Echtzeit inklusive Feedbackschleifen zur iterativen Optimierung der Vorgängermodule.

Das Modellierungs-Tool soll die kollaborativen Prozessplanungsworkshops unterstützen, in denen (a) die Einbauorte, (b) die dazugehörigen Arbeitsgänge, (c) deren Abhängigkeiten, (d) die benötigten Arbeitskräfte und (e) die sog. *Pitches* definiert werden.

Der Einbauort (EO)-spezifische *Pitch* für einen bestimmten Arbeitsgang steht zu dem in Abhängigkeit zur Einbaumenge, den dafür erforderlichen Arbeitskräften und ist für ein bestimmtes Zeitintervall definiert als:

$$Pitch_{EO_i,Arbeitsgang_j,Arbeitskräfte_k} = \frac{Einbaumenge_{ij}}{Zeitintervall} \quad (1)$$

Das Planungs-Tool soll das Konzept der rollierenden kurzfristigen Arbeitsplanung unterstützen, bei der die jeweiligen Arbeitsgänge entsprechend den Pitches für ein kurzfristiges Vorschauenfenster (z.B. in der Einheit von Wochen) und auf Basis des bisher erreichten Fortschritts eingeplant werden können.

Das Monitoring-Tool hingegen soll die Baufortschrittsmessung in Echtzeit unterstützen, was in der Baubranche durch eine tagesscharfe Messung realisiert werden kann (Dallasega et al. 2018).

Der mögliche Workflow für den BIM-gekoppelten COCKPiT-Ansatz ist in Abbildung 1 dargestellt.

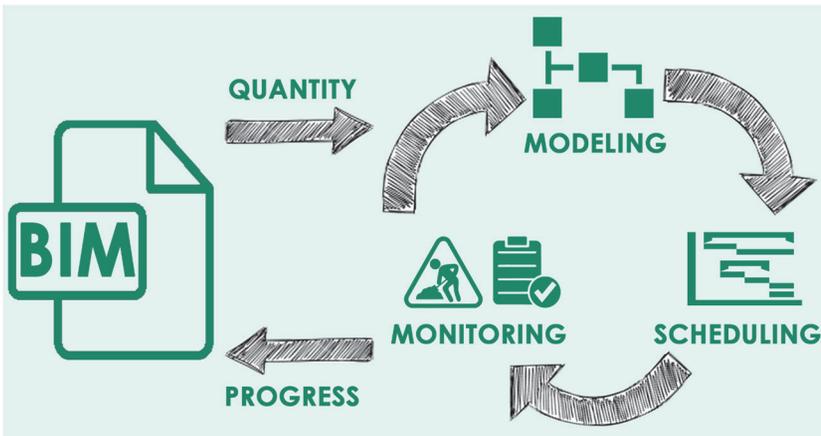


Abbildung 1: BIM Anwendung für das Bauprojektmanagement.

Bei Annahme, dass stets alle einzubauenden Mengen differenziert nach Einbauorten und in Abhängigkeit der jeweiligen Arbeitsgänge bekannt sind, ermöglicht der beschriebene COCKPiT-Ansatz in der Theorie zu jeder Zeit eine exakte Kontrolle des Baufortschritts, ausgedrückt in verbauten Mengen und verbrauchten Mannstunden.

Der Nachteil und zugleich eine der grundlegenden Einschränkungen des COckPiT-Ansatzes ist jedoch, dass diese Annahme in der Praxis nicht immer für jeden Einbauort, welche gemäß einer sog. *Location Break-down Structure* (LBS) im COckPiT-Ansatz definiert werden, erfüllt ist. Grundsätzlich werden die einzubauenden Mengen bei Bauprojekten in sogenannten Leistungsverzeichnissen angegeben. Tatsächlich handelt es sich hierbei um Gesamtmengen bezogen auf einzelne Leistungspositionen und spiegeln in der Regel nicht die Struktur der LBS, und damit nicht die Detailplanung einzelner Arbeitsgänge, wider, so dass keine Verknüpfung zwischen den ortsspezifischen Arbeitsgängen und den dazugehörigen Mengen möglich ist. Informationen, die in einem Leistungsverzeichnis zu finden sind - wie zum Beispiel, dass insgesamt 7.000 m<sup>3</sup> Beton eingebaut werden müssen - bieten nur die Möglichkeit einer allgemeinen Kosten- und Aufwandskontrolle, geben aber keine tieferen Erkenntnisse für die tägliche Baustellensteuerung. Eine Möglichkeit, diese Unzulänglichkeit zu umgehen, bestünde in der manuellen Ermittlung der benötigten Mengen für einzelne Einbauorte aus Raumbüchern oder Plänen. Dies bedeutete jedoch einen erheblichen Aufwand im Rahmen der Arbeitsvorbereitung, einer Projektphase, die in der Regel so kurz wie möglich gehalten werden soll, da diese aus Bauherrensicht nicht als unmittelbar wertschöpfend zu betrachten ist. Dies gilt insbesondere im Kontext kleiner und mittlerer Unternehmen (KMU): Diese sind folgerichtig üblicherweise in Projekten kleiner und mittlerer Größe involviert, in welchen kurze Projektdauern meist keine umfangreichen Maßnahmen zur Arbeitsvorbereitung rechtfertigen.

Eine praktische und intuitiv denkbare Lösung dieser Limitierung - und damit der bis dato fehlende Teil für eine zielführende Anwendung des COckPiT-Ansatzes - wäre daher eine Kopplung an die BIM-Methode. Dies würde zu dem bedeuten, dass die wertvollen Informationen aus der Planungsphase nicht - wie bereits weiter oben in diesem Beitrag beschrieben - wie üblich mit Beginn der Ausführung verloren gehen, sondern für den Einsatz auf der Baustelle planmäßig zur Verfügung gestellt werden. Diese Sichtweise auf BIM als Katalysator für eine verbesserte Prozesseffizienz während der Bauausführung wurde von den am COckPiT-Forschungsprojekt beteiligten Industriepartnern<sup>1</sup> durchgängig und insbesondere im Hinblick auf die automatisierte Mengenermittlung bestätigt: Durch die Möglichkeiten von BIM zur einbauortsspezifischen Mengenermittlung gemäß einer zuvor definierten LBS stehen alle

---

<sup>1</sup> Hierbei handelt es sich um norditalienische KMU, die verschiedene Gewerke der Bauindustrie repräsentieren

Einzelmenigen für die Detailmodellierung der Ausführungsprozesse unmittelbar zur Verfügung. Darüber hinaus ermöglicht das *Pitching*-Konzept durch die Integration beider Ansätze eine automatische Berechnung von Vorgangsdauern und des zugehörigen Arbeitsaufwandes für jeden einzelnen Arbeitsgang.

Des Weiteren wäre es zweifelsohne erstrebenswert, das BIM-Modell nicht nur als initiale Datenquelle für die Einrichtung eines Baustellenmanagementsystems zu nutzen, sondern auch den Fortschritt der Baustelle selbst im Model zu visualisieren. Dies bedeutete - mit anderen Worten ausgedrückt - zu jedem Zeitpunkt der Bauphase ein sog. *As-Built*-Modell erzeugen zu können. Wie oben beschrieben, bietet der COCKPiT-Ansatz im Monitoring-Modul die Möglichkeit, den Baufortschritt nahezu in Echtzeit zu erfassen. Im Detail kann der Baufortschritt für jeden Arbeitsgang und dem zugehörigen Einbauort gemäß LBS bestimmt werden. Um diesen Fortschritt innerhalb des BIM-Modells sichtbar zu machen, ist eine Verknüpfung der einzelnen Arbeitsgänge mit den entsprechenden BIM-Objekten auf Datenverarbeitungsebene erforderlich. Dabei ist es wichtig zu wissen, dass einzelne BIM-Objekte mehrere Arbeitsgänge umfassen können, da die physischen Bauteile auf der Baustelle oftmals mehrere verschiedene Installationsschritte erfordern können<sup>2</sup>.

Für diese Verknüpfung bietet die eingangs bereits eingeführte Ifc-Datenstruktur als Austauschsprache für BIM-Objekte standardmäßig Beschreibungsmöglichkeiten auf DV-Ebene an: Auf dieser stellt jedes modellierte BIM-Objekt ein sogenanntes *IfcObject* dar, welches eine Superklasse für sämtliche dieses Objekt betreffende Informationen darstellt. Diese Informationen werden in Instanzen sogenannter Unterklassen gespeichert. Für Informationen, die die Bauausführung betreffen sind insbesondere die Unterklassen *IfcProcess* und *IfcTask* von Bedeutung (Borrmann et al. 2015). Das Prinzip von Super- und Unterklassen ist auch in Abbildung 3 ersichtlich.

Dank der prozessrelevanten Unterklassen können den Objekten der Gebäudestruktur innerhalb eines BIM-Modells Vorgangsdauern zugeordnet werden (Braun 2013). Seit der Einführung von Ifc Version 4 ist es sogar möglich, diesen Objekten explizite Start- und Enddaten zuzuordnen. Abbildung 2 zeigt diese hinzugekommene Funktionalität: *IfcTask*-

---

<sup>2</sup> Beispielsweise erfordern Stahlbetonbauteile neben dem eigentlichen Betoniervorgang u.a. auch das Errichten einer Schalung und das Einlegen der Bewehrung

Objekten können die neu eingeführten *IfcTaskTime*-Objekte direkt zugeordnet werden, welche Eigenschaften wie *ScheduleStart* und *ScheduleFinish* aufweisen. Darüber hinaus verdeutlicht das Instanzierungsdiagramm die Möglichkeit zur Gliederung von Arbeitsgängen, wie sie beispielsweise bei der Modellierung von Stahlbetonbauteilen notwendig ist (Relation von *1st* und *2nd level tasks*).

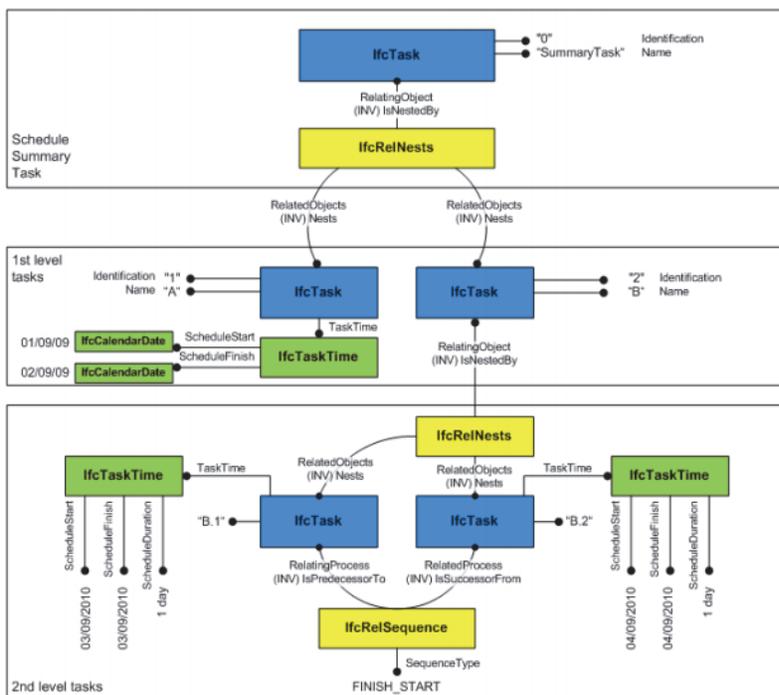


Abbildung 2: ifcTask Instanzierungsdiagramm (buildingSMART 2018).

Grundsätzlich würde diese Datenstruktur es also ermöglichen, den Fortschrittsstatus verschiedener Arbeitsgänge zeitabhängig mit den zugehörigen BIM-Objekten zu verknüpfen. Diese bereitgestellten Informationen könnten dann u.a. zur Visualisierung des Baufortschritts verwendet werden, indem nur Objekte mit bestimmten Attributen selektioniert werden.

Ein vollständiges Zuweisen und Aufrufen aller existierenden Ifc-Informationen innerhalb einer Modellierungsumgebung wird zurzeit jedoch

von den meistgenutzten Modellierungstools auf dem Markt nicht unterstützt. Obwohl diese Modellierungstools in der Regel die Möglichkeit bieten, einzelnen Objekten, z.B. Fenstern oder Wandabschnitten Materialeigenschaften zuzuweisen (ausgedrückt durch die Ifc-Klasse *IfcMaterial*), ist der Zugriff auf andere Klassen wie z.B. die zuvor angesprochenen Prozessparameter (*IfcProcess* und *IfcTask*) oft programmintern nicht möglich. Abbildung 3 verdeutlicht diesen Zusammenhang in vereinfachter Darstellung nochmals: Materialbetreffende Informationen können an den grün dargestellten Speicherplatz abgespeichert werden (*IfcMaterial*), während die blau dargestellten Speicherplätze programmintern nicht angesprochen werden können, obwohl diese datenstrukturell vorgesehen sind (*IfcProcess* und *IfcTask*). Die gelb dargestellten Felder beschreiben lediglich die Relationen der einzelnen Bauteilparameter.

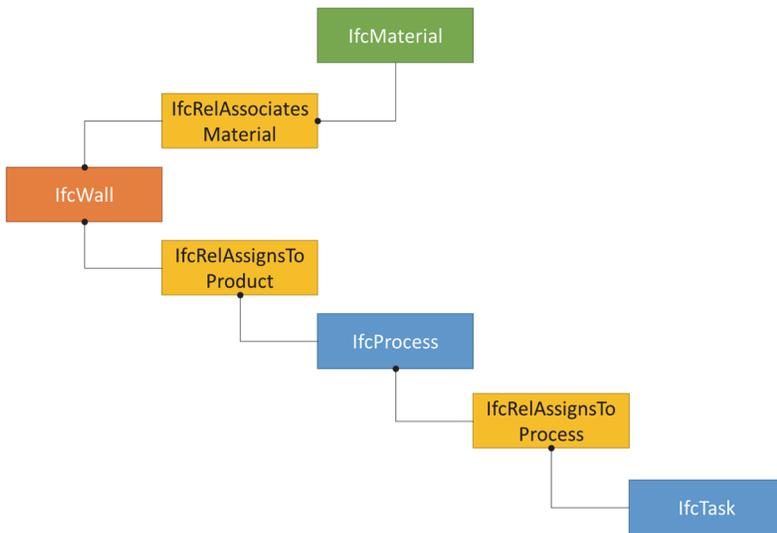


Abbildung 3: Prinzipiell mögliche Objekt-Relationen in der Ifc Datenstruktur.

Als weitere anschauliche Erklärung kann man sich in diesem Zusammenhang des Bildes eines Schrankes mit vielen abschließbaren Schubladen bedienen: Jede Schublade ist zur Lagerung spezifischer Gegenstände vorgesehen. Allerdings fehlt für einige dieser Schubladen der Schlüssel zu deren Öffnung, sodass weder neue Gegenstände des jeweiligen Typs hinein, noch bereits vorhandene Gegenstände herausgeholt werden können.

Um die zuvor beschriebenen Vorteile der Echtzeit-Fortschrittsvisualisierung im BIM-Modell trotz dieser Unzulänglichkeiten der auf dem Markt existierenden Modellierungstools nutzen zu können, wurde in der nachfolgend beschriebenen Fallstudie ein Workaround innerhalb einer dieser Standard-Modellierungssoftware (Graphisoft ArchiCAD) etabliert. Dieser Workaround ermöglicht die farbliche Hervorhebung einzelner BIM-Objekte in Abhängigkeit ihres Fertigstellungsgrades ohne auf die entsprechenden Ifc-Prozessklassen zugreifen zu müssen.

Der hier vorgestellte Workaround wird derzeit als Fallstudie zur Überprüfung des Konzepts bei einem Fassadenhersteller getestet: Im nächsten Abschnitt wird in diesem Zusammenhang darüber hinaus erläutert, wie der Workaround in diesem Testszenario verwendet wird, um den COCKPIT-Ansatz mit BIM zu koppeln.

#### 4. Fallstudie

Der vorgeschlagene Ansatz wurde in Zusammenarbeit mit einem Engineer-to-Order (ETO) Fassadenlieferanten in Norditalien entwickelt. Das Unternehmen entwirft, beschafft (Einkauf und/oder Eigenfertigung) und montiert hochwertige Designfassaden in weltweit verteilten Projekten. Da das Unternehmen ein schnelles Wachstum erzielte und wichtige Projekte in Großbritannien, den USA und Europa akquirierte, begann es, die Untervergabe von Montagearbeiten vor Ort zu erhöhen. Daher wurde eine detaillierte Planung und Überwachung der verschiedenen Bauprojekte ein wichtiger Aspekt, um eine akzeptable Rentabilität des Unternehmens zu garantieren. In Abbildung 4 ist die Übersicht der Baulieferkette und die in der Fallstudie verwendeten Tools zur Steuerung dargestellt. Die Zulieferkette d.h. die technische Planung der Bauteile und deren Produktion bzw. Beschaffung wird mit dem Enterprise Resource Planning (ERP) System des Unternehmens gesteuert. Die Tätigkeiten vor Ort werden mit dem vorher beschriebenen Cockpit Tool geplant und gesteuert. Die Endmontage im Produkt d.h. im Gebäude wird mit BIM unterstützt. Um einen reibungslosen Informations- bzw. Materialfluss zu gewährleisten wird in den nächsten Textabschnitten der Ansatz zur Synchronisierung vorgestellt.

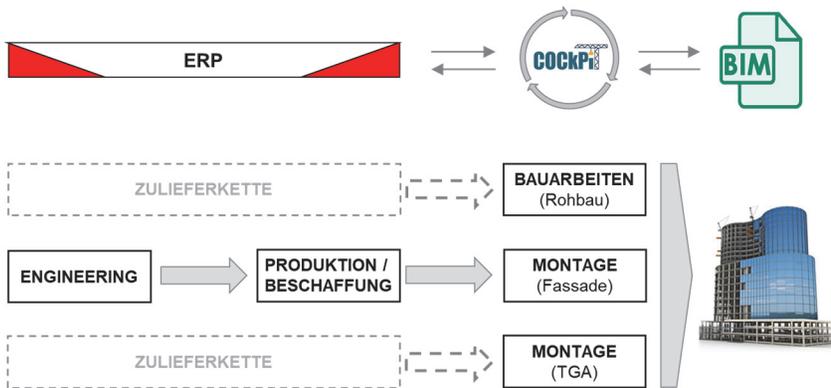


Abbildung 4: Übersicht der Baulieferkette und Steuerungstools.

Ziel der Zusammenarbeit des Fassadenlieferanten ETO mit den Forschungsinstituten war es zu analysieren, wie BIM zur Unterstützung der Bauausführung eingesetzt werden kann. Die Fallstudie besteht aus einem Bürogebäude in der Schweiz, das für rund 600 Mitarbeiter konzipiert wurde. Die Fassadenmontagetechnik besteht aus der konventionellen Gebäudetechnik, dem so genannten Pfosten-Riegel-System, bei dem jedes einzelne Halbfertigteil separat zur Montage auf die Baustelle geliefert wird. Das Bauvorhaben besteht aus einer Innen- und einer Außenfassade. Die Innenfassade dient der Wärmedämmung des Gebäudes, während die Außenfassade hauptsächlich für Designzwecke konzipiert wurde. Die Arbeiten zur Montage der Fassaden vor Ort begannen Ende Mai 2017 (KW 21 - 2017) und sollen voraussichtlich bis Ende September 2018 (KW 39 - 2018) abgeschlossen sein.

Zunächst wurde vom Forschungsteam ein kollaborativer Prozessplanungsworkshop mit dem Projektleiter, dem Vorarbeiter vor Ort und dem verantwortlichen Konstrukteur organisiert. Eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise in den Prozessplanungsworkshops finden Sie unter Dallasega et al. (2018). Kurzgefasst, die Arbeitsgänge vor Ort, die benötigten Arbeitskräfte und die spezifischen Bauabschnitte (in Englisch Construction Areas CAs) werden definiert. Abbildung 5 veranschaulicht die Definition der CAs. Das Gebäude wurde zunächst in Ebenen von 1 bis 3 unterteilt, danach wurde jede Ebene nach der Sonnenausrichtung (Nord, Ost, Süd und West) weiter unterteilt. Jede Orientierung wurde weiter in zwei Abschnitte aufgeteilt. Der auf der linken Seite der Grundrisszeichnung dargestellte Fassadenteil wurde mit der Nummer eins und die Fassade auf der rechten Seite mit der Nummer zwei

benannt. Danach wurden Baueinheiten (in Englisch Construction Units CUs) als Bereich zwischen zwei Hauptachsen des Gebäudes festgelegt. Die Fallstudie bezieht sich im Detail auf den Bauabschnitt Süd und den Teil 1. Hier besteht die erste Ebene aus 25 CUs, die zweite Ebene aus 24 CUs und die dritte Ebene aus 23 CUs. Jede Ebene der Außenfassade besteht aus 23 CUs.

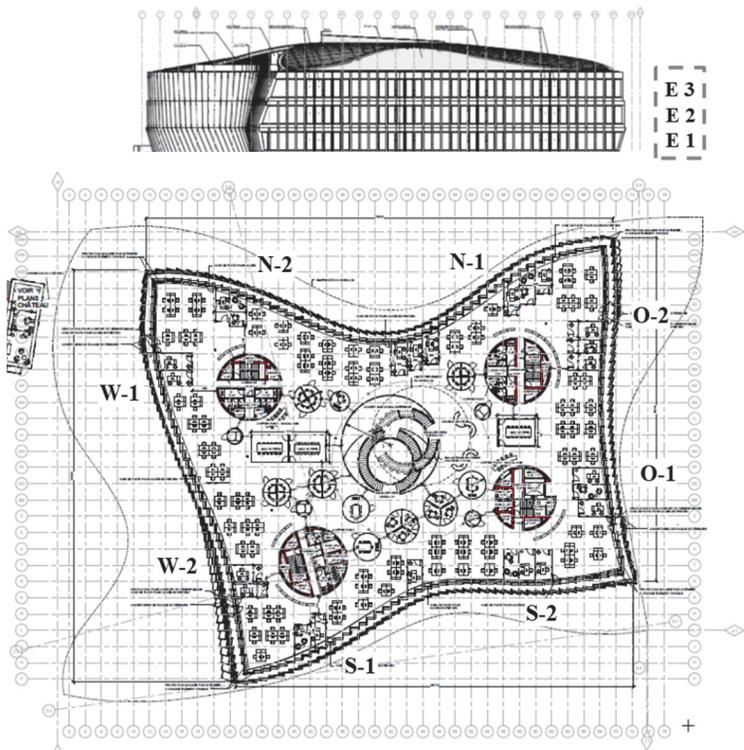


Abbildung 5: Definition der Bauabschnitte.

#### 4.1. BIM-Schnittstelle zur Bauprozessplanung

Zur Anwendung des vorgeschlagenen Ansatzes wurde das BIM-Modell vom Generalunternehmer angefordert und ArchiCAD als Software-Tool eingesetzt. Jeder CU einer bestimmten Ebene und Ausrichtung wurden die erforderlichen Arbeitsgänge zugewiesen. Darüber hinaus wurden die benötigten Bauteile, die in jeder einzelnen CU installiert werden müssen, spezifiziert. Als praktisches Beispiel wird der Arbeitsgang für die

Montage von Konsolen mit dem Akronym B verwendet. Hierbei soll eine Menge von 2 Stück in jede CU der Innenfassade eingebaut werden. Aus dem BIM-Modell wurde eine Menge von 582 CUs extrahiert. Für diesen Arbeitsgang wurde eine Dauer von 24 Tagen bei einer Truppstärke von zwei Mitarbeitern und drei Truppen (6 Mitarbeiter) während der Prozessplanung geschätzt. Daraus ergibt sich ein Pitch von 24,3 CUs/Tag. In praktischen Worten bedeutet dies, dass eine Menge von mindestens 25 CUs pro Tag abgeschlossen werden soll, um das zur Verfügung stehende Budget einhalten zu können.

#### 4.2. BIM-Schnittstelle zur Bauprozessplanung und -überwachung

In Tabelle 1 ist der im Monitorings-Modul von Kalenderwoche (KW) 23 - 2017 erreichte Fortschritt dargestellt. Hier wurde am Montag KW 23 - 2017 in den Bauabschnitten W1 und W2 ein Fortschritt von 25 CU erreicht. Somit entstand an diesem Tag keine Abweichung zum Pitch. Am Dienstag konnte jedoch nur 18 CUs in W2 abgeschlossen werden, da es zu einem Fertigungsfehler, insbesondere zu einer größeren Abweichung bei den Bohrungen der Konsolen gekommen ist. Dies hat zu einer Abweichung von -13,44 Stunden geführt. Obwohl am Mittwoch, Donnerstag und Freitag mehr als die Vorgabe des Pitch abgeschlossen werden konnte, ergab sich am Ende von KW23 - 2017 eine Gesamtabweichung von -4 CUs und -7,68 Stunden.

	<b>KW 23 - 2017</b>					
	Mo.	Di.	Mi.	Do.	Fr.	<b>Total</b>
Pitch [CU/Tag]	25	25	25	25	25	<b>125</b>
Fortschritt [#CU]	25	18	26	26	26	<b>121</b>
Fortschritt [CA]	W1-W2	W2	W2	W2-S1	S1	
Fortschritt [CU]	0	-7	1	1	1	<b>-4</b>
Abweichung [h]	0	-13,44	1,92	1,92	1,92	<b>-7,68</b>

Tabelle 1: Fortschritts Monitoring von KW23 - 2017.

In Tabelle 2 ist die Schnittstelle des Prozessüberwachungsmoduls zum BIM-Modell mit einem Detaillierungsgrad von LOD 300 dargestellt. Hier wird die Zuordnung von Arbeitsgängen und Bauteil-Mengen zu jeder CU für den Bauabschnitt S-1 dargestellt. Die Variable "Fortschritt" gibt die Anzahl der bis zu einem bestimmten Zeitpunkt installierten Bauteile an. Die Variable Nichtkonformitätsbericht (Non Conformity Report) zeigt an, ob für einen bestimmten Arbeitsgang in einer CU Qualitätsprobleme aufgetreten sind, auf die ein Bericht verwiesen wird. Außerdem gibt die Variable "time delay" an, ob ein Arbeitsgang in einem CU zu spät erledigt wurde.

CU	Fassade	Arbeitsgang	Menge [#]	Fortschritt [#]	NCR	Zeit Verzögerung [Ja/Nein]
1-S-1-1	Interne	B	2	2		
...	...	...	...	...	...	...
1-S-1-25	Interne	B	2	2		
2-S-1-1	Interne	B	2	2		
2-S-1-2	Interne	B	2	2		
2-S-1-3	Interne	B	2	2		
2-S-1-4	Interne	B	2	2		
2-S-1-5	Interne	B	2	2		
2-S-1-6	Interne	B	2	2		Ja
2-S-1-7	Interne	B	2	2		Ja
2-S-1-8	Interne	B	2	2	201608-NCR-019	Ja
2-S-1-9	Interne	B	2	2		Ja
2-S-1-10	Interne	B	2	2		Ja

Tabelle 2: Schnittstelle Modul Monitoring mit BIM LOD 300 von CW23 - 2017.

Der Baufortschritt wird durch die Verwendung von Farben im digitalen Modell laut dem Ampelsystem visualisiert. Wenn alle Arbeitsgänge in einer CU erledigt sind, wird sie mit der Farbe Grün dargestellt. Sobald ein Arbeitsgang im Gebäudemodell gestartet wird, werden die CUs mit der Farbe Gelb visualisiert. Wenn Zeitverzögerungen auftreten, werden die CUs mit der Farbe Orange visualisiert und wenn sie von Qualitätsproblemen betroffen sind, werden sie rot dargestellt.

Die Montagesequenz der Konsolen wurde mit dem Generalunternehmer vereinbart. Die Montagesequenz soll ab der Ostfassade starten, gegen den Uhrzeigersinn und von unten nach oben durchgeführt werden. Bis KW23 - 2017 wurden die Konsolen in der erste Ebene montiert. Jedoch wurden 5 CUs in der zweiten Ebene zu spät fertig gestellt. So wie bereits erwähnt sind im Projekt zwei Konsolen pro Bauabschnitt vorgesehen. In Anbetracht der CU "2-S-1-6" wurde eine Konsole richtig eingebaut und die Andere konnte aufgrund eines Fertigungsfehlers (Löcher wurden falsch gebohrt), nicht eingebaut werden. Als solche wird diese CU mit der Farbe Rot visualisiert und enthält den Code des NCR, in dem das Problem detailliert beschrieben wird. Abbildung 6 veranschaulicht den bis zu KW23 2017 erreichten Baufortschritt grafisch im BIM-Modell.

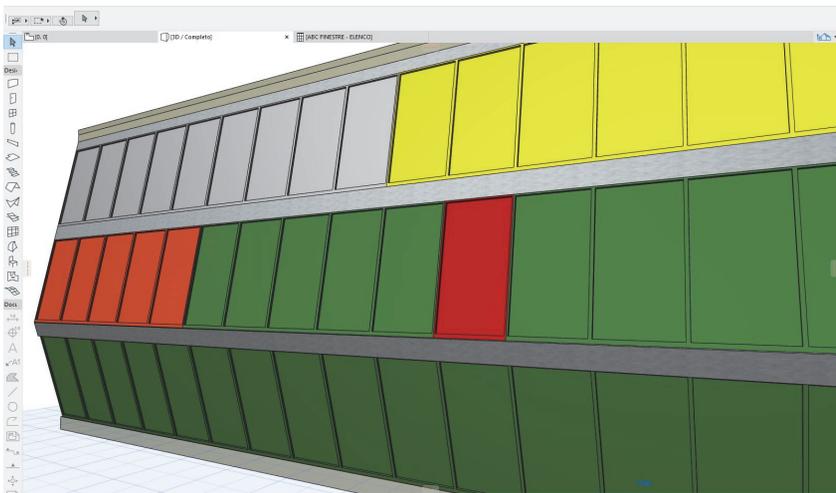


Abbildung 6: Grafische Visualisierung des Baufortschritts in BIM LOD300.

#### 4.3. Potentiale von BIM für Baulieferketten

So wie bereits in Kapitel 2 angekündigt birgt BIM ein großes Potential um die Transparenz des Bauprozesses zu steigern. Wichtige Informationen welche zur Steuerung der Baulieferkette dienen werden zentral im Gebäudemodell gespeichert und stehen für alle Baubeteiligten möglichst in Echtzeit zur Verfügung.

- 1) Frühzeitige Identifizierung von potentiellen Problemen: dies ermöglicht ein zeitgerechtes Umsetzen von Maßnahmen welches eine Explosion der Kosten vermeidet.
- 2) Transparente Visualisierung des Baufortschritts: dies ermöglicht eine bedarfssynchrone Materialanlieferung zur Baustelle. Frühzeitige Lieferungen welche kostspielige Zwischenlagerungen erfordern werden somit vermieden. Späte Lieferungen welche verschwenderische Baustopps durch fehlendes Material verursachen können drastisch reduziert werden. Als Fazit kann gesagt werden, dass eine bedarfssynchrone Materialanlieferung verschiedene nicht wertschöpfende Tätigkeiten (wie z.B. Warten, Suchen oder übermäßiges Handhaben von Material) drastisch reduzieren kann.
- 3) Durch eine detaillierte Information der benötigten Bauteile im Gebäude (z.B. Anzahl der zu verbauenden Konsolen) welche frühzeitig den Beteiligten zur Verfügung steht, wird eine detaillierte und zuverlässige Planung des Ausführungsprozesses möglich.

#### 5. Diskussion

Dieser Beitrag hat aufgezeigt, dass die Ifc-Datenstruktur prinzipiell die Eingabe von Prozessdaten in das BIM-Modell erlaubt. Aktuelle, kommerziell erhältliche und weit verbreitete Modellierungsprogramme wie Revit, Allplan, Archicad setzen dem Anwender bei der Modellierung von BIM-Objekten jedoch weiterhin proprietäre Grenzen: Während Zuordnungen von Modellobjekten zu Materialeigenschaften oft noch innerhalb der Modellierungsumgebung erfolgen können, können andere Klassen nicht angesprochen werden, wodurch deren Verwendung - wie z.B. die Zuweisung von Arbeitsgängen - bis dato programmintern nicht möglich ist.

Um diese Verknüpfungen beliebiger Objekte zu ermöglichen, wäre es notwendig, die Ifc-Datenstruktur in eine ausführbare Programmstruktur zu überführen, wozu objekt-orientierte high-level Programmiersprachen wie beispielsweise Java oder C++ sehr gut geeignet wären. Zu diesem Zweck stehen bereits zahlreiche Ifc-Bibliotheken zur Verfügung, die

ein *late* oder *early binding* von BIM-Objekten an die Instanzen solcher Programmiersprachen zur weiteren Manipulation ermöglichen.

Im Laufe des Forschungsprojekts "Cockpit" ist zudem geplant den Ausführungsprozess von Gewerken im Rohbau (wie z.B. Maurerarbeiten) und Gewerken im Innenausbau (wie z.B. Technische Gebäudeausstattung) zu berücksichtigen.

Zudem ist geplant Open Source Bibliotheken in das COckPiT-Tool zu integrieren, um die BIM-Modelle mit Pitch-Informationen sowie Start- und Endzeit- und Fortschrittsinformationen anzureichern.

## 6. Schlussfolgerungen

In diesem Beitrag wurde aufgezeigt, wie BIM zur Unterstützung des Bau-Projektmanagements eingesetzt werden kann. Besonderes Augenmerk wurde darauf gelegt, wie BIM zur Unterstützung der Planung und Überwachung eines Bauvorhabens verwendet werden kann. Es wurde untersucht, inwieweit das Dateiformat *Information Foundation Classes* (IFC) den Informationsaustausch zwischen der technischen Gebäudeplanung und Bauausführung unterstützt.

BIM, wie auch andere Konzepte im Industrie 4.0 Zeitalter, werden zuerst von größeren Unternehmen übernommen. Wir sind jedoch der Meinung, dass auch kleine und mittlere Unternehmen BIM-Modelle nicht nur für den Entwurfsprozess, sondern für die Steuerung des Bauprozesses verwenden können. Einschlägige Literatur und Industrieakteure sind sich zudem einig, dass BIM im heutigen Verständnis digitale Innovationen im Bauwesen repräsentiert und überhaupt erst ermöglicht und deshalb als Grundlage zur sogenannten Baustelle 4.0 gesehen werden muss (Günthner/Borrmann, 2011). Die Autoren möchten mit diesem Beitrag unterstreichen, dass die systematische BIM-Anwendung in Bauausführungsprozessen auch für KMU sinnvoll und - durch die Fallstudie belegt - absolut umsetzbar ist, sodass ein möglicher Weg in Richtung KMU 4.0 für Unternehmen des Bausektors aufgezeigt wurde. Aus diesem Grund sind zukünftige Forschungsvorhaben notwendig, um den Prozess zur Handhabung von BIM-Modellen für die Unterstützung des Baustellenmanagements zu automatisieren.

Die Autoren arbeiten derzeit am Forschungsprojekt COckPiT (Collaborative Construction Process Management) mit dem Ziel, Methoden und Softwaretools zur Modellierung, Planung und Überwachung kleiner und mittlerer Bauvorhaben zu entwickeln. Der Ansatz zur intuitiven Visualisierung des Baufortschritts soll in Zukunft in webbasierten Open-

Source-BIM-Viewern mittels Filterung nach den IfcTask-Einträgen dargestellt und damit dem gesamten Projektteam jederzeit und von überall zugänglich gemacht werden.

## 7. Danksagung

Die in diesem Artikel vorgestellten Forschungsarbeiten wurden im Rahmen des Forschungsprojekts "Collaborative Construction Process Management (Cockpit)" durchgeführt, das vom Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) im Rahmen des Grant FESR1008 finanziert wird.

## Literatur

- Alizadehsalehi, S., Yitmen, I. (2016). The Impact of Field Data Capturing Technologies on Automated Construction Project Progress Monitoring, *Procedia engineering*, Vol. 161, S.97-103.
- American Institute of Architects Contract Documents (2018). Online verfügbar unter: <https://www.aia.org/digitaldocs>, zuletzt geprüft am 14.06.2018.
- Barlish, K., Sullivan, K. (2012). How to measure the benefits of BIM - A case study approach. *Automation in Construction*, Vol. 24, S. 149–159.
- Borrmann, A., König, M., Koch, C., Beetz, J., Borrmann, A., König, M., Koch, C., Beetz, J., (2015). *Building Information Modeling*, VDI-Buch.
- Braun, A., (2013). Entwicklung eines 4D-BIM-Viewers mit graphbezogener Darstellung von Bauabläufen und – alternativen (Master's Thesis). Technical University of Munich. Germany.
- Cheng, J. C., Lu, Q. (2015). A review of the efforts and roles of the public sector for BIM adoption worldwide, *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, Vol. 20 (27), S. 442-478.
- Construction Specifications Institute. Online verfügbar unter: <https://www.csi-resources.org/home>, zuletzt geprüft am 14.06.2018.
- Dallasega, P., Marengo, E., Nutt, W., Rescic, L., Matt, D.T., Rauch, E., (2015). Design of a Framework for Supporting the Execution-Management of Small and Medium sized Projects in the AEC-industry. In 4th International Workshop on Design in Civil and Environmental Engineering, Taipei, Taiwan. S. 12.

- Dallasega, P., Marcher, C., Marengo, E., Rauch, E., Matt, T., Nutt, W., (2016). A Decentralized and Pull - Based Control Loop for on - Demand Delivery in Eto Construction Supply Chains. In Proc. 24th Ann. Conf. of the Int'l. Group for Lean Construction. S. 33–42.
- Dallasega, P., Rauch, E., Frosolini, M. (2018). A Lean Approach for Real-Time Planning and Monitoring in Engineer-to-Order Construction Projects, Buildings, Vol. 8 (38), S. 1-22.
- Ding, L. Y., Zhou, Y., Luo, H. B., Wu, X. G. (2012). Using nD technology to develop an integrated construction management system for city rail transit construction, Automation in Construction, Vol. 21 (7), S. 64–73.
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R. and Liston, K. (2011). BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Forsythe, P., Sankaran, S., & Biesenthal, C. (2015). How far can BIM reduce information asymmetry in the Australian construction context?, Project Management Journal, Vol. 46 (3), S.75-87.
- Günthner, W., Borrmann, A., (2011). Digitale Baustelle- innovativer Planen, effizienter Ausführen, Werkzeuge und Methoden für das Bauen im 21. Jahrhundert. Springer Verlag.
- Il ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. (2018) Codice dei contratti pubblici articolo 23 decreto 50/2016 comma 13.
- Ingenieurkammer Thüringen. DIB Thüringen – Ingenieurblatt regional Nummer 03/2017. Online verfügbar unter <https://www.ikth.de/>, zuletzt geprüft am 14.06.2018.
- Jeong, W., Chang, S., Son, J., Yi, J., (2016). BIM-Integrated Construction Operation Simulation for Just-In-Time Production Management, Sustainability, Vol. 8, S. 1106.
- Kröger, S., (2018). BIM und Lean Construction - Synergien zweier Arbeitsmethodiken. Berlin: Beuth Verlag.
- Lin, Y. C. (2014). Construction 3D BIM-based knowledge management system: a case study, Journal of Civil Engineering and Management, Vol. 20 (2), S. 186-200.
- Lu, W., Peng, Y., Shen, Q., Li, H., 2013. Generic Model for Measuring Benefits of BIM as a Learning Tool in Construction Tasks. J. Constr. Eng. Manag., Vol. 139, S. 195–203.
- Masterplan Bauen 4.0. Online verfügbar unter <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Digitales/strategiepapier-masterplan-bauen.html>, zuletzt geprüft am 14.06.2018.
- McArthur, J. J. (2015). A building information management (BIM) framework and supporting case study for existing building operations, maintenance and sustainability, Procedia engineering, Vol. 118, S. 1104-1111.
- Ratajczak, J., Schimanski, C.P., Marcher, C., Riedl, M., Matt, D.T., (2017). Mobile Application for Collaborative Scheduling and Monitoring of Construction Works According to Lean Construction Methods. In: Luo, Y. (Hrsg.): Cooperative Design, Visualization,

- and Engineering: 14th International Conference, CDVE 2017, Mallorca, Spain, September 17-20, 2017, Proceedings. Cham: Springer International Publishing, S. 207–214.
- Rauch, E., Dallasega, P., Matt, D. T. (2018). Complexity reduction in engineer-to-order industry through real-time capable production planning and control. *Production Engineering*, Vol. 12 (3-4). S. 341-352.
- Redwood, J., Thelning, S., Elmualim, A., Pullen, S. (2017). The proliferation of ICT and digital technology systems and their influence on the dynamic capabilities of construction firms. *Procedia Engineering*, Vol. 180, S. 804-811.
- Sacks, R., Radosavljevic, M., Barak, R., (2010). Requirements for building information modeling based lean production management systems for construction. *Automation in Construction*, Vol. 19 (5), S. 641–655.
- Singh, N., Singh, B., Singh, H., Singh Rai, H., (2017). Building Information Modeling Interoperability Issues. *Int. J. Eng. Technol. Sci. Research*, Vo. 4, S. 1–21.
- Tulke, J., Hanff, J., (2007). 4D Construction Sequence Planning – New Process and Data Model. *Proc. CIB-W78 24th Int. Conf. Inf. Technol. Constr.* 79–84.
- Won, J., Lee, G., 2016. How to tell if a BIM project is successful: A goal-driven approach. *Automation in Construction*, Vol. 69, S. 34–43.



# Digitalisierungsstrategien: eine systematische Analyse der wissenschaftlichen Literatur und der EU-Projekte

Vorläufige Ergebnisse des Interreg Italien-Österreich Projektes  
A21 Digital Tyrol Veneto

Guido Orzes<sup>1</sup>, Riccardo Brozzi<sup>2</sup>, Mario Goldin<sup>1</sup>, Dominik T. Matt<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Industrial Engineering and Automation, Freie Universität Bozen

<sup>2</sup>Fraunhofer Italia Research s.c.a.r.l., Bozen

## 1. Einleitung

In den vergangenen zwei Jahrzehnten haben die Entwicklungen rund um das Thema Digitalisierung zu erheblichen Veränderungen in Wirtschaft, Arbeitswelt, Gesellschaft und Bildung geführt (Curran 2018). Jedoch sind weitaus radikalere Veränderungen in den nächsten Jahren zu erwarten.

Dieses Buchkapitel – entstanden aus der Kooperation zwischen der Freien Universität Bozen und dem Forschungsinstitut Fraunhofer Italia Research – enthält die vorläufigen Ergebnisse der ersten Phase (Stand der Technik) des Interreg Italia-Österreich Projektes A21 Digital Tyrol Veneto, das darauf abzielt, eine Grundlage für Strategien und Richtlinien für politische Entscheidungsträger der Makro-Region Tirol-Veneto zur Digitalisierung zu entwickeln.

Zielsetzung dieses Kapitels ist es, eine systematische Analyse der wissenschaftlichen Literatur sowie der wichtigsten von der EU geförderten Forschungsprojekte zum Thema Digitalisierung zu entwickeln, um eine Aussage über den aktuellen Wissenstand in diesem Bereich und die zukünftigen Entwicklungen treffen zu können.

Es wurden insgesamt 60 wissenschaftlichen Arbeiten identifiziert und analysiert, die sich mit dem Thema Digitalisierung befassen. Die Arbeiten wurden je nach Forschungszweck, Methodik, Analyseverfahren, Region/Länderfokus und Forschungssäule (Economy 4.0, Work 4.0, Education 4.0, Society 4.0) klassifiziert.

Demzufolge haben sich vier Hauptthemen bezüglich der Digitalisierungsforschung herauskristallisiert: 1) Konzepte & Strategien, 2) Technologien, 3) Befähiger sowie 4) Auswirkungen und Risiken der Digitalisierung. Die verschiedensten Faktoren bzw. Unterthemen dieser vier Hauptthemen wurden schließlich zusammengefasst.

Darüber hinaus wurden 89 durch die verschiedensten EU-Förderprogramme geförderten Digitalisierungsprojekte identifiziert. Die Chancen, Herausforderungen, Risiken, Erfolgsfaktoren und zukünftigen Szenarien (bedingt durch die Auswirkungen der Digitalisierung) der Projekte wurden zusammengefasst.

Besonderes Augenmerk wurde bei der Analyse auf kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) gelegt. Diese zeichnen sich durch unterschiedliche Bedürfnisse, Ressourcen und Kompetenzen, im Vergleich zu multinationalen Konzernen aus.

Das Buchkapitel ist wie folgt strukturiert. Zunächst werden die angewandte Methodik zur Literaturrecherche und die Analyse der EU-Projekte beschrieben (Kapitel 2). Anschließend werden die Erkenntnisse präsentiert und diskutiert (Kapitel 3). Zum Schluss wurden abschließende Bemerkungen diskutiert (Kapitel 4).

## 2. Methodik

Um eine methodische Grundlage zu schaffen wurde eine systematische Literaturrecherche (SLR) zum Thema Digitalisierung und Digitalisierungsstrategien ausgeführt. SLR ist ein transparentes, methodisches und replizierbares Verfahren zur systematischen Recherche von veröffentlichten Arbeiten. Dadurch erhält man eine objektive Zusammenfassung zum aktuellen Stand der Forschung (Rousseau et al. 2008, Tranfield et al. 2003). Es handelt sich dabei um eine wirksame Methodik zur Untersuchung und Auslegung aller verfügbaren veröffentlichten Forschungsstudien zu einem bestimmten Thema oder Forschungsfrage. Es wurden jene fünf Schritte für die SLR angewandt (siehe Abbildung 1), welche von Emily et al. (2015) festgelegt wurden.

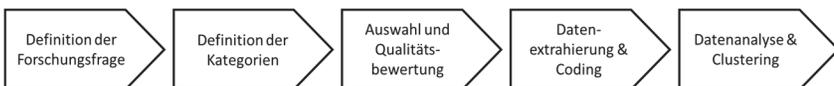


Abbildung 1: Forschungsschritte (angepasst von: Emily et al. 2015).

Der erste Schritt betrifft die *Definition der Forschungsfrage* und die Entwicklung einer ersten Idee zur Durchführung der Literaturrecherche. Die Forschungsfrage befasste sich mit dem Thema rund um die Digitalisierung und Digitalisierungsstrategien und die Ermittlung einer Richtung, in welche sich künftig dieses Thema entwickelt. Ausgangspunkt ist die Berücksichtigung aller wissenschaftlichen Artikel und Konferenzbeiträge zu diesen Themen. Dabei wurde das Thema Digitalisierung breit gehalten ohne sich auf ein bestimmtes Thema (z.B. Industrie 4.0, e-government oder künstliche Intelligenz) zu fokussieren, um möglichst alle relevanten Beiträge mit einzubeziehen.

Im zweiten Schritt wurden *Kategorien definiert*. Ausgehend von vergangenen Studien (z.B. Sartor et al. 2014 - deductive category building), haben die Autoren eine Reihe von Kategorien entwickelt: Forschungszweck (Explorativ, Theoriebildung, Theorieprüfung), Methodik (Konzeptionell, Fallstudie, Umfrage), Analyse-Gruppe (Gesellschaft, Unternehmen, öffentliche Institution), Region/Länderfokus (Europa, USA oder die ganze Welt), Forschungssäule (Economy 4.0, Work 4.0, Education 4.0, Society 4.0,) und Thema (Konzept & Strategie, Technologien, Befähiger und Auswirkung & Risiken der Digitalisierung). Diese Kategorien wurden später im Zuge des Codierungs-Prozesses angepasst.

Der dritte Schritt beinhaltete die *Suche und die Auswahl der veröffentlichten Arbeiten*. Die Suche erfolgte mittels Such- und Schlüsselbegriffen in der Elsevier's Scopus Datenbank. Es wurde eine Kombination (mit UND Operatoren) aus zwei Schlüsselbegriffen verwendet: (1) "Digitalization", "Digitalisation", "Digitization" oder "Digitisation" und (2) "Strategy", "Transformation", "Education", "Work", "Society", "Business", "Processes" oder "Leadership". Die Ergebnisse wurden je nach Fachgebiet gefiltert. Folgende Fachbereiche in Scopus wurden von den Autoren hierfür in Betracht gezogen: engineering, social sciences, business management and accounting, economics-econometrics-finance, die Sprache (Englisch) und Publikationstypologie (journal paper und conference paper). Als Ergebnis konnten insgesamt 600 Beiträge identifiziert werden, die dann anhand der Abstracts weiter überprüft wurden.

Das Ergebnis nach der Such- und Auswahlphase beinhaltete 60 Beiträge über Digitalisierung und Digitalisierungsstrategien: davon 38 wissenschaftliche Veröffentlichungen und 22 Konferenzartikel.

Der vierte Schritt - *Datenextrahierung und Coding* – befasste sich mit der Auseinandersetzung der wissenschaftlichen und betriebswirtschaftlichen Debatte zu den Themen, indem alle Beiträge in einer Tabelle mit den obengenannten Codierungskategorien zusammengefasst wurden

(siehe Anhang). Anschließend wurden detailliertere Tabellen entwickelt (mit Unterkategorien), um die Debatte weiter einzugrenzen.

Der fünfte und letzte Schritt umfasste die *Analyse der gesammelten Daten* und die Präsentation der Ergebnisse. Das Resümee dieser Phase wird in Kapitel 3.1 beschrieben.

Die SLR zum Thema Digitalisierung und Digitalisierungsstrategien wurde durch eine weitere Analyse der Empfehlungen und Richtlinien über Digitalisierung, ausgehend von verschiedenen EU Förderprojekten ergänzt. Berücksichtigt wurden EU-Programme mit einem relativ hohem Grad an Einbeziehung (einschließlich der vollen Abdeckung von mindestens zwei Regionen, siehe Tabelle 1).

Der für die Analyse betrachtete Förderzeitraum umfasste die Zeitspanne zwischen 2007 und 2020. Dieses Zeitfenster kann als genügend lang betrachten, um die wesentlichen abgeschlossenen sowie laufenden Projekte zum Thema Digitalisierung zu berücksichtigen. Aufgrund der hohen Anzahl an Projekten im Rahmen des H2020, wurde nur die Zeitspanne zwischen 2014 und 2020 für dieses Programm berücksichtigt.

<b>Programm</b>	<b>Quelle</b>
Interreg Italy-Austria	<a href="http://www.interreg.net">www.interreg.net</a>
Interreg Italy-Switzerland	<a href="http://www.interreg-italiasvizzera.eu/">www.interreg-italiasvizzera.eu/</a>
Interreg Alpine Space	<a href="http://www.alpine-space.eu">www.alpine-space.eu</a>
Interreg Central Europe	<a href="http://www.interreg-central.eu">www.interreg-central.eu</a>
Horizon 2020	<a href="http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020">ec.europa.eu/programmes/horizon2020</a>

Tabelle 1: Überblick über die ausgewählten EU-Förderprogramme.

Eine weitere Auswahl der Projekte wurde durchgeführt, um deren inhaltliche Zugehörigkeit zum Thema Digitalisierung und Digitalisierungsstrategien zu gewährleisten. Dieses Selektionsverfahren beinhaltete die Nutzung verschiedener Schlüsselwörter und die Analyse des "project executive summary", sowie der praktischen Herangehensweise und des erwarteten Ergebnisses. Ausschließlich Projekte mit einer substantiellen Verbindung zwischen den Auswirkungen der Digitalisierung in Wirtschaft, Unternehmensführung und Gesellschaft, wurden für eine weitere, detailliertere Analyse der Szenarien und Strategien verwendet.

Für jedes ausgewählte EU-Programm basierte die Codierung und Detailanalyse auf folgenden Aspekten: (1) Herausforderungen; (2) Chancen und (3) Risiken der Digitalisierung für Wirtschaft, Produktivität und gesellschaftlicher Systeme; (4) Erfolgsfaktoren (z.B. Förderung der Rahmenbedingungen auf lokaler Ebene); und (4) zukünftige Szenarien (in Bezug auf die erwarteten Auswirkungen der Digitalisierung).

### 3. Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1. Digitalisierungsstrategien in wissenschaftlichen Arbeiten

Großteil der überprüften Veröffentlichungen folgen einer konzeptionellen Methodik oder basieren auf Fallstudien. Konzeptionelle Arbeiten fokussieren tendenziell zukünftige Szenarien und schlagen Konzepte zur Implementierung von digitalen Technologien vor oder sie empfehlen wie eine digitale Agenda entwickelt werden sollte, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Fallstudien analysieren hingegen erfolgreich implementierte digitalen Technologien oder allgemein die digitale Transformation von Unternehmen sowie öffentlichen Institutionen und regen somit die Diskussion an. Zusammenfassend kann man die Schlussfolgerung ziehen, dass sich die Literatur zum Thema Digitalisierung noch in der anfänglichen, explorativen Phase befindet.

Hinsichtlich der Analysemethode (z.B.: Unternehmen, Gesellschaft oder öffentliche Institutionen) wird die Verteilung der geprüften Artikel in Abbildung 2 veranschaulicht.

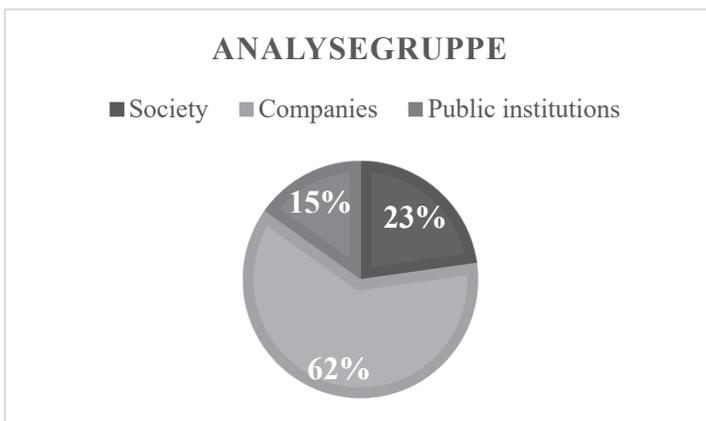


Abbildung 2. Verteilung der Literaturrecherche nach Analyse-Gruppe.

Aus dieser Grafik ist ersichtlich, dass sich mehr als die Hälfte der Artikel mit Unternehmen beschäftigen. Grund hierfür könnte sein, dass Digitalisierungstechnologien (wie Robotik, Sensoren, 3D Druck, Simulationssoftware, künstliche Intelligenz, Virtual und Augmented Reality) vor allem für das produzierende Gewerbe von Interesse sind. Hingegen beschäftigen sich 23% der Artikel mit gesellschaftlichen Aspekten. Diese Arbeiten behandeln Themen wie Nachhaltigkeit und Umwelt, kultureller Wandel als auch der Generationsunterschied in Bezug auf Digitalisierung. Schließlich betreffen 15% der Beiträge öffentliche Einrichtungen. Diese Arbeiten legen den Fokus auf e-government service, Big Data und die Chancen der Digitalisierung in den Bereichen Bildung und Gesundheitswesen.

In Bezug auf den regionalen Schwerpunkt hat sich während der Recherche herauskristallisiert, dass es keinen spezifischen Fokus gibt. Diejenigen, die einen bestimmten Schwerpunkt haben, konzentrieren sich hauptsächlich entweder auf Europa (vor allem Deutschland) oder die USA. Die dominante Rolle Deutschlands kommt dabei nicht überraschend, da das Land als Pionier für Industrie 4.0 gilt.

Abbildung 3 zeigt die Säulenverteilung nach Forschungsschwerpunkten. Es ist erkennbar, dass sich mehr als die Hälfte der Artikel mit Arbeit 4.0 beschäftigen, gefolgt von Gesellschaft 4.0 (24%), Wirtschaft 4.0 (18%) und letzgens Bildung 4.0 (9%). Diese Verteilung lässt sich dadurch erklären, dass die Digitalisierung zwar bereits begonnen hat, Arbeit und Gesellschaft zu wandeln (siehe Kuusisto 2017), aber erst als „neue“ Chance für Bildung gesehen wird (Baumol/Bockshecker 2017).

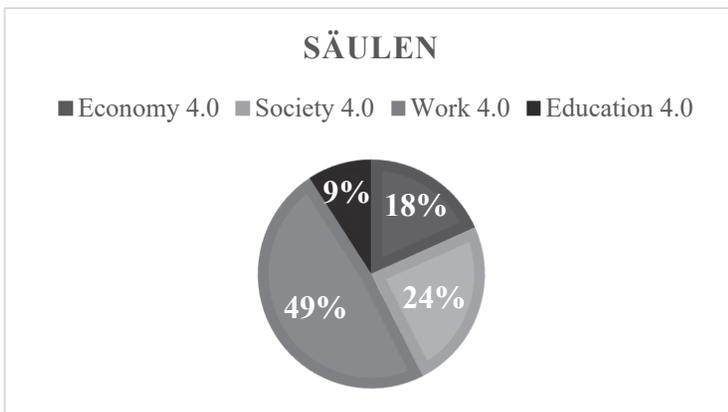


Abbildung 3: Verteilung der Literaturrecherche nach Säulen.

Wie bereits erläutert, wurden bestimmte Themenschwerpunkte während der Recherche identifiziert: Konzept & Strategie, Digitalisierungstechnologien, Befähiger sowie Auswirkungen & Risiken der Digitalisierung. Die Verteilung der Themen wird in Abbildung 4 dargestellt. Die am häufigsten behandelten Themen sind Konzepte & Strategien und Befähiger. Hingegen spielen Technologien und die Auswirkungen und Risiken eine untergeordnete Rolle.

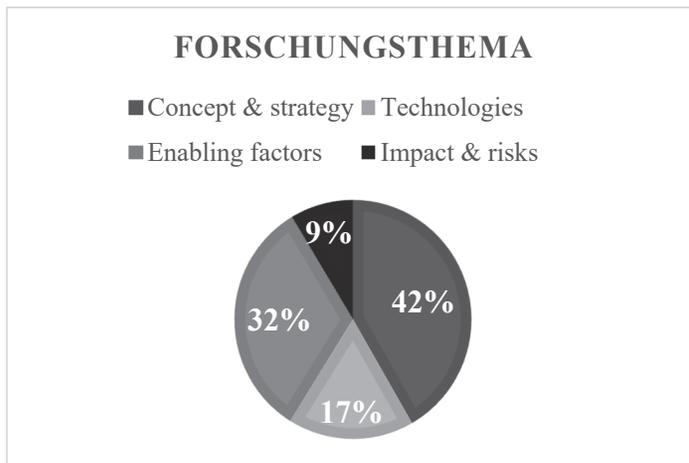


Abbildung 4: Verteilung der Literaturrecherche nach Themen.

Schließlich wurden detailliertere Unterthemen für jedes Thema identifiziert. Diese sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Nach Tishina et al. (2017) und Hafsi/Assar (2016) ist das Konzept der Transformation und die Betrachtung verschiedener Stadien für eine effiziente Digitalisierung, unabhängig davon, ob sie mit der Arbeit oder der Gesellschaft in Zusammenhang steht, grundlegend. Ähnlich argumentieren Parviainen et al. (2017), KPMG (2015), Deloitte (2017) und BCG (2016), dass Befähiger notwendig sind, um die Entwicklung von Konzepten und Strategien und später die Umsetzung der digitalen Transformation zu unterstützen.

Zudem werden Prozesse der digitalen Transformation laut Bogner et al. (2016) vermehrt zu unternehmensweiten Strategien, jedoch fehlt ein detailliertes Verständnis, vor allem bei KMU. Während Großunternehmen, auch aus unterschiedlichen Branchen, ein ähnliche Vorstellungen zur Digitalisierung aufweisen, haben KMU ganz oft unterschiedliche

Sichtweisen und Kenntnisstände zum Thema. Konzerne und KMU haben andere Bedürfnisse sowie Ressourcen, was die Kluft zwischen Kleinen und Großen erschwert. Jedoch ist es auch unumgänglich für KMU sich mit dem Thema Digitalisierung auseinanderzusetzen, um mittel- und langfristig wettbewerbsfähig zu bleiben.

### **1) Konzepte & Strategien zur Digitalisierung**

- Unternehmens As-Is Analyse (e.g., McKinsey 2016, El Sawy et al. 2015)
- Self-assessment tool zur Digitalen Transformation (McKinsey 2016)
- Entwicklung einer digitalen Agenda (Katz et al. 2015, Fraunhofer 2016)
- Definition der digitalen Umwandlung (Hafsi/Assar 2016, Hansen et al. 2011)
- Phasen der digitalen Umwandlung (Fraunhofer 2016, BCG 2016)
- Roadmap zur Implementierung digitaler Technologien (Wißotzki/Sandkuhl 2017, IBM 2016)

### **2) Auswirkung & Risiken der Digitalisierung**

- BIP-Zuwachs (Siemens 2016, Fraunhofer 2016)
- Wettbewerbsfähigkeit beibehalten/steigern (BCG 2016)
- Kulturelle Umwandlung und innovative Geschäftsmodelle (KPMG 2015, Peters et al. 2016)
- Flexible Arbeitsplätze/Arbeitszeiten und dynamische Karrieremodelle (Deloitte 2017, Kurti/Haftor 2015)
- Steigerung der Produktivität (Parviainen et al. 2017, Kaivo-Oja et al. 2017)
- Höhere Nachhaltigkeit (Tishina et al. 2017, Linkov et al. 2018)
- Schaffung von Arbeitsplätzen (Brookings 2017, IBM 2016)
- Wechsel in der Bildung (Meyer/Bo-Kristensen 2012, Williamson 2016)
- Höhere Arbeitslosigkeit und Ungleichheiten (Sorgner 2017, Tishina et al. 2017)
- Unsichere wirtschaftliche Nachhaltigkeit (Katz et al. 2015, Curran 2018)
- Ungewissheit in der Anfangsphase der digitalen Umwandlung (KPMG 2015, Berghaus/Back 2018)
- Ineffiziente und langsame Prozesse (IBM 2016, Hafsi/Assar 2016)

### **3) Befähiger der Digitalisierung**

- Überzeugende Führung (BCG 2015, Sahyaja/Sekhara 2018)
- Abstimmung zwischen verschiedenen Abteilungen (Produktion, Marketing, ...) und IT (KPMG 2015, Doherty et al. 2016)
- Flexible, Risikobereitschaft und innovative Kultur (Kuusisto 2017, McKinsey 2016)
- Vom CEO vorgelebte unterstützende digitale Kultur (Accenture 2016, Hafsi/Assar 2016)

- Verfügbarkeit von Talenten (IBM 2016, Fraunhofer 2016)
<b>4) Digitalisierungstechnologien</b>
- Künstliche Intelligenz (BCG 2016, Paschek et al. 2017)
- Simulations-Software (Siemens 2016)
- Big Data Management Systems (Bhimani/Willcocks 2017)
- IoT - smart devices (Gartner 2013, Siemens 2016)
- Advanced Robotics (Sorgner 2017, Kaivo-Oja et al. 2017)

Tabelle 2: Identifizierte Themen der Literaturrecherche.

### 3.2. Digitalisierungsstrategien in EU Projekten

Die EU-Förderprojekte, die sich auf die Region Veneto-Tirol beziehen, könnten ebenfalls Informationen zur Auswirkung der Digitalisierung auf Gesellschaft, produzierendes Gewerbe und das Bildungssystem beinhalten. In diesem Kapitel werden zusammenfassend die Ergebnisse der Chancen, Möglichkeiten, Risiken, Erfolgsfaktoren und zukünftigen Szenarien der EU-Förderprogramme präsentiert (Tabelle 3). Die systematische Sammlung der Datengrundlage von auf verschiedensten Informationen gewichteten individuellen Projekten wurden in einer Graphik zusammengefasst, welche die Hauptelemente beinhaltet (Abbildung 5-8).

<b>Programm</b>	<b>Förder-Zeitraum</b>	<b>Förder-Projekte</b>	<b>Ausgewählte Projekte</b>
Italien-Österreich	2007-2013	131	6
Italien-Österreich	2014-2020	68	5
Alpinen Raum	2007-2013	57	7
Alpinen Raum	2014-2020	33	7
Zentral Europa	2007-2013	124	11
Zentral Europa	2014-2020	85	9
Horizon	2014-2020	17.292	44

Tabelle 3: Überblick über die EU-Finanzierungsprogramme (Ausarbeitung der Autoren auf Daten von Keep.eu).

Es wurden 89 durch die verschiedensten Förderprogramme geförderten Digitalisierungsprojekte ausfindig gemacht, welche gründlich analysiert

wurden. In Bezug auf die Hauptherausforderungen (Abbildung 5) unterstrichen mehrere Projekte den Bedarf an Kooperation zwischen regionalen Instituten und Forschung, sowie der Industrie. Die Herausforderung der Industrie und innovativen Ökosystemen besteht in diesem Zusammenhang darin, den Einfluss intelligenter Spezialisierungsstrategien zu erhöhen. Solche Bemühungen sollten später die Herausforderung der Migration unternehmerischer Talente und innovativer Unternehmen entschärfen. Zudem sollte der Zugang zu Forschungs- und Entwicklungsprojekten für KMU ermöglicht werden.

Das Letztere hat sich als Haupt-Herausforderung für KMU bestätigt, vor allem in den jüngsten Förderprogrammen (2014-2020), in Hinblick auf die begrenzte Umsetzung von Industrie 4.0 Lösungen in KMU.

Obwohl viele innovative KMU tatsächlich existieren, ist das Netzwerk der grenzüberschreitenden KMU oft unterentwickelt und viele Unternehmen ohne F&E Kapazitäten sind nicht aktiv in F&E Netzwerken. Weitere Herausforderungen, welche die schwache Vertretung der KMU erklären, sind deren unzureichenden finanziellen und ressourcentechnischen Mittel, sowie die fehlenden innovativen Geschäftsmodelle und -strategien.

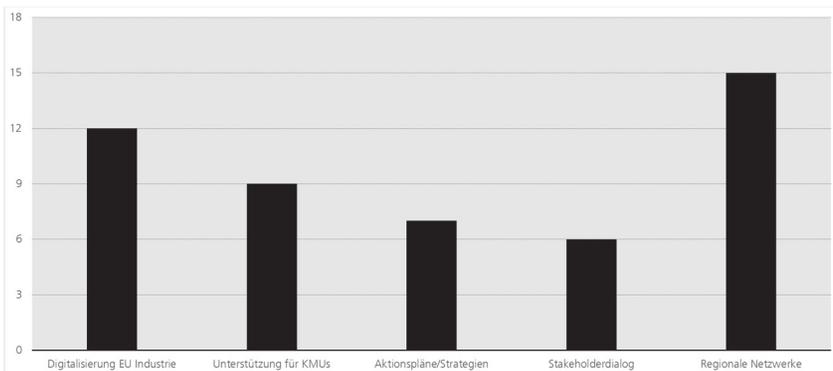


Abbildung 5: Herausforderungen.

Eine weitere allgemeinere Herausforderung, welche von mehreren EU Projekten unterstrichen wurde, betrifft die Notwendigkeit der Digitalisierung in den verschiedensten EU-Sektoren, wie: Produktion, Mobilität, Transport, Gesundheit, Forstwirtschaft sowie in der kreativen Industrie. In verschiedenen Projekten wird allgemein anerkannt, dass mehrere Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes aufgrund ihres begrenzten digitalen Niveaus nicht so wettbewerbsfähig sind, wie es auf

den globalen Märkten gewünscht wird. In diesem Zusammenhang tritt die Notwendigkeit auf, digitale Technologien in traditionellen industriellen Branchen, welche relevant für die europäische Produktivität sind, zu stärken. Um auf globaler Ebene wettbewerbsfähig zu bleiben, müssen sie darüber hinaus nachgerüstet werden. Sämtliche Aspekte sind bedingt durch IKT-Einschränkungen, oft technischer und organisatorischer Natur. Deshalb sollte die Entwicklung von Cyber-Physischen Systemen und von umfangreichen Experimenten in den verschiedensten digitalen Themen, wie z.B. datengesteuerte „smart factories“, vorangetrieben werden, um den Erhalt der europäischen Konkurrenzfähigkeit zu befestigen. Solche Maßnahmen sind per se als projektübergreifende Herausforderungen festgehalten.

Weitere Herausforderungen beziehen sich auf fehlende Maßnahmenpläne für Paradigmenwechsel in Sektoren wie: Mobilität, e-health, e-services, usw. und fehlende transnationale, gemeinsame politische Rahmenbedingungen (z.B. in den Alpenregionen). Darüber hinaus signalisieren EU-Projekte den Bedarf an einer erhöhten Debatte der Interessenvertreter über die Auswirkungen der digitalen Technologien, zukünftiger digitaler Richtlinien und gesellschaftlicher Aspekte.

Was die Chancen betrifft (siehe Abbildung 6), heben Projekte den Nutzen der Digitalisierung in Gesellschaft und Umwelt hervor, zum Beispiel eine nachhaltigere Produktion durch den Einsatz moderner IKT-Werkzeuge. Weitere Vorteile liegen in der Steigerung der Produktivität, der sozialen Eingliederung und der Steigerung der Ressourceneffizienz.

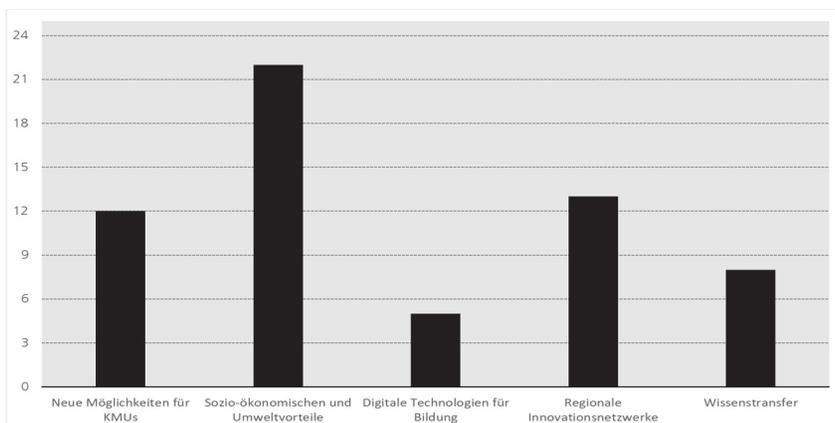


Figure 6: Chancen.

Weitere bedeutende Chancen ergeben sich aus der Möglichkeit, regionale Innovationssysteme zu stärken, z.B.: Start-Up Gründerszene, Erhöhung des Know-How Transfers, F&E Kooperation zu fördern, ICT basierte Lösungen zu entwickeln, transnationale Kooperationen auszubauen. Übereinstimmend mit den herauskristallisierten Möglichkeiten der EU-Projekte, ergeben sich neue Chancen für KMU im Bereich der Digitalisierung. Deren Wettbewerbsfähigkeit wird auf internationalen Märkten erhöht, Ressourcen werden effizienter genutzt und innovative Produkte und Dienstleistungen werden entwickelt.

Die Chancen, welche sich durch vermehrte Möglichkeiten ergeben, sind auch auf politische Entscheidungen zurückzuführen. In diesem Zusammenhang kann das Thema Big Data dabei zu unterstützen, die Politik innovativer zu gestalten, zum Beispiel durch steigernde öffentliche Beteiligung, die Förderung von datenbasierte Entscheidungsfindungsprozesse und experimentelle, innovative Datenvisualisierung. Letztens repräsentieren digitale Technologien (AR/VR, Robotik, etc.) zukünftige Chancen, um regionale Bildungssysteme zu unterstützen und junge Generationen vermehrt miteinzubeziehen. Darüber hinaus wird die Konkurrenzfähigkeit der KMUs weitgehend gestärkt.

Neben den Chancen und Möglichkeiten der Digitalisierung, ausgehend von der Analyse der EU-Projekte, bestehen nach wie vor verschiedene Risiken ethnischer und regulatorischer Natur verbunden mit ICT Applikationen, dem Reifegrad der KMU zur Automation und der politischen Unterstützung für Innovation. KMU resultieren als nicht genügend informiert über relevante technologische Trends, welche hingegen positive Auswirkungen auf deren Effizienz im Herstellprozess haben könnten. In Bezug auf Politik, gefährden unterschiedliche und inkohärente regionale Herangehensweisen zu Forschungs- und Entwicklungsstrategien, das Potential der Zusammenarbeit zwischen Regionen (z.B.: transnationale Ebene). In mehreren EU-Projekten wurde darauf hingewiesen, dass die Gefahr besteht, dass Gebiete und Bürger, die aufgrund der zunehmenden Digitalisierung potenziell von Ausgrenzung bedroht sind, übersehen werden. Zu den letztgenannten Risiken gehören auch technische, rechtliche und ethnische Fragen, welche das Potential der IKT Applikationen wesentlich begrenzen. Diese regen die öffentliche und politische Debatte über die Einmischung moderner Technologien in den Alltag privater, individueller Bereiche an.

In Bezug auf die Erfolgsfaktoren (Abbildung 7), wird relativ häufig auf die Förderungen für KMU verwiesen (z.B.: finanzielle Unterstützung für F&E Projekte, Bereitstellung technologischer Infrastruktur für Experimente und Ausbildung). Diese Erfolgsfaktoren sind verbunden mit der

Möglichkeit Dienstleistungen an innovativen KMU anzubieten, und gleichzeitig eine kooperative Umgebung für Innovation zu schaffen (z.B.: digitale Innovationszentren für Know-How Schaffung und Transfer). Diese Aspekte, welche als Erfolg in EU-Projekten betrachtet, spiegeln andere Faktoren wie den Grad an Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Industrie und Technologie, Politik und dem Ziel die Öffentlichkeit in Sachen Know-How Transfer zu stärken, wieder. Dazu gehört die Möglichkeit ein interregionales Netzwerk aufzubauen, die wichtige ökonomische Verhältnisse zu pflegen und grenzübergreifende Kollaborationen in Innovation zu fördern. Weitere Erfolgsfaktoren sind erhöhte Finanzierung von Forschungsaufwänden in technologischen Bereichen und Schlüsseltechnologien wie z.B.: Big Data, cyber-security, CPS, industrial IoT, etc.), da diese einen Nutzen für die Gesellschaft, Umwelt und regionalen Ökosystemen darstellen.

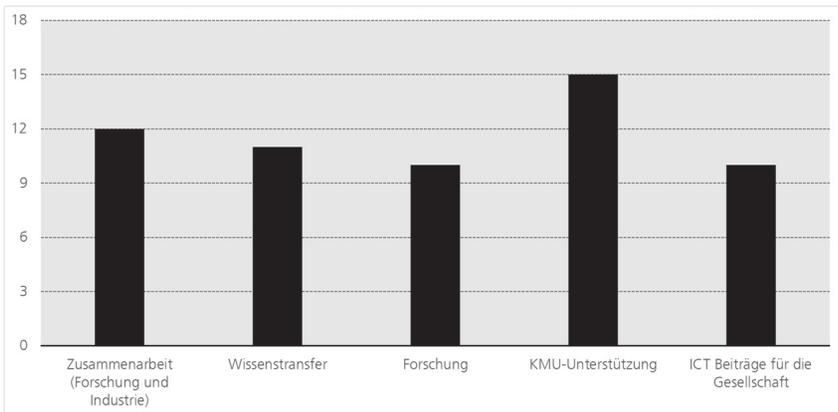


Figure 7: Erfolgsfaktoren.

Zukünftige Szenarien der Digitalisierung in EU-Projekten prognostizieren einen allgemein beschleunigten Übergang der Industrie 4.0 von der Forschung in die Praxis. Dies wird ermöglicht durch einen Wandel des unternehmerischen Denkens, der Fähigkeiten und Einstellungen zum technologischen Fortschritt sowie durch die zunehmende Anzahl an innovativer Dienstleistungen und transnationaler Kooperationsnetzwerken. In Anbetracht dessen, hat sich die Alpinregion als Ziel gesetzt, eine führende Rolle in europäischen Forschungstechnologien und auf der Innovationsszene zu spielen. Zusätzliche Szenarien der unbegrenzten technologischen Möglichkeiten sind autonomes Fahren, intelligente

und vernetzte Infrastruktur, fortgeschrittene Implementationen der zukünftigen Produktion auch für KMU. Datengesteuerte Politikgestaltung, welche im Stande ist komplexe und systematische Herausforderungen zu bewältigen, wird als Teil der zukünftigen Szenarien der Politik und Institutionen betrachtet.

#### 4. Fazit und Ausblick

In letzter Zeit haben immer mehr wissenschaftliche Arbeiten und EU-Förderprojekte, verschiedene Chancen und Möglichkeiten der Digitalisierung aufgezeigt. Die Bewältigung dieser Herausforderungen bezüglich der Digitalisierung bedeutet für die europäische Industrie nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit, sozial-ökonomische und ökologische Vorteile. Dabei müssen KMU in Sachen Industrie 4.0 unterstützt werden. Die daraus resultierenden Vorteile kommen der gesamten Gesellschaft zu gute. Fehlende Maßnahmenpläne und inkohärente regionale Herangehensweisen zur Forschung und strategischen Entwicklung können die grenzübergreifende Kooperation gefährden. Aus diesem Grund ist es notwendig, regionale Netzwerke für Innovation und Kooperation zwischen Forschung und Industrie zu stärken. Dies befähigt eine erfolgreiche digitale Umwandlung in Arbeit, Bildung und sozialen und öffentlichen Einrichtungen. In diesem Zusammenhang, um erwünschte Ergebnisse zu erzielen, sollten Interessensvertreter verstärkt in die öffentliche Debatte gehen und die Auswirkungen der Digitalisierung in zukünftigen politischen und sozialen Szenarien erläutern. Erste Ergebnisse lieferten bereits kostbare Beiträge dem Projektteam zur Identifikation der spezifischen KMU Chancen und Möglichkeiten und Erfolgsfaktoren. KMU sind das Rückgrat die ökonomischen und produktiven Systeme im A21 Projekt, deshalb ist das Verstehen der Anforderungen gegenüber der digitalen Umwandlung der KMUs eine Prämisse, verbesserte, maßgeschneiderten Unterstützung zur Forschung und Entwicklung zu liefern.

Im Rahmen des Italia-Österreich Projektes A21 Digital Tyrol Veneto, wird die systematische Literaturrecherche und die Analyse der EU Förderprojekte zur Digitalisierung und Digitalisierungsstrategien weiter vertieft. Als nächster Schritt werden die Autoren eine Checkliste entwickeln, um Interviews mit lokalen Experten, aus verschiedenen Bereichen wie (Wirtschaft, Arbeit, Gesellschaft und Bildung) zum Thema Digitalisierung zu führen. Die daraus resultierenden Ergebnisse sollen später für die Entwicklung von Szenarien und Empfehlungen in Sachen Digitalisierung, für politische Entscheidungsträger in Tirol, Südtirol und Veneto dienen. Diese Strategien werden in einem zweiten Moment mittels Fokusgruppen getestet und in einem finalen Report zusammengefasst.

Neben dem wissenschaftlichen Teil werden die Autoren Workshops/Events (A21 Digital Summits) organisieren, um alle Interessensvertreter erfolgreich zum digitalen Wandel einzustimmen. Besonders sollen institutionelle Kapazitäten der öffentlichen Verwaltung in der Makro-Region Tirol-Veneto und deren Interaktion mit den Bürgern und Institutionen verbessert werden.

## Förderung

Diese Studie ist Teil des Projekts "A21DIGITAL TYROL VENETO" (I-TAT3011), das durch das Programm Interreg V-A Italia-Österreich gefördert wird.

## Literatur

- Accenture (2016). Digital transformation of industries. Online verfügbar unter: [https://www.accenture.com/t00010101T000000Z\\_w\\_w\\_/ru-ru/\\_acnmedia/Accenture/Conversion-Assets/DotCom/Documents/Local/ru-ru/PDF/Accenture-Digital-Transformation.pdf](https://www.accenture.com/t00010101T000000Z_w_w_/ru-ru/_acnmedia/Accenture/Conversion-Assets/DotCom/Documents/Local/ru-ru/PDF/Accenture-Digital-Transformation.pdf), zuletzt geprüft am 05.08.2018.
- Baumol, U, A Bockschecker (2017). Evolutionary Change of Higher Education Driven by Digitalization. In 2017 16th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training, ITHET 2017.
- BCG (2015). How to Jump-Start a Digital Transformation. Online verfügbar unter: [http://gestao.meiokilo.pt/upload/openlimits/6rzyuWc8/pdf/content\\_iam/fnisN-JoK/how-to-jump-start-digital-transformation-openlimits-pdf.pdf](http://gestao.meiokilo.pt/upload/openlimits/6rzyuWc8/pdf/content_iam/fnisN-JoK/how-to-jump-start-digital-transformation-openlimits-pdf.pdf), zuletzt geprüft am 05.08.2018.
- Berghaus, S., Back, A. (2018). Disentangling the Fuzzy Front End of Digital Transformation: Activities and Approaches, In ICIS 2017: Transforming Society with Digital Innovation.
- Bhimani, A., Willcocks, L. (2014). Digitisation, Big Data and the transformation of accounting information. *Account. Bus. Res.*, Vol. 44 (4), S. 469–490.
- Bogner, E., Voelklein, T., Schroedel, O., Franke, J. (2016). Study Based Analysis on the Current Digitalization Degree in the Manufacturing Industry in Germany. *Procedia CIRP*, Vol. 57, S. 14–19.
- Brookings (2017). Digitalization and the American workforce. Online verfügbar unter: <https://www.brookings.edu/research/digitalization-and-the-american-workforce/>, zuletzt geprüft am 05.08.2018.
- Curran, D. (2018). Risk, innovation, and democracy in the digital economy. *European Journal of Social Theory*, Vol. 21 (2), S. 207–226.

- Deloitte (2017). *Rewriting the Rules for the Digital Age - Human Capital Trends*. Online verfügbar unter <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/global/Documents/HumanCapital/hc-2017-global-human-capital-trends-gx.pdf>, zuletzt geprüft am 05.08.2018.
- Doherty, E., Carcary, M., Conway, G. (2016). Development of an IT strategic planning capability for the digital age. In *Proceedings of the European Conference on IS Management and Evaluation, ECIME*, S. 52–58.
- El Sawy, O., Kraemmergaard, P., Amsinck, H., Vinther, A. (2016). How LEGO Built the Foundations and Enterprise Capabilities for Digital Leadership. *MIS Quarterly Executive*, Vol. 15 (2).
- Emily H., Mondher F., Imed B. (2015). The Shape of Digital Transformation: A Systematic Literature Review. In *MCIS 2015 Proceedings*, S. 431-443.
- Fraunhofer (2015). *Digital Transformation: Changes and chances - insights based on an empirical study*. Sankt Augustin: Fraunhofer FIT.
- Gartner (2013). *Forecast: The Internet of Things, Worldwide*. Online verfügbar unter <https://www.gartner.com/doc/2625419/forecast-internet-things-worldwide->, zuletzt geprüft am 05.08.2018.
- Hafsi, M., Assar S. (2016). What Enterprise Architecture Can Bring for Digital Transformation: An Exploratory Study. In *Proceedings - CBI 2016: 18th IEEE Conference on Business Informatics*, Vol. 2, S. 83–89.
- Hansen, A. M., Kraemmergaard, P., Mathiassen, L. (2011). Rapid adaptation in digital transformation: A participatory process for engaging is and business leaders. *MIS Q. Exec.*, Vol. 10 (4), S. 175–185.
- IBM (2016). *Digital Transformation*. Online verfügbar unter <https://www.ibm.com/blogs/insights-on-business/government/tag/digital-transformation/>, zuletzt geprüft am 05.08.2018.
- Kaivo-Oja, J., Roth, S., Westerlund, L. (2017). Futures of robotics. Human work in digital transformation. *Int. J. Technol. Manag.*, Vol. 73 (4), S. 176–205.
- Katz, R., Koutroumpis, P., Callorda, F. M. (2014). Using a digitization index to measure the economic and social impact of digital agendas. *Info*, Vol. 16 (1), S. 32–44.
- Keep.Eu (2016). *Keep EU*. Online verfügbar unter <https://www.keep.eu>, zuletzt geprüft am 11.06.2018.
- KPMG (2015). *Digital Business: It's Time for CIOs to Lead or Get out of the Way*. Online verfügbar unter <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/pdf/2015/12/digital-business-enabling-digital-enterprise.pdf>, zuletzt geprüft am 05.08.2018.
- Kurti E., Haftor, D. (2015). Barriers and enablers of digital business model transformation. In *Proceedings of the European Conference on IS Management and Evaluation, ECIME*, Vol. 2015–Januar, S. 262–268.
- Kuusisto, M. (2017). Barriers and Facilitators of Digitalization in Organizations. In *CEUR Workshop Proceedings*.
- Linkov, I., Trump, B. D., Poinsette-Jones, K., Florin, M.-V. (2018). Governance strategies for a sustainable digital world. *Sustain.*, Vol. 10 (2), S. 440.

- McKinsey (2016). Digital strategy - The economic essentials of digital strategy. Online verfügbar unter <https://www.mckinsey.it/sites/default/files/the-economic-essentials-of-digital-strategy.pdf>, zuletzt geprüft am 05.08.2018.
- McKinsey (2017). Digital strategy - The case for digital reinvention. Online verfügbar unter <https://www.mckinsey.com/business-functions/digital-mckinsey/our-insights/the-case-for-digital-reinvention>, zuletzt geprüft am 05.08.2018.
- Meyer, B., Bo-Kristensen, M. (2012). The digital school: Developing teacher competencies. In Proceedings of the European Conference on e-Government, ECEG, S. 305–310.
- Parviainen, P., Tihinen, M., Kääriäinen, J., Teppola, S. (2017). Tackling the Digitalization Challenge: How to Benefit from Digitalization in Practice. *International Journal of Information Systems and Project Management*, Vol. 5 (1), S. 63–77.
- Paschek, D., Mocan, A., Dufour, C.-M., Draghici, A. (2017). Organizational knowledge management with Big Data. the foundation of using artificial intelligence. In *Balkan Region Conference on Engineering and Business Education*, Vol. 3 (1), S. 301–308.
- Peters, S., Chun, J.-H., Lanza, G. (2016). Digitalization of automotive industry - Scenarios for future manufacturing. *Manuf. Review*, Vol. 3.
- Rousseau D. M., Manning J., Denyer D. (2008). Evidence in management and organizational science: assembling the field's full weight of scientific knowledge through syntheses. *Academy of Management Annals*, Vol. 2 (1), S. 475-515.
- Sahyaja C., Sekhara Rao, K. S. (2018). New leadership in the digital era-a conceptual study on emotional dimensions in relation with intellectual dimensions. *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, Vol. 9 (1), S. 738–747.
- Sartor, M., Orzes, G., Di Mauro, C., Ebrahimpour, M., Nassimbeni, G. (2016). The SA8000 social certification standard: Literature review and theory-based research agenda. *International Journal of Production Economics*, Vol. 175, S. 164-181.
- Siemens (2016). The race to a digital future. Online verfügbar unter <https://www.siemens.com/content/dam/internet/siemens-com/us/home/company/topic-areas/digitalization/documents/cg-mc-digital-future-of-us-manufacturing-en.pdf>, zuletzt geprüft am 05.08.2018.
- Sorgner, A. (2017). The automation of jobs: A threat for employment or a source of new entrepreneurial opportunities?, *Foresight and STI Governance (Foresight-Russia till No. 3/2015)*, National Research University Higher School of Economics. Vol. 11 (3), S. 37-48.
- Tishina, E. A., Rezantseva, E. Y., Reut, D. V. (2017). The Concept of Digital Transformation of the Society. In Proceedings of 2017 10th International Conference Management of Large-Scale System Development, MLSD 2017.
- Tranfield D., Denyer D., Smart P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management*, Vol. 14, S. 207-222.
- Williamson, B. (2016). Digital education governance: An introduction, " *Eur. Educ. Res. J.*, Vol. 15 (1), S. 3–13.

Wißotzki, M., Sandkuhl, K. (2017). The digital business architect – Towards method support for digital innovation and transformation. *Lect. Notes Bus. Inf. Process.*, Vol. 305, S. 352–362.

## Anhang

Autor(en)	Jahr	Titel	Forschungszweck	Methodik	Analyse-Gruppe	Region/Länder Fokus	Säulen			Forschungsthemen			
							Wirtschaft 4.0	Gesellschaft 4.0	Arbeit 4.0	Bildung 4.0	Konzept & Strategie	Technologien	Befähiger
Hanse A. M., Kraemmergaard P., Mathiassen L.	2011	Rapid adaptation in digital transformation: A participatory process for engaging IS and business leaders	Theoriebildung	Fallstudie	Öffentliche Institution	Dänemark		x			x		
Reinwald A., Kraemmergaard P.	2012	Managing stakeholders in transformational government – A case study in a Danish local government	Theoriebildung	Fallstudie	Öffentliche Institution	Europa	x	x		x		x	
Meyer B., Borkristensen M.	2012	The digital school: Developing teacher competencies	Theoriebildung	Fallstudie	Öffentliche Institution	Dänemark			x	x		x	
Bhimani A., Willcocks L.	2014	Digitisation, Big Data and the transformation of accounting information	Explorativ	Konzeptionell	Unternehmen	Welt			x			x	
McRostie D.	2014	Aspiration to implementation: Building an enterprise digitization capability at the University of Melbourne	Theorieprüfung	Fallstudie	Öffentliche Institution	Australien		x		x		x	

Katz R., Kouroumpis P., Callorda F. M.	2014	Using a digitization index to measure the economic and social impact of digital agendas	Explorativ	Konzeptionell	Gesellschaft	Europa	x	x	x	x	x	x	x
Charalabidis Y., Karyda M., Korkolakis S., Loukis E.	2015	Information Systems in a Changing Economy and Society in the Mediterranean Region	Explorativ	Konzeptionell	Gesellschaft	Europa	x	x	x	x	x	x	x
Xiaolin C., Ahmed B.	2015	The determinants of Cloud Computing Adoption by Large European Firms	Theoriebildung	Umfrage	Unternehmen	Europa		x	x	x	x	x	x
Obwegeser N., De Araujo Burcharth A. L., Carugati A.	2015	The Value of IT: Explaining the Strategic Role of Information Systems for Fast Growing SMES	Theoriebildung	Fallstudie	Unternehmen	Welt		x	x	x	x	x	x
Dhouha J., Rim F., Mahfoudhi S.	2015	Big Data Technologies: Additional Features or Replacement for Traditional Data Management Systems?	Explorativ	Konzeptionell	Unternehmen	Welt		x	x	x	x	x	x
Emily H., Mondher F., Imed B.	2015	The shape of digital transformation: a systematic literature review	Explorativ	Literaturrecherche	Unternehmen	Welt		x	x	x	x	x	x
Loebbecke C., Picot A.	2015	Reflections on societal and business model transformation arising from digitization and big data analytics: A research agenda	Explorativ	Konzeptionell	Gesellschaft	Welt		x	x	x	x	x	x
Kurti E., Haftor D.	2015	Barriers and enablers of digital business model transformation	Explorativ	Konzeptionell	Unternehmen	Welt		x	x	x	x	x	x
Modi H. T., Priya S.	2016	Big data: A goldmine in healthcare	Explorativ	Konzeptionell	Öffentliche Institution	Welt		x	x	x	x	x	x
Peters S., Chun J. H., Lanza G.	2016	Digitalization of automotive industry - Scenarios for future manufacturing	Explorativ	Konzeptionell	Unternehmen	Welt		x	x	x	x	x	x

Kaivo-oja J., Roth S., Westertlund L.	2016	Futures of robotics. Human work in digital transformation	Explorativ	Konzeptionell	Gesellschaft	Europa	x	x	x	x	x	x
Sia S. K., Soh C., Weill P.	2016	How DBS bank pursued a digital business strategy	Theoriebildung	Fallstudie	Unternehmen	Welt	x	x	x	x	x	x
Hafsi M., Assar S.	2016	What enterprise architecture can bring for digital transformation: An exploratory study	Explorativ	Literaturrecherche	Unternehmen	Welt	x	x	x	x	x	x
Akatkin Y., Yasinovskaya E., Drozhzhinov V., Konyavskiy V.	2016	Towards the digital government in Russia: Integrative approach	Theorieprüfung	Fallstudie	Öffentliche Institution	Russland	x	x	x	x	x	x
Bogner E., Voelklein T., Schroedel O., Franke J.	2016	Study Based Analysis on the Current Digitalization Degree in the Manufacturing Industry in Germany	Theorieprüfung	Umfrage	Unternehmen	Deutschland	x	x	x	x	x	x
Jaakkola H., Aramo-Immonen H., Henna J., Mäkelä J.	2016	The digitalization push in universities	Beschreibung	Literaturrecherche	Öffentliche Institution	Welt	x	x	x	x	x	x
Berghaus S., Back A.	2016	Stages in digital business transformation: results of an empirical maturity study	Theorieprüfung	Umfrage	Unternehmen	Welt	x	x	x	x	x	x
El Sawy O., Amsinek H., Kræmmergaard P., Vinther A.	2016	How LEGO Built the Foundations and Enterprise Capabilities for Digital Leadership	Theoriebildung	Fallstudie	Unternehmen	Welt	x	x	x	x	x	x



Doherty E., Carcary M., Conway G.	2016	Development of an IT strategic planning capability for the digital age	Explorativ	Konzeptionell	Unternehmen	Welt			x	x	
Blackburn M., Alexander J., Legan J. D., Klabjan D.	2017	Big Data and the Future of R&D Management: The rise of big data and big data analytics will have significant implications for R&D and innovation management in the next decade	Theoriebildung	Fallstudie	Unternehmen	Welt		x	x	x	
Paschek D., Mocan A., Dufour M. C., Draghici A.	2017	Organizational knowledge management with Big Data. The foundation of using artificial intelligence	Explorativ	Konzeptionell	Unternehmen	Welt		x		x	
Alekseevna E. T., Yakovlevna E. R.	2017	The concept of digital transformation of the society	Explorativ	Konzeptionell	Gesellschaft	Welt		x		x	
Ignat V.	2017	Digitalization and the global technology trends	Theoriebildung	Fallstudie	Unternehmen	Welt		x		x	
Gasova K., Stofkova K.	2017	E-Government as a Quality Improvement Tool for Citizens' Services	Theoriebildung	Fallstudie	Öffentliche Institution	Welt		x		x	
Beier G., Niehoff S., Ziems T., Xue B.	2017	Sustainability aspects of a digitalized industry – A comparative study from China and Germany	Beschreibung	Umfrage	Gesellschaft	Deutschland/China			x		x
Kuusisto M.	2017	Barriers and facilitators of digitalization in organizations	Theoriebildung	Literaturrecherche	Unternehmen	Welt		x		x	
Baumöl U., Bockshecker A.	2017	Evolutionary change of higher education driven by digitalization	Theoriebildung	Konzeptionell	Gesellschaft	Welt			x		x
Parviainen P., Tiinen M., Kääräinen J., Teppola S.	2017	Tackling the digitalization challenge: How to benefit from digitalization in practice	Theoriebildung	Fallstudie	Unternehmen	Welt		x		x	

Wißotzki M., Sandkuhl K.	2017	The digital business architect – Towards method support for digital innovation and transformation	Explorativ	Konzeptionell	Unternehmen	Welt	x	x	x	x	x	x	x
Berghaus S., Back A.	2017	Disentangling the Fuzzy Front End of Digital Transformation: Activities and Approaches	Explorativ	Konzeptionell	Unternehmen	Welt		x	x				x
Schmidt J., Drews P., Schirmer I.	2017	Digitalization of the Banking Industry: A Multiple Stakeholder Analysis on Strategic Alignment	Theoriebildung	Fallstudie	Unternehmen	Welt		x	x				x
Mueller B., Renken U.	2017	Helping Employees to be Digital Transformers – the Olympus.connect Case	Theoriebildung	Fallstudie	Unternehmen	Welt		x	x				x
Michael K. V., Bronn C.	2017	Education for managing digital transformation: A feedback systems approach	Theoriebildung	Fallstudie	Unternehmen	Welt		x	x				x
Oztürkler Z.	2017	Evaluation of technology strategies as quality strategy of higher education institutions	Theoriebildung	Fallstudie	Unternehmen	Europa			x				x
Dobrolyubova E., Alexandrov O., Yefremov A.	2017	Is Russia Ready for Digital Transformation?	Theoriebildung	Fallstudie	Gesellschaft	Russland		x					x
Demartini M., Tonelli F., Damiani L., Revelantia R., Cassetari L.	2017	Digitalization of manufacturing execution systems: The core technology for realizing future smart factories	Explorativ	Konzeptionell	Unternehmen	Welt		x					x
Venables M.	2017	Joining the dots	Theorieprüfung	Fallstudie	Unternehmen	Welt		x					x

Sorgner A.	2017	The automation of jobs: A threat for employment or a source of new entrepreneurial opportunities?	Theorieprüfung	Umfrage	Gesellschaft	Deutschland	x	x				x
Saarikko T., Westergren U. H., Blomquist T.	2017	The Internet of Things: Are you ready for what's coming?	Theoriebildung	Fallstudie	Unternehmen	Welt		x				x
Alizadeh T.	2017	Urban Digital Strategies: Planning in the Face of Information Technology?	Theoriebildung	Fallstudie	Gesellschaft	Welt	x					x
Mourtzis D., Vlachou E.	2018	A cloud-based cyber-physical system for adaptive shop-floor scheduling and condition-based maintenance	Explorativ	Konzeptionell	Unternehmen	Welt		x				x
Curran D.	2018	Risk, innovation, and democracy in the digital economy	Explorativ	Konzeptionell	Gesellschaft	Welt	x	x				x
Linkov L., Trump D. B., Poinsett-Jones K., Florin V. M.	2018	Governance strategies for a sustainable digital world	Theoriebildung	Konzeptionell	Gesellschaft	Welt		x				x
Sahyaja C., Sekhara S. K.	2018	New leadership in the digital era-a conceptual study on emotional dimensions in relation with intellectual dimensions	Explorativ	Konzeptionell	Unternehmen	Welt		x				x
Frishammar J., Cenamor J., Cavalli-Björkman H., Hernell E., Carlsson J.	2018	Digital strategies for two-sided markets: A case study of shopping malls	Theoriebildung	Fallstudie	Unternehmen	Welt		x				x

Hämnen M., Smedlund A., Mitronen L.	2018	Digitalization in retailing: multi-sided platforms as drivers of industry transformation	Theoriebildung	Fallstudie	Unternehmen	Welt			x	x	x
-------------------------------------	------	--	----------------	------------	-------------	------	--	--	---	---	---





## Ausgewählte Literatur für die Bereiche

Digitalisierung  
Fertigungssteuerung

Industrie 4.0  
Lean Production

Produktionssysteme

### Digitalisierung

5182	Gronau, N.	Additive Fertigung (Industrie 4.0 Management 5/2016)	66	978-3-95545-182-0
5184	Gronau, N.; Grum, M.	Wissensmanagement im Zeitalter der Digitalisierung	141	978-3-95545-184-4
5183	Gronau, N.	Additive Fertigung (Industrie 4.0 Management 5/2016) E-Journal	68	978-3-95545-183-7
5193	Scholz-Reiter, B.	System Integrated Intelligence (Industrie 4.0 Management) 6/2016	66	978-3-95545-193-6
5194	Scholz-Reiter, B.	System Integrated Intelligence (Industrie 4.0 Management 6/2016) E-Journal	66	978-3-95545-194-3
5195	Katzlinger, Elisabeth, u.a.	Von der Datenverarbeitung zum Digital Business	500	978-3-95545-195-0
5200	Scholz-Reiter, B.	Energie- und Ressourceneffiziente Produktion (Industrie 4.0 Management 1/2017) E-Journal	66	978-3-95545-200-1
5199	Scholz-Reiter, B.	Energie- und Ressourceneffiziente Produktion (Industrie 4.0 Management 1/2017)	66	978-3-95545-199-8
5203	Eggert, S.	Big Data und ERP (ERP Management 1/2017)	66	978-3-95545-203-2
5204	Eggert, S.	Big Data und ERP (ERP Management 1/2017) E-Journal	66	978-3-95545-204-9
5209	Gronau, N.	Standardisierung (Industrie 4.0 Management 2/2017)	64	978-3-95545-209-4
5210	Gronau, N.	Standardisierung (Industrie 4.0 Management 2/2017) E-Journal	64	978-3-95545-210-0
5212	Scholz-Reiter, B.	Industrie 4.0-Technologien (productivity 2/2017) E-Journal	68	978-3-95545-212-4
5211	Scholz-Reiter, B.	Industrie 4.0-Technologien (productivity 2/2017)	68	978-3-95545-211-7
5197	Gronau, N., Glaschke, Chr.	Die Rolle von ERP-Systemen im Zeitalter der Digitalisierung	277	978-3-95545-197-4
5213	Gronau, N.	CRM-ERP-Strategien (ERP Management 2/2017)	64	978-3-95545-213-1
5214	Gronau, N.	CRM-ERP-Strategien (ERP Management 2/2017) E-Journal	64	978-3-95545-214-8
5216	Gronau, N.	Megatrend Digitalisierung (Industrie 4.0 Management 3/2017)	80	978-3-95545-216-2
5217	Gronau, N.	Megatrend Digitalisierung (Industrie 4.0 Management 3/2017) E-Journal	80	978-3-95545-217-9
5219	Scholz-Reiter, B.	Industrial Big Data (Industrie 4.0 Management 4/2017) E-Journal	64	978-3-95545-219-3
5221	Gronau, N.	Produktionssysteme (productivITy 3/2017) E-Journal	68	978-3-95545-221-6
5218	Scholz-Reiter, B.	Industrial Big Data (Industrie 4.0 Management 4/2017)	64	978-3-95545-218-6
5220	Gronau, N.	Produktionssysteme (productivITy 3/2017)	68	978-3-95545-220-9
5227	Gronau N.; Eggert, S.	ERP-Auswahl (ERP-Management 3/2017)	66	978-3-95545-227-8
5232	Gronau, N.	Geschäftsmodelle im Kontext von Industrie 4.0 (Industrie 4.0 Management 5/2017)	66	978-3-95545-232-2
5231	Gronau, N.	Geschäftsmodelle im Kontext von Industrie 4.0 (Industrie 4.0 Management 5/2017)	66	978-3-95545-231-5
5228	Gronau, N.; Eggert, S.	ERP-Auswahl (ERP-Management 3/2017) E-Journal	66	978-3-95545-228-5
5234	Gronau, N.; Glaschke, Ch.	Die Rolle von ERP-Systemen im Zeitalter der Digitalisierung E-Book	205	978-3-95545-234-6
5235	Scholz-Reiter, B.	Prozessinnovation (productivity 4/2017)	66	978-3-95545-235-3
5236	Scholz-Reiter, B.	Prozessinnovation (productivity 4/2017) E-Journal	66	978-3-95545-236-0
5239	Gronau, N.; Eggert, S.	Erfolgsfaktoren zur ERP-Einführung (ERP Management 4/2017)	66	978-3-95545-239-1
5240	Gronau, N.	Erfolgsfaktoren zur ERP-Einführung (ERP Management 4/2017) E-Journal	66	978-3-95545-240-7
5238	Scholz-Reiter, B.	Betriebssysteme für Fabriken (Industrie 4.0 Management 6/2017) E-Journal	66	978-3-95545-238-4
5242	Gronau, N.	Fabriksicherheit (Industrie 4.0 Management 1/2018)	66	978-3-95545-242-1
5243	Gronau, N.	Fabriksicherheit (Industrie 4.0 Management 1/2018) E-Journal	66	978-3-95545-243-8
5244	Gronau, N.	Fabriksoftware (productivITy 1/2018)	66	978-3-95545-244-5
5245	Gronau, N.	Fabriksoftware (productivITy 1/2018) E-Journal	66	978-3-95545-245-2

5248	Bill, R., Zehner, M. L., Lerche, T., Schröder, J. (Hrsg.)	GeoForum MV 2018 - Geoinformation und Digitalisierung	190	978-3-95545-248-3
5249	Scholz-Reiter, B.	Cross Industry 4.0 (Industrie 4.0 Management 2/2018)	66	978-3-95545-249-0
5250	Scholz-Reiter, B.	Cross Industry 4.0 (Industrie 4.0 Management 2/2018) E-Journal	66	978-3-95545-250-6
5251	Gronau, N.	Intelligente Produktion (Fabriksoftware 2/2018)	66	978-3-95545-251-3
5211	Scholz-Reiter, B.	Industrie 4.0-Technologien (productivity 2/2017)	68	978-3-95545-211-7
5220	Gronau, N.	Produktionssysteme (productivITy 3/2017)	68	978-3-95545-220-9
5235	Scholz-Reiter, B.	Prozessinnovation (productivity 4/2017)	66	978-3-95545-235-3
5203	Eggert, S.	Big Data und ERP (ERP Management 1/2017)	66	978-3-95545-203-2
5213	Gronau, N.	CRM-ERP-Strategien (ERP Management 2/2017)	64	978-3-95545-213-1
5227	Gronau N.; Eggert	ERP-Auswahl (ERP-Management 3/2017)	66	978-3-95545-227-8
5239	Gronau, N.; Eggert, S.	Erfolgsfaktoren zur ERP-Einführung (ERP Management 4/2017)	66	978-3-95545-239-1
5199	Scholz-Reiter, B.	Energie- und Ressourceneffiziente Produktion (Industrie 4.0 Management 1/2017)	66	978-3-95545-199-8
5209	Gronau, N.	Standardisierung (Industrie 4.0 Management 2/2017)	64	978-3-95545-209-4
5216	Gronau, N.	Megatrend Digitalisierung (Industrie 4.0 Management 3/2017)	80	978-3-95545-216-2
5218	Scholz-Reiter, B.	Industrial Big Data (Industrie 4.0 Management 4/2017)	64	978-3-95545-218-6
5231	Gronau, N.	Geschäftsmodelle im Kontext von Industrie 4.0 (Industrie 4.0 Management 5/2017)	66	978-3-95545-231-5
5237	Scholz-Reiter, B.	Betriebssysteme für Fabriken (Industrie 4.0 Management 6/2017)	66	978-3-95545-237-7
5242	Gronau, N.	Fabriksicherheit (Industrie 4.0 Management 1/2018)	66	978-3-95545-242-1
5249	Scholz-Reiter, B.	Cross Industry 4.0 (Industrie 4.0 Management 2/2018)	66	978-3-95545-249-0
5244	Gronau, N.	Fabriksoftware (productivITy 1/2018)	66	978-3-95545-244-5
5251	Gronau, N.	Intelligente Produktion (Fabriksoftware 2/2018)	66	978-3-95545-251-3
5253	Gronau, N.	Business Analytics mit ERP (ERP Management 1/2018)	66	978-3-95545-253-7
5197	Gronau, N., Glaschke, Chr.	Die Rolle von ERP-Systemen im Zeitalter der Digitalisierung	277	978-3-95545-197-4
5248	Bill, R. u.a.	GeoForum MV 2018 - Geoinformation und Digitalisierung	190	978-3-95545-248-3
5261	Gronau, N.	Von Industrial Internet of Things zu Industrie 4.0	237	978-3-95545-2612
5247	Gronau, N.	Industrial Internet of Things –Grundlagen	245	978-3-95545-247-6

## Fertigungssteuerung

5182	Gronau, N.	Additive Fertigung (Industrie 4.0 Management 5/2016)	66	978-3-95545-182-0
5235	Scholz-Reiter, B.	Prozessinnovation (productivity 4/2017)	66	978-3-95545-235-3
5218	Scholz-Reiter, B.	Industrial Big Data (Industrie 4.0 Management 4/2017)	64	978-3-95545-218-6
5244	Gronau, N.	Fabriksoftware (productivITy 1/2018)	66	978-3-95545-244-5
5251	Gronau, N.	Intelligente Produktion (Fabriksoftware 2/2018)	66	978-3-95545-251-3
5198	Yi, Tan	Extension, Configuration and the Advantages of the Shifting Bottleneck Approach for Solving Dynamic Job Shop Scheduling Problems in Production and Logistics Processes	105	978-3-95545-198-1
5226	Ehm, Jens	Integrierte Planung von Produktions- und Transportprozessen	132	978-3-95545-226-1
5225	Gronau, N. (Hrsg.)	Industrial Internet of Things in der Arbeits- und Betriebsorganisation	260	978-3-95545-225-4
5224	Lass, Sander	Nutzenvalidierung cyber-physischer Systeme in komplexen Fabrikumgebungen	321	978-3-95545-224-7
5247	Gronau, N.	Industrial Internet of Things –Grundlagen	245	978-3-95545-247-6

## Industrie 4.0

5176	Scholz-Reiter, B.	Industrie 4.0 Forschungs- und Anwendungszentren (Industrie 4.0 Management 4/2016)	80	978-3-95545-176-9
5174	Gronau, N.	Industrie 4.0 (productivITy 3/2016)	64	978-3-95545-174-5
5182	Gronau, N.	Additive Fertigung (Industrie 4.0 Management 5/2016)	66	978-3-95545-182-0
5180	Scholz-Reiter, B.	Lean Production (productivITy 4/2016)	68	978-3-95545-180-6
5201	Gronau, N.	Fabriksoftware (productivITy 1/2017)	66	978-3-95545-201-8

5211	Scholz-Reiter, B.	Industrie 4.0-Technologien (productivity 2/2017)	68	978-3-95545-211-7
5220	Gronau, N.	Produktionssysteme (productivITy 3/2017)	68	978-3-95545-220-9
5235	Scholz-Reiter, B.	Prozessinnovation (productivity 4/2017)	66	978-3-95545-235-3
5227	Gronau N.; Eggert	ERP-Auswahl (ERP-Management 3/2017)	66	978-3-95545-227-8
5209	Gronau, N.	Standardisierung (Industrie 4.0 Management 2/2017)	64	978-3-95545-209-4
5216	Gronau, N.	Megatrend Digitalisierung (Industrie 4.0 Management 3/2017)	80	978-3-95545-216-2
5218	Scholz-Reiter, B.	Industrial Big Data (Industrie 4.0 Management 4/2017)	64	978-3-95545-218-6
5231	Gronau, N.	Geschäftsmodelle im Kontext von Industrie 4.0 (Industrie 4.0 Management 5/2017)	66	978-3-95545-231-5
5237	Scholz-Reiter, B.	Betriebssysteme für Fabriken (Industrie 4.0 Management 6/2017)	66	978-3-95545-237-7
5242	Gronau, N.	Fabriksicherheit (Industrie 4.0 Management 1/2018)	66	978-3-95545-242-1
5249	Scholz-Reiter, B.	Cross Industry 4.0 (Industrie 4.0 Management 2/2018)	66	978-3-95545-249-0
5244	Gronau, N.	Fabriksoftware (productivITy 1/2018)	66	978-3-95545-244-5
5251	Gronau, N.	Intelligente Produktion (Fabriksoftware 2/2018)	66	978-3-95545-251-3
5253	Gronau, N.	Business Analytics mit ERP (ERP Management 1/2018)	66	978-3-95545-253-7
5198	Yi, Tan	Extension, Configuration and the Advantages of the Shifting Bottleneck Approach for Solving Dynamic Job Shop Scheduling Problems in Production and Logistics Processes	105	978-3-95545-198-1
5224	Lass, Sander	Nutzenvalidierung cyber-physischer Systeme in komplexen Fabrikumgebungen	321	978-3-95545-224-7
5261	Gronau, N.	Von Industrial Internet of Things zu Industrie 4.0	237	978-3-95545-2612
5247	Gronau, N.	Industrial Internet of Things –Grundlagen	245	978-3-95545-247-6

### Lean Production

5201	Gronau, N.	Fabriksoftware (productivITy 1/2017)	66	
5231	Gronau, N.	Geschäftsmodelle im Kontext von Industrie 4.0 (Industrie 4.0 Management 5/2017)	66	978-3-95545-231-5
5237	Scholz-Reiter, B.	Betriebssysteme für Fabriken (Industrie 4.0 Management 6/2017)	66	978-3-95545-237-7
5248	Bill, R. u.a.	GeoForum MV 2018 - Geoinformation und Digitalisierung	190	978-3-95545-248-3

### Produktionssysteme

5182	Gronau, N.	Additive Fertigung (Industrie 4.0 Management 5/2016)	66	978-3-95545-182-0
5180	Scholz-Reiter, B.	Lean Production (productivITy 4/2016)	68	978-3-95545-180-6
5220	Gronau, N.	Produktionssysteme (productivITy 3/2017)	68	978-3-95545-220-9
5235	Scholz-Reiter, B.	Prozessinnovation (productivity 4/2017)	66	978-3-95545-235-3
5199	Scholz-Reiter, B.	Energie- und Ressourceneffiziente Produktion (Industrie 4.0 Management 1/2017)	66	978-3-95545-199-8
5209	Gronau, N.	Standardisierung (Industrie 4.0 Management 2/2017)	64	978-3-95545-209-4
5216	Gronau, N.	Megatrend Digitalisierung (Industrie 4.0 Management 3/2017)	80	978-3-95545-216-2
5218	Scholz-Reiter, B.	Industrial Big Data (Industrie 4.0 Management 4/2017)	64	978-3-95545-218-6
5231	Gronau, N.	Geschäftsmodelle im Kontext von Industrie 4.0 (Industrie 4.0 Management 5/2017)	66	978-3-95545-231-5
5237	Scholz-Reiter, B.	Betriebssysteme für Fabriken (Industrie 4.0 Management 6/2017)	66	978-3-95545-237-7
5242	Gronau, N.	Fabriksicherheit (Industrie 4.0 Management 1/2018)	66	978-3-95545-242-1
5249	Scholz-Reiter, B.	Cross Industry 4.0 (Industrie 4.0 Management 2/2018)	66	978-3-95545-249-0
5244	Gronau, N.	Fabriksoftware (productivITy 1/2018)	66	978-3-95545-244-5
5251	Gronau, N.	Intelligente Produktion (Fabriksoftware 2/2018)	66	978-3-95545-251-3
5205	Eggert, S.	89 Systeme im direkten Vergleich (ERP - Marktüberblick 1/2017)	96	978-3-95545-205-6
5198	Yi, Tan	Extension, Configuration and the Advantages of the Shifting Bottleneck Approach for Solving Dynamic Job Shop Scheduling Problems in Production and Logistics Processes	105	978-3-95545-198-1
5224	Lass, Sander	Nutzenvalidierung cyber-physischer Systeme in komplexen Fabrikumgebungen	321	978-3-95545-224-7
5248	Bill, R. u.a.	GeoForum MV 2018 - Geoinformation und Digitalisierung	190	978-3-95545-248-3

---

Kleine und mittelständische Unternehmen bilden das Rückgrat der europäischen Wirtschaft und stehen aktuell mit Themen wie Industrie 4.0 oder der digitalen Transformation vor neuen und großen Herausforderungen. Wie kann sichergestellt werden, dass diese digitale Transformation kein Sprung ins Ungewisse, sondern der Auftakt für eine erfolgreiche und nachhaltige Weiterentwicklung des Unternehmens wird?

Die Wissenschaftliche Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation (WGAB) möchte mit den Beiträgen seiner Mitglieder in diesem Tagungsband einen Einblick darin geben, wie eine systematische Umsetzung der Digitalisierung in KMU ermöglicht werden kann und welche Vorteile und Chancen sich daraus für die Unternehmen ergeben.