Anwendungsorientierte Beiträge zum Industriellen Management

Herwig Winkler [Hrsg.]

Flexibilisierung der Fabrik im Kontext von Industrie 4.0

Herwig Winkler, Ulrich Berger, Christian Mieke, Michael Schenk (Hrsg.)

λογος

6
2017

Herwig Winkler, Ulrich Berger,
Christian Mieke, Michael Schenk (Hrsg.)

Flexibilisierung der Fabrik im Kontext von Industrie 4.0

Logos Verlag Berlin

λογος

Anwendungsorientierte Beiträge zum Industriellen Management

Band 6

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr. habil. Herwig Winkler

Anwendungsorientierte Beiträge zum Industriellen Management

Herausgegeben von
Univ.-Prof. Dr. habil. Herwig Winkler
Lehrstuhl für Produktionswirtschaft
Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg (BTU)
Siemens-Halske-Ring 6
D-03046 Cottbus
e-mail: winkler@b-tu.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

© Copyright Logos Verlag Berlin GmbH 2017

Alle Rechte vorbehalten.

ISBN 978-3-8325-4475-1
ISSN 2191-7612

Logos Verlag Berlin GmbH
Comeniushof, Gubener Str. 47,
10243 Berlin
Tel.: +49 (0)30 / 42 85 10 90
Fax: +49 (0)30 / 42 85 10 92
http://www.logos-verlag.de

Inhaltsverzeichnis

Methodische Überlegungen zur Flexibilitätsbeurteilung in Wertschöpfungssystemen
Herwig Winkler 1

Von der flexiblen zur smarten Fabrik durch Industrie 4.0
Andreas Schumacher, Fabian Ranz, Erol Selim und Wilfried Sihn 15

Entscheidungsunterstützung in der Industrie 4.0 aus dem Blickwinkel der Operational Business Intelligence
Tom Hänel, Carsten Felden 37

Flexibel adaptierbare, intelligente Arbeitsplatzsysteme für große Bauteile
Florian Beuß, Claus Zopff, Jan Sender, Anne-Katrin Schröder und Konrad Jagusch 61

Entwicklung und Integration eines roboterbasierten, cyber-physischen Systems im Rahmen der Industrie 4.0
Ulrich Berger, J. Philipp Städter und Fabian Jonen 73

Einsatz der skillbasierten Roboterprogrammierung bei der Produktion von kleinen und kleinsten Losgrößen
Ulrich Berger, Kornelius Wächter, J. Philipp Städter und Fabian Jonen 87

Performance Measurement im Zeitalter der Digitalisierung: Eine Balanced Scorecard für die Industrie 4.0
Matthias von Entreß-Fürsteneck, Johannes Karl und Nils Urbach 107

Smart Logistics: Intelligente Logistik für flexible Fabriken
Dirk Jodin, Christian Landschützer 133

Digitale Anlieferkonzepte – Impulse für eine Flexibilisierung der Inbound-Logistik
Wolfgang Stölzle, Julia Burkhardt 169

Digitalisierte Wertschöpfungsarchitekturen im Spannungsfeld von Standardisierung und Flexibilisierung – Eine Untersuchung am Beispiel der Kunststoffbranche
Sabine Baumann, Oliver Eulenstein und Christoph Wunck 185

Anforderungen an Supply Chain Netzwerke im Kontext von Industrie 4.0
Marion Steven, Laura Reder 207

Erarbeitung von Anpassungspotenzialen durch Planung von Prozessvarianten in Produktionsnetzwerken
Christian Mieke 229

Die Herausgeber 243

Autorenverzeichnis 245

Von der flexiblen zur smarten Fabrik durch Industrie 4.0

Andreas Schumacher, Fabian Ranz, Erol Selim und Wilfried Sihn

Die Europäische Industrie befindet sich derzeit in einem längst überfälligen Umbruch, der – als Revolution tituliert – eine industrielle Aufholjagd einleiten soll. Diese Neuausrichtung der industriellen Produktion ist vor allem der fortgeschrittenen Globalisierung der Märkte, knapper werdenden Ressourcen, demografischen Veränderungen und veränderten Kundenanforderungen geschuldet. Die Auswirkungen der Globalisierung lassen sich unter anderem an der Menge der exportierten Güter aus der Eurozone festmachen, die zwischen 2006 und 2016 um etwa 67 Prozent gestiegen ist.[1] Auch die Zahl der weltweit angemeldeten Patente signalisiert den steigenden Druck durch internationale Mitbewerber: 2014 wurde in China bereits ein Drittel aller weltweiten Patente eingereicht, mehr als in den USA und Japan gemeinsam – Europa hinkt hier traditionell hinterher.[2] Neben dieser Marktdynamik zwingt auch die zunehmende Ressourcenknappheit, etwa im Bereich der Energieträger, zum Handeln. Eine umfassende Erhebung von VGB PowerTech aus dem Jahr 2008 prognostiziert, dass die statische Reichweite des wirtschaftlich nutzbaren Erdgases und Erdöls bei 64 bzw. 62 Jahren liegt, und somit die energieintensive Produktion der Vergangenheit keinesfalls fortgeführt werden kann.[3] Ein weiterer Einflussfaktor ist der demografische Wandel in Mitteleuropa: So geben laut einer DIHK-Studie 58 Prozent von mehr als 8600 befragten deutschen Industrieunternehmen einen Mangel an Fachkräften als direkte Folge der Überalterung der Gesellschaft an, was für 19 Prozent der Unternehmen im Verlust von betriebsinternem Wissen resultiert. Dieses Wissensdefizit wird durch sich stetig ändernde Anforderungen an die Mitarbeiter verstärkt, was wiederum für 29 Prozent der Unternehmen zu einem steigenden Weiterbildungsbedarf führt.[4] Beobachtet man die Veränderungen auf Kundenseite,

1 Vgl. Eurostat 2017.
2 Vgl. WIPO 2015.
3 Vgl. VGB PowerTech 2008.
4 Vgl. DIHK 2016.

so ist ein niedriger Preis zwar noch immer das wichtigste Kriterium für die Kaufentscheidung[5], allerdings erwarten Kunden vermehrt zum Beispiel eine höhere Individualisierbarkeit der Produkte sowie die Integration von Serviceleistungen („Product as a Service").

Diese teilweise altbekannten Herausforderungen verlangen nach einer Reaktion der Industrie, die bis dato jedoch weitgehend ausgeblieben ist. Alleine dem steigenden Preisdruck will die heimische Industrie seit längerem durch die Verlegung inländischer Produktionsstätten in Niedriglohnländer entgegenwirken. So ergab eine Umfrage unter 2500 deutschen Betrieben, dass im Jahr 2016 beinahe die Hälfte (47 %) der befragten Industrieunternehmen im Ausland investieren, wobei ein Viertel dieser Unternehmen Kostenüberlegungen als ausschlaggebenden Grund angibt.[6] Die geringe Attraktivität des Produktionsstandorts Europa lässt sich mit dem globalen „Cost-Competitive Index"[7] faktisch bestätigen: Nimmt man die vorgeschlagene Finanzsicht dieses Index ein (Stand 2014), so sind die Produktionsbedingungen in China (Faktor 0,8 der Kosten in Deutschland), Indien (Faktor 0,7), aber auch in den USA (Faktor 0,85) merklich besser. Der Industriestandort Österreich ist aus Kostensicht zwar attraktiver als Deutschland (ca. Faktor 0,9), liegt jedoch im internationalen Vergleich ebenfalls zurück.[8] Die Erhebung desselben Index aus dem Jahr 2004 zeigt, dass die nachlassende Attraktivität der Produktionsstandorte in Europa kein Gegenwartsproblem ist, sondern bereits länger anhaltenden Fehlentwicklungen geschuldet ist.

Der hohe Wertschöpfungsanteil der industriellen Produktion in Deutschland sowie die sinkende Standortattraktivität veranlasste die deutsche Bundesregierung, hier als Vorreiterin zu handeln: Unter dem Schlagwort „Industrie 4.0" wurde das industrielle Wiedererwachen in Form einer (europäischen) „vierten industriellen Revolution" ausgerufen. Dieses bei der Hannover Messe 2011 vorgestellte Zukunftsprojekt ist Teil der „Neuen Hightech Strategie"[9] und setzt auf eine gesamtheitliche Neuausrichtung der

---

5 Vgl. Deloitte 2016.

6 Vgl. DIHK 2016.

7 Anmerkung: Der Index erhebt die Gesamt-Wettbewerbsfähigkeit aufgrund der Produktionskosten in mehreren Kategorien: Gehälter, Produktivität, Energiekosten und Import/Export Wechselkurse des Landes und andere Kosten.

8 Vgl. BCG 2016.

9 Vgl. BMBF 2014.

Wertschöpfung. Neben der Integration der einzelnen Elemente entlang der Wertschöpfungskette (horizontale Integration) und der datengestützten Integration der Ingenieursleistungen (End-to-End-Engineering), setzt Industrie 4.0 auch auf die vertikale Integration der Ebenen innerhalb eines Unternehmens. Die gesamtheitliche Umsetzung dieser drei Konzepte führt letztendlich zur „Smarten Fabrik", dem Zielzustand der Industrie 4.0. Diese futuristischen Konzepte sind für Unternehmen derzeit jedoch noch schwer fassbar und deren gesamtheitliche Umsetzung aufgrund der hohen Abstraktionsebene in der Praxis noch nicht zu beobachten.

Ziel dieses Beitrags ist es, die Verständnislücke zwischen der weit verbreiteten und unseres Erachtens gut verstandenen „Flexibilität einer Fabrik" und dem neuen Ansatz der „intelligenten Fabrik (Smart Factory)" zu schließen. Hierzu setzen wir in diesem Beitrag auf dem klassischen Flexibilitätsbegriff der industriellen Produktion auf und betten diesen in das Konzept der smarten Fabrik ein. Wir halten diese Einbettung für essenziell, da die flexible Fabrik der Vergangenheit zur intelligenten Fabrik der Zukunft werden muss, um den Ansprüchen der vierten industriellen Revolution zu genügen.

Von der Flexibilisierung zur Intelligentisierung

Universell gültige Definitionen für die Flexibilität eines Unternehmens festzumachen, scheint schwierig, denn verschiedene Disziplinen beantworten diese Fragestellung meist isoliert aus ihrem Blickwinkel. Die Operationalisierung des Flexibilitätsbegriffs, etwa für die Betriebs- oder Ingenieurswissenschaften, bezieht sich meist auf die Anpassungsfähigkeit an neue Anforderungen und bleibt somit eindimensional. Um diesem Problem entgegenzutreten, definierte die OECD in den 1980er-Jahren vier Bereiche, in denen ein Unternehmen flexibel agieren muss [10:]

1. Internal Flexibility: Veränderungen der internen Unternehmensstruktur
2. External Flexibility: Veränderungen an den Kontaktstellen zur Umwelt
3. Numerical Flexibility: Veränderungen bei der Personalstruktur
4. Functional Flexibility: Veränderungen bei der Unternehmensqualifikation

---

10 Vgl. Frieling et al. 2000, S. 79.

So kann ein Unternehmen zum Beispiel durch den Abbau interner Hierarchien, der Herstellung von Kontakten zu neuen Märkten, durch flexible Arbeitszeitmodelle oder die bessere Verteilung existierender Mitarbeiterfähigkeiten in jedem dieser Bereiche flexibler werden. Diese Aufteilung des Flexibilitätskonzepts in vier Bereiche erlaubt es, die verschiedenen Sichtweisen der Disziplinen zu einem mehrdimensionalen Problem zu vereinen. Außerdem wurde hiermit eine theoretische Grundlage geschaffen, um Unternehmen in Bezug auf ihre Flexibilität miteinander vergleichbar zu machen.

Aufbauend auf dieser Einteilung definierten LUND UND GJERDING 1996 in einer umfangreichen Studie einen allgemeinen Flexibilitätsindex für Unternehmen, der sich aus internen und externen Faktoren zusammensetzt. Die internen Faktoren beziehen sich großteils auf die Mitarbeiter und führen deren Autonomie, die Abwechslung und Integration von Tätigkeiten, die Interdisziplinarität und Weiterbildung sowie die Bildung von Teams und Delegationsfähigkeit als Hauptkriterien an. Als externe Flexibilitätsfaktoren führt der Index die Fähigkeit zur Einführung neuer Produkte und Services, die Diversität der Kunden und Märkte sowie die Implementierung neuer Technologien an.[11] Die Sichtweise der „Wandlungsfähigkeit" einer Fabrik von SCHENK UND WIRTH aus dem Jahr 2004 ist eine Weiterentwicklung dieses Flexibilitätsindexes, die sich aus den beiden Teilen der „Anpassungsfähigkeit" und der „Entwicklungsfähigkeit" zusammensetzt. Diese Wandlungsfähigkeit des Unternehmens kann auch als Erweiterung der lange als reaktiv interpretierten Flexibilität um eine proaktive Komponente gesehen werden. Hierbei wird die rasche, aber jedenfalls zeitverzögerte Anpassung des Unternehmens an veränderte Umweltbedingungen mit gestalterischen Aspekten ausgebaut und dies erlaubt dem Unternehmen, anpassungsfähig, aber auch entwicklungsfähig zu sein.[12]

---

11 Vgl. Lund/Gjerding 1996, S. 14.

12 Vgl. Kaluza/Blecker 2005, S. 6.

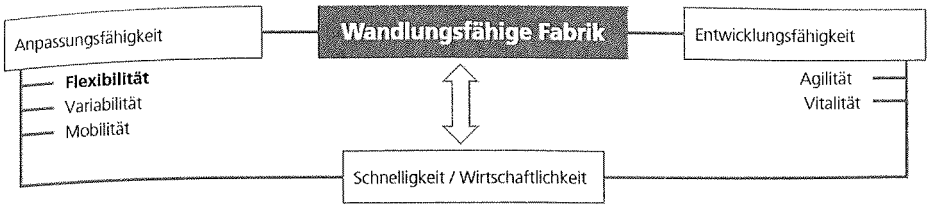

Abbildung 1: Konzept der Wandlungsfähigkeit einer Fabrik (angepasste Darstellung in Anlehnung an Schenk/Wirth 2004, S. 10)

Der Flexibilitätsbegriff wird bei einem wandlungsfähigen Unternehmen bereits als integrativer Bestandteil der Anpassungsfähigkeit verstanden und als „(...) die Fähigkeit einer Fabrik und ihrer Ressourcen, den notwendigen funktionalen, dimensionalen und strukturellen Anforderungen in den Betrachtungsebenen Prozess, Ressourcen, Produktions-, Gebäude- und Fabriksystem zu entsprechen".[13] Des Weiteren werden die „Variabilität" sowie die „Mobilität" angeführt, die zum einen die zeitliche Veränderbarkeit der Fabrikstrukturen und zum anderen die räumliche Veränderbarkeit (Beweglichkeit) der Fabrik oder von Teilen der Fabrik beschreiben. Im Hinblick auf zukünftige Anforderungen werden hier Aspekte der Entwicklungsfähigkeit, nämlich jene der Agilität und Vitalität der Fabrik eingeführt. Die Agilität beschreibt die Eigendynamik der Organisation einer Fabrik, durch die Veränderungsprozesse selbst angestoßen und umgesetzt werden, während die Vitalität das Energiepotenzial der Organisation versteht, mit dem Veränderungs- und Verbesserungsprozesse als permanente Aufgabe realisiert werden. Diese Eigenschaften einer wandlungsfähigen Fabrik von SCHENK UND WIRTH haben bereits größere Schnittmengen mit der intelligenten Fabrik, der wir uns nun annähern wollen.

Der Begriff der „Intelligentisierung" einer Fabrik wurde von ZHOU im Jahr 2013 als „(...) generic enabling technologies for product innovation and manufacturing technology innovation"[14] beschrieben. Wir verwenden im Folgenden Zhou's Verständnis der Intelligentisierung und weiten es auf die verschiedenen Unternehmensebenen und organisationale Aspekte aus. Der Begriff der „Intelligenz" an sich ist bis dato hauptsächlich

13 Schenk/Wirth 2004, S. 10.
14 Zhou 2013, S. 2.

aus den Humanwissenschaften bekannt und beschreibt kurzum die kognitiven Fähigkeiten eines Menschen, Probleme zu lösen. Diese Fähigkeiten lassen sich jedoch nicht direkt als „Sache" messen (wie z.B. das Messen der Größe eines Menschen), sondern nur indirekt als soziales Konstrukt. Intelligenz wird also als Ausprägung jener Attribute angegeben, die in einer Kultur zum größten Erfolg führen. Das deutet bereits darauf hin, dass das Konzept der Intelligenz, wie jenes der Flexibilität oder Wandlungsfähigkeit, stark von der Beschaffenheit und damit den Anforderungen der Umwelt abhängt.[15] Die Operationalisierung der Intelligenz geht bis zur Antike zurück: So hatte sich bereits Aristoteles (384 – 322 v. Chr.) in Ansätzen mit der Nachstellung rationaler Entscheidungen durch mechanische Artefakte beschäftigt. Dieser Nachbau menschlicher Fähigkeiten wurde später wieder aufgegriffen und mit der ersten anerkannten Arbeit speziell zum Thema der „Artificial Intelligence (AI)" durch McCulloch und Pins im Jahre 1943 weiter vertieft. Die AI hat sich um 1980 als eigenständige Industrie etabliert und ist seitdem vor allem durch verbesserte Technologien und die Möglichkeit, sehr große Datenmengen zu erzeugen, zu sammeln und weiter zu verarbeiten exponentiell gewachsen.[16] Eine kurze, jedoch relativ universell gültige Definition der künstlichen Intelligenz, die auch dem derzeit populären Konzept „Smart Everything" genügt, liest sich als „AI (...) is concerned with intelligent behavior in artifacts".[17]

Im Folgenden wollen wir die Erkenntnisse aus der AI nutzen, um Anforderungen an eine intelligente Fabrik zu definieren. Diese Anforderungen werden den klassischen Unternehmensebenen zugeordnet, um eine verständliche Struktur für die nachfolgende Einordnung möglicher „Enabler zur Intelligentisierung" zu schaffen. Aus der existierenden Literatur zur Intelligentisierung der Wertschöpfung[18] [19] [20] [21] [22] sowie aus unseren Erfahrungen aus einschlägigen Forschungs- und Industrieprojekten leiten wir die in Abbildung 2 dargestellte Zuordnung von Anforderungen an eine intelligente Fabrik ab.

---

15 Vgl. Myers 2008, S. 405.
16 Vgl. Russel et al. 2010, S. 5.
17 Nilsson 1998, S. 1.
18 Vgl. Bauernhansl et al. 2014, S. 174.
19 Vgl. Hentz et al. 2013, S. 243.
20 Vgl. Constantinescu et al. 2014, S. 270.
21 Vgl. ElMaraghy/ElMaraghy 2016, S. 4.
22 Vgl. Brettel et al. 2014, S. 38.

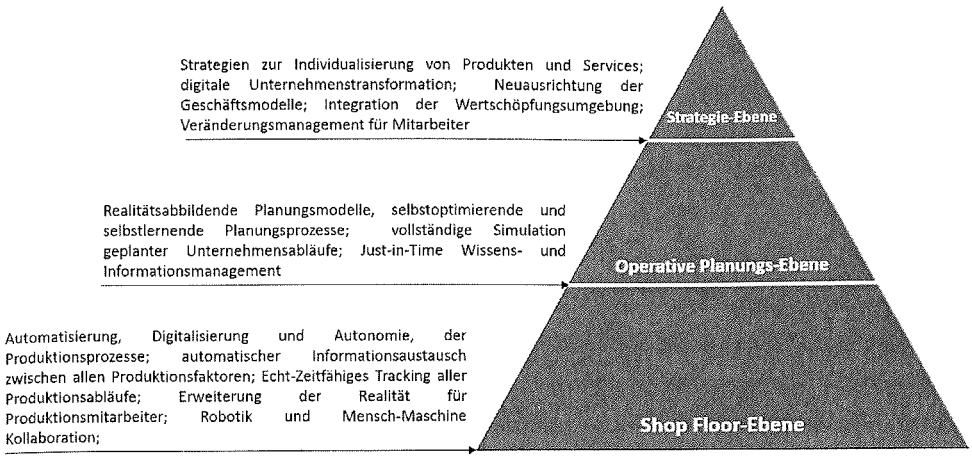

Abbildung 2: Unternehmenspyramide mit Anforderungen an eine intelligente Fabrik

Folgt man Ansätzen aus den offiziellen „Umsetzungsempfehlungen zur Industrie 4.0“[23], sollte diese getrennte Betrachtung der Unternehmensebenen und der zugehörigen Industrie-4.0-Konzepte vermieden werden, da die daten- bzw. IKT-gestützte vertikale Integration im Unternehmen, die horizontale Integration über die Wertschöpfungslandschaft bzw. die Integration aller Ingenieursleistungen über die Wertschöpfungskette diese Hierarchien im Idealzustand weitgehend auflösen.

Hier ein Praxisbeispiel zur Veranschaulichung dieser Integrationen: Ein Möbelhersteller hat seine Produktpalette in allen drei physischen Dimensionen (Breite, Höhe, Tiefe) stufenlos parametrierbar ausgelegt. Über einen Web-Konfigurator kann der Endkunde das Möbelstück wunschgemäß dimensionieren und mit einer auf Augmented Reality basierenden Smartphone-Applikation direkt am zukünftigen Aufstellort visualisieren. Durch eine automatisierte Überführung des individuellen Kundenauftrags in einen numerischen Auftrag für die maschinelle Komponentenfertigung können auch vollkommen individualisierte Einzelstücke ohne zusätzlichen Planungsaufwand – und folglich ohne Mehrkosten gegenüber Standardprodukten – realisiert werden. Ermöglicht wird dies durch hohe Datenintegration, die eine aufwandsarme Einzelstückfertigung ermöglicht

23 Vgl. Kagermann et al. 2013, S. 24.

und durch die Verwendung von Web-Applikationen auf Kundenseite, wodurch der Hersteller auf stationären Handel und Zwischenlagerstufen verzichten kann. Die immersive Visualisierung ermöglicht gleichzeitig eine verbesserte Kundenerfahrung noch vor dem Kauf. Das ist eine völlige Abkehr vom klassischen Geschäftsmodell im Möbelhandel, das üblicherweise mit hohen Vertriebskosten und, trotz hoher Standardisierung, langen Customer Lead Times verbunden ist. Dieses Beispiel verdeutlicht die nötige und mögliche Integration von Industrie-4.0-Elementen, um am Ende dem Kunden einen Mehrwert liefern zu können. Vor allem das beschriebene Kundenerlebnis ist unseres Erachtens auch durch höchste Flexibilität oder Wandlungsfähigkeit des Unternehmens nicht erreichbar. Vielmehr muss hier ein Paradigmenwechsel erfolgen: Inwieweit lässt man den Kunden in die Produktion eingreifen – und dieses neue Paradigma ist nur in intelligenten Produktionssystemen zu realisieren.

Im Gegensatz zu diesem Beispiel zeigen unsere Industrie- und Forschungsprojekte an der TU Wien bzw. bei Fraunhofer Austria Research, dass Unternehmen die derzeit gelebten Ansätze zur Industrie 4.0 noch intuitiv in die drei (oder mehr) Unternehmensebenen einordnen und auf die Integration weitgehend verzichten. Vor allem der große Umfang der Industrie-4.0-Konzepte verleitet Unternehmen in der Praxis dazu, Kernelemente zu vernachlässigen oder diese isoliert in einzelnen Unternehmensbereichen oder -ebenen umzusetzen. In diesem Zusammenhang wollen wir die – aus unserer Erfahrung – drei dringlichsten Problemstellungen anführen:

1. Unternehmen setzen auf isolierte Technologieentwicklungen in der Shop Floor-Ebene
2. Unternehmen implementieren Softwaresysteme auf operativer Planungsebene, vernachlässigen jedoch die unternehmensweite Integration
3. Unternehmen vernachlässigen die strategische Neuausrichtung sowie organisationale Aspekte

Aufbauend auf den Anforderungen an eine intelligente Fabrik und den dadurch entstehenden Problemen in der Praxis wollen wir nun mögliche „Enabler" zur Intelligentisierung" präsentieren.

Enabler zur Intelligentisierung der Fabrik

Auch wenn die nötige Integration aller Industrie-4.0-Aktivitäten über die Unternehmensbereiche und -ebenen noch schleppend voranschreitet, so sind in der Praxis zumin-

dest isoliert schon erste Schritte zur Realisierung erkennbar. Die folgenden Beschreibungen unserer Erfahrungen und Forschungsaktivitäten ordnen die Enabler zur Verständlichkeit den angeführten Ebenen (Strategie, operative Planung, Shop Floor) zu, wobei auch auf die nötige vertikale und horizontale Integration eingegangen wird.

Intelligentisierung auf Strategieebene

Die ersten Jahre nach dem Ausruf der Industrie 4.0 haben gezeigt, dass sich Unternehmen die abstrakten Zielzustände nur schwer zu eigen machen konnten und daher auch keine entsprechenden Strategien zu Erreichung entwickelt haben. Dieser vorherrschenden Unsicherheit ist ein Forschungsvorhaben entsprungen, in dem wir Unternehmen in zwei Phasen durch die Realisierung der unternehmensspezifischen Industrie-4.0-Vision führen wollen.[24]

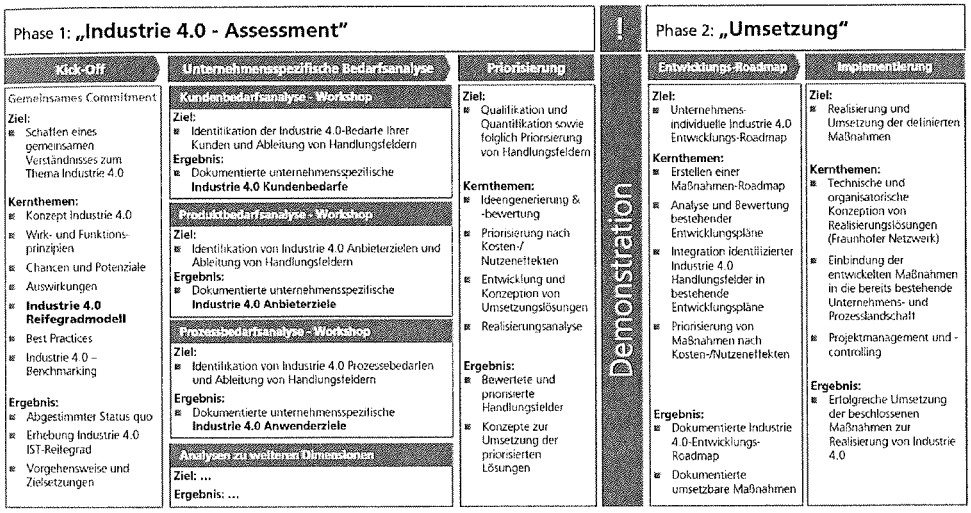

Abbildung 3: Vorgehensmodell zur Entwicklung und Umsetzung der unternehmenseigenen Industrie-4.0-Vision (eigene Darstellung)

24 Vgl. Erol et al. 2016, S. 248.

Das Vorgehensmodell baut auf dem Konzept der Co-Innovation und der Roadmapping-Methodik auf. Der Co-Innovation-Ansatz basiert auf dem Gedanken, dass Wettbewerbsfähigkeit nicht mehr allein durch Exzellenz in Kosten, Qualität und Lieferzeiten erhalten werden kann. Vielmehr kann ein nachhaltiger Vorsprung nur mehr durch die systematische und laufende Zusammenarbeit und Einbeziehung externer Interessengruppen bei der strategischen Ausrichtung, Produktentwicklung und Prozessgestaltung erreicht werden. Eine besondere Rolle kommt dabei dem Kunden zu, denn Mehrwert für den Kunden ist heute nicht mehr nur über die Produktdimension und die damit zusammenhängenden Variablen wie Qualität, Preis, Lieferzeit und Variantenvielfalt gestaltbar. Hinzu kommen nun auch die Prozessdimension, die Art der Zusammenarbeit und die Möglichkeit der Mitwirkung in der Produkt- und Prozessgestaltung. Während Co-Innovation in diesem Phasenmodell mehr als Denkansatz verstanden werden kann, dient das Roadmapping als Methode der systematischen Planung der strategischen Innovationsprozesse. Vor allem Phase 2 des Vorgehensmodells („Umsetzung") fokussiert auf die Entwicklung einer Roadmap, welche die Umsetzung der abgeleiteten Projekte festlegt.

Der Ableitung des Industrie-4.0-Bedarfs, der Priorisierung der Handlungsfelder sowie der Entwicklung und Umsetzung der Roadmap muss jedoch eine fundierte Standortbestimmung des Unternehmens vorausgehen. Diese Bestimmung des Ist-Standes auf dem Weg zur smarten Fabrik setzen wir in diesem Modell mit einem weiteren Forschungsvorhaben um, dem sogenannten „Industrie-4.0-Reifegradmodell".[25] Das Reifegradmodell dient der Bestimmung der Industrie-4.0-Reife eines Unternehmens in neun Dimensionen: Strategie, Leadership, Customers, Products, Operations, Culture, People, Governance und Technology. Das Unternehmen wird in diesen neun Dimensionen mit einem Industrie-4.0-Reifegrad zwischen 1 (sehr unreif) und 5 (sehr reif) bewertet (siehe Abbildung 4).

25 Vgl. Schumacher et al. 2016, S. 163.

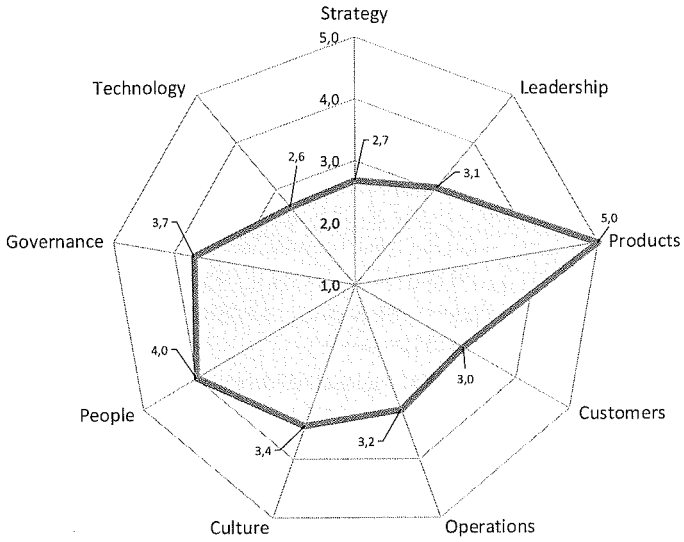

Abbildung 4: Beispiel der Industrie-4.0-Reife eines Produktionsunternehmens in der Flugzeugindustrie

Die Industrie 4.0-Reife einer Dimension errechnet sich hierbei aus der Reife der zugeordneten Attribute (siehe Tabelle 1).

Dimension	Beispielattribute
Strategy	Implementierung einer Industrie-4.0-Roadmap, Verfügbarkeit von Ressourcen für Industrie 4.0, Aspekte der Industrie 4.0 in den derzeitigen Geschäftsmodellen, Strategie zur digitalen Transformation des Unternehmens, ...
Leadership	Bereitschaft der Unternehmensführung zur Umsetzung von Industrie 4.0, zentrale Koordinationsstelle für Industrie 4.0, Kompetenzen der Führungsebene zur Umsetzung von Industrie 4.0, ...
Customers	Nutzung von Daten über Kunden und deren Verhalten, Digitalisierung des Kundenkontakts, Kompetenz der Kunden im Umgang mit digitalen Medien, Integration der Kunden in die Unternehmensaktivitäten, ...
Products	Möglichkeit, Produkte zu individualisieren, Nutzung digitaler Simulationen zur Prozessgestaltung und Planung, Flexibilität der Produktcharakteristika, Autonomie der Produkte, ...
Operations	Dezentralisierung des Wertschöpfungssystems, digitale Simulation zur Prozessgestaltung, Automatisierung und Digitalisierung der Prozesse, ...
Culture	Einbindung der Mitarbeiter in Veränderungsprozesse, Wissensmanagement im Unternehmen, Stellenwert der IKT im Unternehmen, ...
People	IKT-Kompetenzen der Mitarbeiter, Autonomie der Mitarbeiter, Offenheit der Mitarbeiter gegenüber neuen Technologien, ...
Governance	Eignung der geltenden Arbeitsregelungen, Eignung der technologischen Standards für Industrie 4.0, Standards zum Schutz von geistigem Eigentum, ...
Technology	Autonomie des Maschinenparks, Nutzung von Auto-ID-Technologien, Nutzung von Cloud Services, moderne IKT im Unternehmen ...

Tabelle 1: Dimensionen des Industrie-4.0-Reifegradmodells mit Beispielattributen

Es wird schnell ersichtlich, dass diese Dimensionen über den Technologiefokus hinausgehen und organisationale Aspekte wie etwa die Unternehmensstrategie, die Mitarbeiter oder auch die Unternehmenskultur berücksichtigt werden. Dass es sich, wie eingangs hergeleitet, bei der Flexibilität einer Fabrik um einen integralen Bestandteil der Industrie 4.0 handelt, ist auch in diesem Reifegradmodell sichtbar. So findet sich der Flexibilitätsaspekt in einigen der fast 70 Attribute des Modells direkt oder indirekt wieder. Die Dimension „Products" erfasst Produkteigenschaften wie die *Autonomie bei der Aufgabenerfüllung* oder auch die *Flexibilität der Produktcharakteristika*. Auch die Flexibilität der Kunden wird über deren *Offenheit für neue Technologien* oder den *Umgang mit*

digitalen Medien einbezogen (Dimension „Customers"). Die *Flexibilität der Wertschöpfungsprozesse* („Operations"), die *Offenheit der Unternehmenspartner und Mitarbeiter gegenüber Veränderungen* („Culture" und „People") oder die *Flexibilität der Unternehmensstandards und des Maschinenparks* („Governance" und „Technology") sind weitere Reifeattribute, welche die Erweiterung von einer flexiblen zu einer intelligenten Fabrik aufzeigen. Im nächsten Schritt sollen die nötigen Voraussetzungen für die Intelligentisierung auf operativer Ebene näher beschrieben werden. Hierbei wird auch auf die nötige Integration der Unternehmensebenen eingegangen.

Intelligentisierung auf operativer Planungsebene

Die operative Ebene einer Fabrik umfasst alle Prozesse, die unmittelbar zur Herstellung eines Produkts beitragen. Es sind dies die Planungs- und Steuerungsprozesse, die wertschöpfenden Prozesse (die Produktion) sowie unterstützende Prozesse wie zum Beispiel die Instandhaltung. Die folgenden Betrachtungen orientieren sich an der Dreiteilung in Managementprozesse, Kern- oder Wertschöpfungsprozesse und Unterstützungsprozesse wie auch von PORTER vorgeschlagen.[26] Im Folgenden werden die grundlegenden Voraussetzungen für eine Intelligentisierung und damit Flexibilisierung auf operativer Ebene beschrieben.

Prozessorientierung

Die Prozessorientierung, also die systematische Erfassung, Planung, Steuerung und Kontrolle von Unternehmensaktivitäten, ist im Grunde nichts Neues. Sie wird unter anderem von der ISO 9001 seit 2008 und mit der neuen Version von 2015 verstärkt von Unternehmen im Hinblick auf ein effektives und effizientes Qualitätsmanagementsystem explizit gefordert. Die Grundidee der Prozessorientierung ist es, in einem Unternehmen die Ablauforganisation in den Vordergrund aller planerischen und steuernden Tätigkeiten zu stellen. Die Organisation eines Unternehmens in Form von Prozessen ermöglicht im Allgemeinen ein besseres Verständnis der Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Aktivitäten und damit zusammenhängender Ressourcen (z.B. Organisationseinheiten, Mitarbeiter, Arbeitsplätze, Maschinen, Materialien). Die Ausrichtung eines Unternehmens anhand der Ablauforganisation und deren

26 Vgl. Porter 1985, S. 39-45.

konsistente Beschreibung in Form einer Prozessarchitektur ermöglicht auch eine maximale Kundenorientierung, in der nicht mehr die Organisationseinheiten im Vordergrund stehen, sondern die Kundenbedürfnisse.[27]

Für zukünftige intelligente Produktionssysteme ist die Prozessorientierung eine Grundvoraussetzung, da sie in Kombination mit ebenfalls prozessbewussten Informationssystemen („process-aware information systems")[28] die effektive und effiziente Planung, Steuerung und Kontrolle der Unternehmenstätigkeiten ermöglicht. Prozessorientierung ist die Grundvoraussetzung für eine im Kontext der Industrie-4.0-Vision geforderten horizontalen Integration eines produzierenden Unternehmens oder Netzwerks. Die Abstraktion von konkreten Ressourcen (z.B. Mitarbeiter, Maschinen, Fabriken, Unternehmen) hin zu Prozessen und Diensten, die einen definierten Input und Output haben, ermöglicht theoretisch unendlich skalierbare Produktionssysteme. Diese Produktionssysteme sind nicht notwendigerweise mehr an eine – im klassischen Sinne – unternehmerische Struktur gebunden, sondern orientieren sich einzig und allein am Kundenbedürfnis (z.B. einem Produkt oder Dienst) und formieren sich ad-hoc als Netzwerk von Prozessen, die dieses Bedürfnis erfüllen können, ungeachtet aufbauorganisatorischer Grenzen. Die Prozessorientierung trägt also idealerweise zu einer maximalen Flexibilisierung und Skalierung der Wertschöpfungskette bei. Die vielfach geforderte Adaptivität als Eigenschaft eines intelligenten Systems kann somit zumindest theoretisch erfüllt werden.

Systemintegration

Das Zusammenspiel der Produktionsplanung mit der Steuerung und den tatsächlich wertschöpfenden Tätigkeiten ist eine ebenfalls nicht neue Voraussetzung für effizientes Produktionsmanagement. Die im Kontext von Industrie 4.0 geforderte vertikale Integration eines Produktionssystems muss dabei sowohl auf organisatorischer Ebene als auch auf technischer Ebene erfolgen. Auf organisatorischer Ebene ist der Ansatz der Prozessorientierung eine Voraussetzung (siehe oben). Auf der technischen Ebene eröffnen sich heute durch die zunehmende Verschmelzung von Technologien aus der Internetwelt mit der physischen Welt („Digitalisierung") neue Möglichkeiten, obwohl die

27 Vgl. Simon et al. 2014, S. 16.

28 Dumas et al. 2005, S. 5.

grundlegenden Technologien und theoretischen Grundlagen bereits seit längerem bekannt sind.

Die Virtualisierung und Serviceorientierung von Softwaresystemen ist heute, dank einer zunehmenden Standardisierung und Öffnung von Schnittstellen, auch im Bereich der Produktionsmaschinen möglich. Dies ermöglicht einerseits den ungehinderten, echtzeitbasierten Datenaustausch zwischen den verschiedenen Planungs- und Steuerungsebenen eines Produktionssystems, andererseits ermöglicht dies die Unabhängigkeit eines Systems von konkreten physischen Realisierungen eines Produktionsmittels. Damit erhält die horizontale Flexibilität in Bezug auf die konkrete Gestaltung eines Produktionssystems noch eine vertikale Dimension.

Entstehende wissensbasierte Systeme

Produktionssysteme der Zukunft sind sowohl horizontal als auch vertikal – wenn auch nur temporär – eng miteinander verknüpft. Dies ermöglicht idealerweise einen ungehinderten und standardisierten Datenaustausch zwischen diversen Systemen. Ein intelligentes und damit lern- sowie entscheidungsfähiges Produktionssystem benötigt zum einen jene Daten, die im Zuge der Produktion anfallen, und darüber hinaus auch Daten, die über die Zustände von Produktionsmitteln Auskunft geben. Damit besteht die Möglichkeit, auch retrospektiv aus vergangenen Produktionsprozessen zu lernen und im Zusammenhang mit neuen Randbedingungen (z.B. andere logistische Ziele) optimale Entscheidungen zu treffen. Traditionelle „vergessende" Produktionssysteme werden so zu wissensbasierten Systemen, die wertvolles produktionsrelevantes Wissen speichern und wiederverwenden können.

Ein zentrales Element in wissensbasierten Produktionssystemen sind sogenannte Ontologien, also formalisiertes und daher maschinenlesbares Wissen über eine Domäne. Die Diversität und Volatilität von Produktionssystemen macht die a-priori-Formalisierung von Wissen zu keiner einfachen Aufgabe, gibt es neben dem allgemeinen Wissen über Produktion doch auch unzählige branchenspezifische Besonderheiten. Aktuelle Forschungsvorhaben im Kontext von Industrie 4.0 adressieren dieses Thema bereits, siehe zum Beispiel die Deutsche Normungs-Roadmap Industrie 4.0.[29]

---

29 Vgl. DIN/DKE 2015.

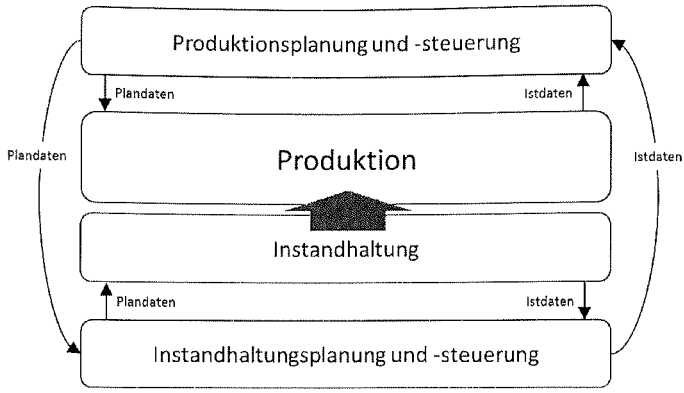

Abbildung 5: Operative Unternehmensprozesse sowie deren Datenverknüpfung

In Abbildung 5 ist eine schematische Darstellung der elementaren operativen Prozessbereiche eines Industrieunternehmens zu sehen. Die Intelligentisierung eines Produktionssystems erfordert jedenfalls die konsequente und konsistente horizontale und vertikale Integration dieser Bereiche. Diese Integration wird durch die Generierung und Sammlung von Daten ermöglicht, kann jedoch erst durch die intelligente Nutzung („Smart Data") dieser Daten zu einem wissensbasierten und damit smarten Produktionssystem aufsteigen.

Intelligentisierung auf Shop Floor-Ebene

Die Intelligentisierung und damit Flexibilisierung der untersten Ebene in der Unternehmenspyramide, der Shop Floor-Ebene, erfolgt durch das Erreichen eines höheren Industrie-4.0-Reifegrades vornehmlich in den Dimensionen „Operations" und „Technology" des vorgestellten Reifegrademodells. Auf der Shop Floor-Ebene findet die Wertschöpfung des produzierenden Unternehmens statt – das umfasst also beispielsweise die Prozesse der Fertigung, der Montage und der Logistik. Derzeit entstehen Produktionssysteme, die sich einerseits durch den durchgängigen und integrativen Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien zu Steuerungszwecken auszeichnen. Andererseits verfolgen sie die gezielte Auswahl bzw. Gestaltung von Betriebsmitteln sowie

die Nutzung menschlicher Fähigkeiten als sogenannte cyber-physische Produktionssysteme (CPPS).[30] Intelligente, d.h. vernetzbare, kommunikationsfähige, jedenfalls reaktionsfähige Infrastrukturelemente sowie der Erhalt der Flexibilitätskomponente Mensch sind auf dieser Ebene die wesentlichen Enabler zur Umsetzung intelligenter Produktionssysteme. Die folgenden zwei Beispiele sollen zeigen, dass es trotz der futuristischen Vorstellung einer vollautonomen und echtzeitfähigen Selbststeuerung und -optimierung aller Fertigungsprozesse bereits heute durchaus Möglichkeiten gibt, den Flexibilitätskorridor durch den Einsatz digitaler Werkzeuge und intelligenter Automatisierung sowie durch das Zusammenspiel von Mensch und Technologie zu erweitern.

Beispiel: Mensch-Roboter-Interaktion

Klassische Automatisierungslösungen in Arbeits- und Logistiksystemen zeigen im Normalfall eine geringe Flexibilität, da die Infrastrukturkomponenten häufig starr verkettet sind und einen hohen Implementierungsaufwand hervorrufen. Somit muss zwischen Automatisierung und Flexibilität entschieden werden, zu Lasten eines dieser Aspekte.[31] Auch verhinderten Sicherheitsvorkehrungen lange die unmittelbare Interaktion von Menschen und Maschinen während des Betriebs. Neuartige Roboter sind jedoch in der Lage, durch sensorische Fähigkeiten Menschen in ihrem Umfeld zu erkennen und bei drohenden Kollisionen ihre Bewegungen unmittelbar einzustellen. Außerdem erlauben sie durch eine intuitive, pragmatische Programmier- und Bedienbarkeit eine deutlich höhere Anpassung an veränderliche Produktionsprozesse. So können die Stärken der Roboter, wie hohe Wiederholgenauigkeit und Ermüdungsfreiheit, mit den Stärken des Menschen, wie feinste Kraftdosierung und komplexe Auge-Hand-Koordination, in einer unmittelbaren Mensch-Maschine-Interaktion kombiniert werden. Als Resultat werden Roboter zunehmend in Produktionsbereichen eingesetzt, in denen bislang vornehmlich manuelle Arbeit verrichtet wurde.

Beispiel: Visuelle Assistenzsysteme

Neben der physischen Unterstützung durch kraft- und leistungsreduzierte Roboter können Montagemitarbeiter bei der Durchführung manueller Arbeitsschritte auch visuell

30 Vgl. Deuse et al. 2015, S. 104.

31 Vgl. Miebach/Mülller 2006, S. 22.

unterstützt werden. Elektronische visuelle Assistenzsysteme stellen sicher, dass der Mitarbeiter alle notwendigen Informationen zur korrekten und schnellen Ausführung seiner Arbeit zum richtigen Zeitpunkt bereitgestellt bekommt. Im Einzelnen muss der Mitarbeiter wissen, welchen Zielzustand sein Werkstück hat, welche Schritte und Prozesse in welcher Reihenfolge von ihm durchzuführen sind, welche Teile und Komponenten hierzu verwendet und welche Werkzeuge und Hilfsmittel zum Einsatz gebracht werden müssen. Während diese Informationen für die klassische Großserienfertigung trivial erscheinen, erschließen sie sich in der variantenreichen Produktion längst nicht mehr von selbst. Vereinfacht wird die Verbreitung visueller Assistenzsysteme durch den Einsatz mobiler Endgeräte wie Tablet-Computer und Datenbrillen, die Informationen dezentral, direkt am Arbeitsplatz verfügbar machen. Sind alle Produktvarianten als Modell virtuell und die Kundenbestellung digital vorhanden, kann der Mitarbeiter über das Assistenzsystem alle für ihn relevanten Daten an seinem Arbeitsplatz abrufen, auf Wunsch dreidimensional visualisieren und auch Produktionsrückmeldungen zurückspielen, wodurch der Herstellungsprozess jedes Einzelstücks in Echtzeit rückverfolgbar wird. Durch die Verwendung von Konstruktionsdaten für die visuelle Mitarbeiterunterweisung wird auch dem Gedanken des durchgängig virtuellen Engineerings Rechnung getragen: Verändert die Konstruktion das Produkt, wird diese Änderung auch auf dem Shop Floor unmittelbar ersichtlich.

Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieses Beitrags war die Überführung des bekannten Konzepts der flexiblen Fabrik in jenes der intelligenten Fabrik. Die reine Flexibilität der Produktion wird den futuristischen Konzepten des Smart Manufacturings, also der intelligenten Produktion, nicht mehr gerecht. Um dieses Dilemma aufzulösen, wird die Flexibilisierung der Fabrik zum integralen Bestandteil der Intelligentisierung. Die bekannten und gelebten Flexiblitätsansätze müssen dadurch nicht aufgegeben werden, sondern bleiben integriert bestehen und erweitern sich um neuartige Ansätze bis hin zum Smart Manufacturing. Sollte die „Flexibilität in der Produktion“ weiterhin isoliert betrachtet werden, kann sich diese der Neuausrichtung der industriellen Produktion trotzdem nicht entziehen. Alleine der Übergang zu Echtzeitprozessen oder der angestrebten Losgröße 1 (zwei Kerngedanken der Industrie 4.0) erfordern grundlegende Änderungen der zeitlichen und kapazitiven Flexibilität eines Unternehmens. Somit ergeben sich sowohl bei isolierter als auch bei

integrierter Betrachtung des Flexibilitätsbegriffs neue Anforderungen, die jedoch unserer Meinung nach am besten durch eine gesamtheitliche Intelligentisierung der Fabrik erfüllt werden können.

In naher Zukunft ist zu erwarten, dass vor allem der Echtzeit-Aspekt der industriellen Produktion weiter an Bedeutung gewinnen wird. In Echtzeit zu agieren bedeutet demnach, weder proaktiv große Planungsaufwände zu betreiben noch zeitverzögert auf Veränderungen zu reagieren. In Echtzeit zu agieren bedeutet schlicht, die erzeugten Informationen (z.B. einen Kundenwunsch oder Rohstoffpreisänderungen) ohne Zeitverlust auf die internen Prozesse „durchzuschalten". Möglich wird dies einzig durch datengestützte Prozesse, die autonom und dezentral entscheiden können, um somit synchron zur eingehenden Information zu laufen. Der unternehmerische Grundgedanke, dass die am schnellsten reagierenden (also die flexibelsten) Unternehmen überleben, geht dabei nicht verloren, sondern verstärkt sich sogar noch. Unternehmen ist daher geraten, sich passende Enabler der Industrie 4.0 zu erschließen, um die eigenen Prozesse fit zu machen für die Entwicklungen, die bereits seit längerem vor sich gehen, aber bisher großteils noch erfolgreich ignoriert werden.

Literatur

Bauernhansl, Th.; Ten Hompel M.; Vogel-Heuser B. (2014): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden 2014.

Bundesministerium für Bildung und Forschung – BMBF (2014): Die neue Hightech-Strategie – Innovationen für Deutschland. https://www.bmbf.de/pub_hts/HTS_Broschure_Web.pdf (abgerufen am 21.7.2016)

Boston Consulting Group (2016): The BCG Global Manufacturing Cost Competitiveness Index. https://www.bcgperspectives.com/content/interactive/lean_manufacturing_globalization_bcg_global_manufacturing_cost_competitiveness_index/ (abgerufen am 21.7.2016)

Brettel, M.; Friederichsen, N.; Keller, M.; Rosenberg M. (2014): How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective. In: International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering. 2014, Heft 1, pp. 37-44.

Constantinescu, C. L.; Francalanza, E.; Matarazzo, D.; Balkan, O. (2014): Information Support and Interactive Planning in the Digital Factory: Approach and Industry-Driven Evaluation. In: Procedia CIRP. 2014, Band 25, pp. 269-275.

Deloitte (2016): Worin sollten Einzelhändler investieren, um das Einkaufserlebnis angenehmer zu machen? http://de.statista.com/statistik/daten/studie/207152/umfrage/von-verbrauchern-gewuenschte-investitionen-von-einzelhaendlern/ (abgerufen am 3.8.2016)

Deuse, J.; Weisner, K.; Hengstebeck, A.; Busch A. (2015): Gestaltung von Produktionssystemen im Kontext von Industrie 4.0. In: Botthof, A.; Hartmann, E. A. (Hrsg.): Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0. Heidelberg 2015, S. 99-111.

Deutscher Industrie- und Handelskammertag – DIHK (2016): Mit welchen Folgen der demografischen Entwicklung rechnen Sie für Ihr Unternehmen hauptsächlich? http://de.statista.com/statistik/daten/studie/169488/ umfrage/demografischer-wandel---folgen-fuer-unternehmen/ (abgerufen am 3.8.2016)

Deutscher Industrie- und Handelskammertag – DIHK (2016): Atempause in China – Europa füllt die Lücke, Auslandsinvestitionen in der Industrie. http://de.statista.com/statistik/daten/studie/169488/umfrage/ demografischer-wandel---folgen-fuer-unternehmen/ (abgerufen am 3.8.2016)

DIN/DKE (2015): Deutsche Normungs-Roadmap Industrie 4.0 – Version 2. http://www.din.de/blob/95954/42935f7a165f16e341967b8a9f91c026/aktualisierte-roadmap-i40-data.pdf (abgerufen am 22.12.2016)

Dumas, M.; van der Aalst, W.; ter Hofstede, A. (2005): Process-Aware Information Systems: Bridging People and Software through Process Technology. Hoboken 2005.

ElMaraghy, H.; ElMaraghy. W. (2016): Smart Adaptable Assembly Systems. In: Procedia CIRP. 2016, Band 44, pp. 4-13.

Eurostat (2017): Europäische Union & Euro-Zone: Export von Gütern von 2006 bis 2016 (in Milliarden Euro). https://de.statista.com/statistik/daten/studie/15724/umfrage/export-von-guetern-aus-der-eu/

Erol, S.; Schumacher, A.; Sihn, W. (2016): Auf dem Weg zur Industrie 4.0 – ein dreistufiges Vorgehensmodell. In: Biedermann, H. (Hrsg.): Industrial Engineering und Management. Wiesbaden 2016, S. 247-266.

Frieling, E.; Kauffeld, S.; Grote, S.; Bernard H. (2000): Flexibilität und Kompetenz: Schaffen flexible Unternehmen kompetente und flexible Mitarbeiter? Münster 2000.

Hentz, J. B.; Nguyen, V. K.; Maeder, W.; Panarese, D.; Gunnink, J. W.; Gontarz, A.; Stavropoulos, P.; Hamilton, K.; Hascoët. J. Y. (2013): An Enabling Digital Foundation Towards Smart Machining. In: Procedia CIRP. 2013, Band 12, S. 240-245.

Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J. (2013): Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern. Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 – Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Frankfurt/Main 2013.

Kaluza, B.; Blecker, Th. (2005): Flexibilität – State of the Art und Entwicklungstrends. In: Kaluza, B.; Blecker, Th. (Hrsg.): Erfolgsfaktor Flexibilität – Strategien und Konzepte für wandlungsfähige Unternehmen. Berlin 2005, S. 1-25.

Lund, R.; Gjerding, A. N. (1996): The Flexible Company. Innovation, Work Organisation and Human Resource Management. Danish Research Unit for Industrial Dynamics (DRUID), Working Paper No. 96-17.

Miebach, J.; Müller, P. P. (2006): Intralogistik als wichtigstes Glied von umfassenden Lieferketten. In: Arnold, D. (Hrsg.): Intralogistik – Potentiale, Perspektiven, Prognosen. Heidelberg 2006, S. 20-30.

Myers, D. G. (2008): Psychology. 9. Auflage, New York 2008.

Nilsson, N. J. (1998): Artificial Intelligence: A New Synthesis. 5. Auflage, San Francisco 1998.

Ōno, T.; Hof, W. (2009): Das Toyota-Produktionssystem – das Standardwerk zur Lean Production. 2. Auflage, Frankfurt/Main 2009.

Porter, M. E. (1985): Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance. New York; London 1985.

Russell, S. J.; Norvig, P.; Davis, E. (2010): Artificial Intelligence: A Modern Approach. 3. Auflage, Upper Saddle River 2010.

Schenk, M.; Wirth, S. (2004): Fabrikplanung und Fabrikbetrieb – Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik. Berlin 2004.

Schumacher, A.; Erol, S.; Sihn, W. (2016): A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. In: Procedia CIRP. 2016, Band 52, pp. 161-166.

Simon, D.; Fischbach, K.; Schoder, D. (2014): Enterprise Architecture Management and its Role in Corporate Strategic Management. In: Information Systems and E-Business Management. 2014, Heft 1, pp. 5-42.

VGB PowerTech (2008): Im Jahr 2008 prognostizierte statische Reichweite von Ressourcen (in Jahren). http://de.statista.com/statistik/daten/studie/152334/umfrage/statische-reichweite-von-ressourcen/ (abgerufen am 3.8.2016)

World Intellectual Property Organization – WIPO (2015): Global Patent Filings Rise in 2014 for Fifth Straight Year. China Driving Growth. http://www.wipo.int/pressroom/en/articles/2015/article_0016.html (abgerufen am 24.6.2016)

Zhou, J. (2013): Digitalization and Intelligentization of Manufacturing Industry. In: Advances in Manufacturing. 2013, Heft 1, pp. 1-7.

Autorenangaben

Dipl.-Ing. Andreas Schumacher, Technische Universität Wien – Fachbereich für Betriebstechnik und Systemplanung sowie Fraunhofer Austria Research GmbH; andreas.schumacher@fraunhofer.at

Fabian Ranz, MSc; Technische Universität Wien – Fachbereich für Betriebstechnik und Systemplanung sowie Fraunhofer Austria Research GmbH; fabian.ranz@fraunhofer.at

Dr. Selim Erol; Technische Universität Wien – Fachbereich für Betriebstechnik und Systemplanung; selim.erol@tuwien.ac.at

Univ.-Prof. Dr. Wilfried Sihn; Technische Universität Wien – Fachbereich für Betriebstechnik und Systemplanung sowie Fraunhofer Austria Research GmbH; wilfried.sihn@fraunhofer.at