

Bachelorthesis

Vor- und Zuname: [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED]

Lennart Lenzing [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED]

Titel:

**„Adaptives Auftragsmanagement bei cyber-physischen Systemen
als Grundlage einer digitalen Produktion“**

Abgabedatum:

19.03.2018

Betreuender Professor: Herr Prof. Dr. Axel Wagenitz

Zweiter Prüfer: Herr Prof. Dr. Stefan Boll

Studiengang:

Außenwirtschaft/ Internationales Management

Abstract

Industrie 4.0 als Sammelbegriff für die Digitalisierung aller Bereiche der wirtschaftlichen Wertschöpfung ist in der wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Diskussion um die Zukunft des Industriestandorts Deutschland im vollen Gange. Oft wirkt dieser Begriff jedoch mehr als eine Art Phrase ohne konkreten Inhalt. Daher soll in der vorliegenden Thesis erläutert werden, welche Voraussetzungen es bedarf um die Produktion der Zukunft zu gestalten. Hierzu sollen neben technischen Voraussetzungen auch der Beitrag von Cyber-Physischen Systemen erörtert und bewertet werden. Zentraler Betrachtungspunkt soll hierbei das adaptive Auftragsmanagement sein. Mittels adaptivem Auftragsmanagement werden die Betriebsmittel, Logistiksysteme und Produkte in die Lage versetzt auf Umwelteinflüsse zu reagieren. Ferner sollen die Grundvoraussetzungen näher beleuchtet werden, die diese Form des Auftragsmanagements ermöglichen. Im letzten Teil der Thesis soll dann anhand eines fiktiven Beispiels das Potential einer digitalen Produktion beleuchtet werden. Dieses Beispiel soll die vorgestellten Technologien und ihr Zusammenwirken veranschaulichen. Durch die verwendete Technologie kann ein adaptives Auftragsmanagement zu einer effizienteren digitalen Produktion beitragen und die Vision der „Smart Factory“ voranbringen.

Keywords: Cyber-Physische Systeme; Adaptives Auftragsmanagement; Smart Factory; Industrie 4.0; Referenzarchitektur; Digitale Produktion

INHALTSVERZEICHNIS

Abstract	2
Abbildungsverzeichnis	5
1. Einleitung	6
1.1 Thematischer Hintergrund.....	6
1.2 Thematische Einordnung und Eingrenzung.....	7
1.3 Begriffliche Definitionen	8
1.3.1 Cyber-Physische Systeme (CPS).....	8
1.3.2 Cyber-Physische Produktionssysteme.....	9
1.3.3 Cyber-Physische Produkte.....	10
1.3.4 Cyber-Physische (Intra-) Logistiksysteme.....	13
2. Cyber-Physische Produktion	15
2.1 Konzeption adaptiver Systeme	15
2.1.1 Infrastrukturanforderungen	18
2.1.2 Referenzarchitekturen	18
2.1.3 Speichersysteme	20
2.1.4 Relevante Daten.....	21
2.1.5 Datensicherheit.....	22
2.2 Plug and Produce	24
2.3 Dezentrales Auftragsmanagement	26
3. Produktionsprozess Konzeption	29
3.1 Fabriklayout.....	30
3.2 Musterprozess CPP.....	33
3.3 Musterprozess CPLS.....	34
3.4 Musterprozess CPPS	36
4. Fazit.....	37

4.1 Zusammenfassung	37
4.2 Kritische Würdigung	38
4.3 Ausblick	39
Literaturverzeichnis	40
5. Eigenständigkeitserklärung	43

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1 KLASSEN INTELLIGNETER PRODUKTE (NACH REINHART ET AL. 2013; ZÜHLKE ET AL. 2017).....	12
ABBILDUNG 2 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG VON CYBER-PHYSISCHEN SYSTEMEN (QUELLE: EIGENE GRAFIK)	15
ABBILDUNG 3 AUTOMATISIERUNG IM WANDEL (QUELLE: VDI).....	17
ABBILDUNG 4 REFERENCE ARCHITECTURE MODEL INDUSTRIE 4.0 (RAMI 4.0) (QUELLE: PLATTFORM INDUSTRIE 4.0).....	19
ABBILDUNG 5 SCHEMA "AUFTRAGS CPS" (QUELLE: NACH KONTNY ET. AL. (2017))	26
ABBILDUNG 6 FABRIKLAYOUT (QUELLE: EIGENE GRAFIK)	31
ABBILDUNG 7 MUSTERPROZESS CPP (QUELLE: EIGENE GRAFIK).....	33
ABBILDUNG 8 MUSTERPROZESS CPLS (QUELLE: EIGENE GRAFIK)	34
ABBILDUNG 9 MUSTERPROZESS CPPS (QUELLE: EIGENE GRAFIK).....	36

1. Einleitung

1.1 Thematischer Hintergrund

Der Begriff der „Industrie 4.0“, der die vierte industrielle Revolution beschreibt und im speziellen die Nutzung von Informationstechnologie (IT) in allen Bereichen der wirtschaftlichen Wertschöpfungskette und darüber hinaus, hat seit seiner Einführung im Jahr 2011 durch die Plattform „Industrie 4.0“ auf der Hannover Messe in der öffentlichen Diskussion wenig von seinem abstrakten Charakter verloren (vgl. Böttcher et al., 2016, S. 3). Die wissenschaftliche Diskussion hingegen dreht sich um konkrete Lösungsansätze, wie zukünftig eine digitalisierte Wirtschaft zwischen und innerhalb von Unternehmen organisiert werden könnte. Dabei ist der Begriff „Industrie 4.0“, in der wissenschaftlichen Diskussion nicht ganz unumstritten. Beispielsweise gibt es verschiedene Ansichten zur Zählweise bzw. was als „Revolution“ anzusehen ist. Auch wenn davon ausgegangen wird, dass seit den 1970er Jahren die Phase der dritten industriellen Revolution eingeläutet wurde ist fraglich ob die derzeitige Entwicklung eine neue Revolution ist. Es gibt auch Stimmen, die die aktuellen Entwicklungen als eine Evolution sehen, da sie „[...] nicht mehr eine ganz neue Technologie identifiziert, sondern nur noch die Weiterentwicklung innerhalb der Datenverarbeitungs- und Kommunikationstechnik [...]“ (Ahrens 2012, S. 30) ist. Unabhängig von der Frage ob es sich nun um eine Evolution oder Revolution handelt hat sich eine Vielzahl von Begriffen, die die digitale Entwicklung in allen Unternehmensbereichen beschreibt. Ein häufig verwendeter Begriff ist „Internet der Dinge“ („Internet of Things“ „IOT“) bzw. im wirtschaftlichen Kontext vom „industriellen Internet der Dinge“ („Industrial Internet of Things „IIOT“) oder auch „Ubiquitous Computing“ (vgl. Ahrens 2012, S. 31), der den allumfassenden und disruptiven Charakter der neuen Technologie beschreibt. Daher werden in diversen Forschungsprojekten zwischen Industrie und Wissenschaft und in Kooperationen zwischen Branchenverbänden und Wissenschaft konkrete Lösungsansätze für die bevorstehenden Herausforderungen entwickelt. Diese Entwicklung dient dem Zweck die Lösungen für alle Wirtschaftsbereiche nutzbar zu machen. Im Fokus dieser Forschungsprojekte stehen oftmals Lösungen für den „Mittelstand“, der für die deutsche Wirtschaft von zentraler Bedeutung ist und nicht zwangsläufig über die Ressourcen und das Know-how verfügt um eigenständige

Lösungen zu entwickeln. Dabei reichen die Initiativen der Branchenverbände Bitkom, VDMA und Zvei (und anderer Forschungsprojekte) von der Entwicklung von Referenzarchitekturen bis hin zu konkreten Modellanlagen. Cyber-Physische Systeme nehmen hierbei eine zentrale Rolle ein, da durch diese Systeme die Verbindung zwischen Objekten der realen Welt und der virtuellen Welt geschaffen werden. Gerade der Bereich der Produktion und den damit verbundenen Arbeitsgängen werden derzeit Lösungen entwickelt um die Digitalisierung voranzutreiben, mit dem Ziel hochgradig individualisierte Produkte mit „Losgröße 1“ zu fertigen ohne die Vorzüge der Massenfertigung aufzugeben (vgl. Winkler 2010, S. 26ff.).

1.2 Thematische Einordnung und Eingrenzung

In der vorliegenden Bachelor Thesis soll der Frage nachgegangen werden, wie das Auftragsmanagement in der cyber-physischen Produktion funktionieren kann und welche grundlegenden Herausforderungen damit einhergehen. Mit Auftragsmanagement ist in diesem Falle nicht nur die Bearbeitung eines Kundenauftrags gemeint, sondern auch die damit verbundenen Fertigungsaufträge, sowie Produktionsplanung und -steuerung und die dazugehörige Intralogistik während des Herstellungsprozesses. Zentraler Aspekt des Auftragsmanagements ist jedoch im Vergleich zu einer „konventionellen“ Fertigung, dass diese „adaptiv“ ist und sich den Umweltbedingungen innerhalb der Fertigung anpassen kann. Neben dem auf Literaturrecherche basierenden theoretischen Teil der Arbeit, soll im zweiten Teil der Arbeit eine fiktive Musterfertigung von Fahrrädern auf Basis der zuvor beschriebenen technischen Lösungen entwickelt werden um die mögliche Gestaltung einer digitalen Produktion zu veranschaulichen. Hierbei wird eine „Greenfield“ Strategie gewählt, beziehungsweise die Planung auf der „grünen Wiese“ um zum einen die Problematik von „konventionellen“ Systemen und deren Integration in die digitale Fertigung zu vermeiden und zum anderen um das Potential einer solchen digitalen Fertigung aufzuzeigen. Auch wenn diese Annahme an den tatsächlichen Gegebenheiten von bereits bestehenden Produktionsstätten eine nicht zu vernachlässigende zusätzliche Herausforderung, sowohl an die Unternehmen als auch die digitale Infrastruktur darstellt. Eine genauere Betrachtung dieser Herausforderungen würde jedoch den Rahmen dieser Arbeit übersteigen und soll daher nicht Teil der Betrachtung sein.

1.3 Begriffliche Definitionen

Im Zusammenhang mit digitaler Produktion werden häufig Begriffe verwendet, die auf den ersten Blick synonym erscheinen. Ein cyber-physisches System (CPS) und ein cyber-physisches Produktionssystem (CPPS) sind nur vordergründig synonym zu verwendende Begriffe. Um die Unterschiede zwischen diesem Begriffspaar und einigen weiteren Begriffen die im Rahmen diese Arbeit häufig verwendet werden sollen diese Begriffe zunächst voneinander abgegrenzt werden, um eine möglichst eindeutige Bezeichnung und Verwendung sicherzustellen.

1.3.1 Cyber-Physische Systeme (CPS)

„Cyber-Physical Systems (CPS) sind gekennzeichnet durch eine Verknüpfung von realen (physischen) Objekten und Prozessen mit informationsverarbeitenden (virtuellen) Objekten und Prozessen über offene, teilweise globale und jederzeit miteinander verbundene Informationsnetze.“ Somit unterscheiden sich CPS von anderen automatisierten Systemen durch ihre Anbindung an das Internet (Bettenhausen und Kowalewski 2013, S. 2). Diese Entwicklung kann als logische Weiterentwicklung der Entwicklungen im Bereich der Mikroprozessortechnik, Informationstechnik und Informatik gesehen werden die eine vielseitige Anwendung in verschiedensten Systemen beispielsweise in Form von Steuereinheiten ermöglichen (vgl. Manzei et al. 2017, S. 25). Dieser Logik folgend können reale Objekte in einer virtuellen Umgebung „selbstorganisiert navigieren wie ein Datenpaket“ (Ahrens 2012, S. 30). Neben den bereits angeführten Eigenschaften von CPS können die Anforderungen an ein solches System noch etwas genauer beschrieben werden. Um zwischen virtueller und realer Welt interagieren zu können benötigen CPS neben entsprechender Sensorik und Aktorik auch eine Möglichkeit zur Datenverarbeitung verfügen, sowie eine Netzwerkanbindung. Dies dient dem Zweck Umwelteinflüsse zu erkennen und entsprechend auf diese zu reagieren, sowie sich an diese anzupassen. Ein weiteres Merkmal von CPS ist die Fähigkeit, sowohl mit Menschen, als auch mit anderen CPS zu interagieren. Die Interaktionsform zwischen Mensch und CPS kann hierbei, je nach CPS, jede geeignete Form annehmen. So können von Bildschirmmeldungen bis hin zur Sprachinteraktion zur Anwendung kommen. Ein weiteres Merkmal von CPS ist, dass dieses ein aus verschiedenen Untersystemen bestehendes Gesamtsystem (system of systems) bildet. Das Zusammenwirken der verschiedenen Untersysteme innerhalb des CPS

wird in der Literatur oft mit dem Schlagwort „Smart Factory“ bezeichnet. Hierbei unterstützt die intelligente Technik den Menschen, zum einen durch Bereitstellung der nötigen Materialien und Anpassung an die Gegebenheiten, zum anderen auch durch den effizienten Einsatz von Ressourcen und der Bereitstellung von Daten für die Organisation (Bauernhansl et al. 2014, S. 16; vgl. Kagermann et al. 2013, S. 19). Die Untersysteme können hierbei unabhängig von einander interagieren (vgl. Manzei et al. 2017, 26 ff.). Eine Herausforderung die alle CPS mit sich bringen ist die hohe Komplexität an technischer Infrastruktur, sowie den Modellen die ihre Funktionen beschreiben (Kagermann et al. 2013, 17 ff.). Cyber- Physische Systeme können also als ein Sammelbegriff für alle spezialisierten CPS verstanden werden. Jedoch ist der Begriff von CPS in der Literatur nicht ganz unumstritten, da sich im Laufe der Zeit eine Vielzahl von Begriffen etabliert haben. Während einige Quellen zwischen CPS und Internet der Dinge unterscheiden. So wird von Volker Ahrens angemerkt, dass sich der Begriff „Industrie 4.0“ in eine Vielzahl von Begriffen einordnet, die „ebenfalls den immer gleichen Sachverhalt beschreiben“ und beschreibt hierbei „Internet der Dinge“ und „Cyber-Physical Systems“ als analoge Begriffe zu Industrie 4.0 (Ahrens 2012, S. 31). Die Vernetzung von Sensorik und Aktoren als Differenzierungsmerkmal zwischen CPS und IOT und als gemeinschaftliches Merkmal von CPS, macht deutlich wie schwierig eine genaue Trennung der Begrifflichkeiten ist (Manzei et al. 2017, S. 26; Vogel-Heuser et al. 2017c, S. 3). Eine genaue Definition des Begriffs CPS scheint auf Grund der in der Literatur vertretenen gegensätzlichen Meinungen nicht möglich. Daher muss für die weitere Verwendung des Begriffs CPS eine Unschärfe in Kauf genommen werden. Für die vorliegende Arbeit sollten die bereits beschriebenen Anforderungen an ein CPS gelten bzw. der Begriff CPS als Oberbegriff für die im folgenden beschriebenen Systeme gelten.

1.3.2 Cyber-Physische Produktionssysteme

Cyber-physische Produktionssysteme (CPPS) stellen für diese Arbeit die wichtigste CPS Untergruppe dar. CPPS sind eines der zentralen Themen des CyProS Forschungsprojektes¹, welches in Zusammenarbeit mit dem Bundesministerium für

¹ <http://www.projekt-cypros.de/>

Bildung und Forschung, dem Karlsruher Institut für Technologie und Unternehmen an Umsetzungsstrategien für eine Vernetzung intelligenter Systeme in der Fabrik arbeitet. Verfolgt wird hierbei ein ganzheitlicher Ansatz der von der Bereitstellung einer Referenzarchitektur bis hin zur „Schaffung der technischen und methodischen Basis für den wirtschaftlichen Betrieb Cyber-Physischer Produktionssysteme und deren Umsetzung in realen Produktionsumgebungen in einer Schaufensterfabrik“ (Zühlke et al. 2017, 10 ff.). Demnach stellt die Fabrik das CPS dar (system of systems), welches aus diversen Untersystemen besteht. Dies können neben den CPPS auch intelligente Logistiksysteme und intelligente Produkte selbst sein. Neben der bereits erwähnten Vernetzung und der Interaktion mit der physischen Umwelt ist eines der Hauptmerkmale von CPPS die dezentrale und kontextadaptive Produktionssteuerung. Um dies zu gewährleisten müssen CPPS in der Lage sein unabhängig von Anderen Instanzen selbstständig Entscheidungsalternativen zu bewerten und eine entsprechende Entscheidung zu treffen (vgl. Zühlke et al. 2017, S. 12). Wie bereits bei der Definition von CPS selbst gehen auch bei CPPS die Meinungen in der Literatur auseinander über den Umfang des Begriffs. Wobei einige Autoren der Gruppe der CPPS neben den intelligenten Betriebsmitteln auch intelligente Produkte und unterstützende Systeme wie intelligente Intra-Logistiksysteme und intelligente Assistenzsysteme zuordnen (vgl. Zühlke et al. 2017, 10 ff.), können diese Systeme auch als eigenständige Untersysteme angesehen werden (vgl. Manzei et al. 2017, S. 28). Da die Untersysteme des CPS jedoch unterschiedliche Aufgaben erfüllen sollten diese auch als eigenständige Systeme mit unterschiedlichen Bezeichnungen begriffen werden. Die Anforderungen und Eigenschaften an die Untersysteme weisen Schnittmengen auf und können unter Umständen auch deckungsgleich sein, aber ihre Rollen im Übergeordneten System (CPS) unterscheiden sich voneinander. Im Weiteren soll daher unter dem Begriff Cyber-Physisches Produktionssystem ein intelligentes Betriebsmittel verstanden werden, welches dem Zweck der Fertigung eines ebenfalls intelligenten Werkstücks dient.

1.3.3 Cyber-Physische Produkte

Eine der Kernanforderungen an jede Art von Cyber-Physischen (Unter-)Systemen ist die selbstständige bzw. adaptive Interaktion mit der physischen und der virtuellen Welt, daher müssen auch die Ergebnisse des Fertigungsprozesses diese

Eigenschaften aufweisen. Um dies leisten zu können müssen Produkte bzw. deren Vorstufen und Halbfabrikate ebenfalls untereinander und mit anderen Systemen kommunizieren können, z.B. CPPS oder Intra-Logistiksystemen (vgl. Bettenhausen und Kowalewski 2013, S. 5). Um diesem Umstand Rechnung zu tragen und intelligente Produkte von konventionellen Produkten zu differenzieren, sowie der bereits etablierten Benennung zu folgen, sollen neben der Bezeichnung „intelligente Produkte“ im Folgenden auch als Cyber-Physische Produkte (CPP) bezeichnet werden. Aber am Beispiel der intelligenten Produkte zeigt sich sehr deutlich, warum eine konventionelle Fertigung und eine digitalisierte Fertigung sich grundlegend voneinander unterscheiden. Die digitale Produktion ermöglicht es, dass die intelligenten Produkte „eindeutig identifizierbar, jederzeit lokalisierbar“ sind und sie ihre „Historie, ihren aktuellen Zustand sowie alternative Wege zum Zielzustand“ kennen (Kagermann et al. 2013, S. 5). Diese Anforderung ist von hierarchisch organisierten Softwaregestützten Produktionsplanungssystemen in dieser Form nicht zu leisten, da diese nicht über die geeignete Sensorik und Aktorik verfügen um in einem Echtzeitkontext zu agieren. Durch die bereits erwähnte Fähigkeit zur Interaktion von CPP und ihrer Umwelt werden diese zu „intelligenten Produkten“. Hierbei müssen die Produkte so Soft- und Hardwareseitig so ausgestattet sein, dass sie in die Lage versetzt werden Informationen mitzuteilen, zu kommunizieren,

Entscheidungen zu treffen und die Zielerreichung zu gewährleisten (vgl. Zbib et al. 2008).

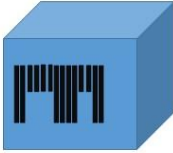
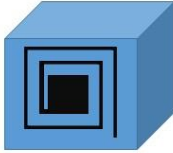
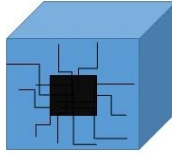
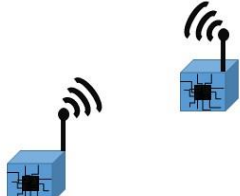
		Intelligente Produkte			
Klasse	1	2	3	4	
					
Merkmale	Identifikation	Identifikation	Identifikation	Identifikation	
	-	Speicherplatz	Speicherplatz	Speicherplatz	
	-	-	Datenverarbeitung	Datenverarbeitung	
	-	-	-	Interaktion/ Kommunikation	

Abbildung 1 Klassen Intelligenter Produkte (Nach Reinhart et al. 2013; Zühlke et al. 2017)

Allerdings unterscheiden sich intelligente Produkte hinsichtlich ihrer Intelligenz, die sich in vier Klassen unterteilen lassen (s. Abb 1) (vgl. Zühlke et al. 2017, S. 149; Zbib et al. 2008; Reinhart et al. 2013). Die Klassen werden hinsichtlich ihrer Fähigkeiten die vorgenannten Eigenschaften zu erfüllen. Wie in Abbildung 1 gezeigt, unterscheiden sich die Klassen anhand ihrer technischen Ausstattung. Die erste Klasse wird hierbei von Strichcode Systemen gebildet (hierzu zählen auch QR-Codes und Matrix- Codes). Diese Klasse erfüllt lediglich die das Kriterium der eindeutigen Identifikation und die Codes können nur gelesen werden und keine neuen Informationen speichern. RFID (Radio Frequency Identification) Transponder verfügen hingegen über Speicherplatz und können sowohl gelesen, als auch mit neuen Daten beschrieben werden. Beide Systeme erfüllen somit nicht die im Vorangegangenen abschnitt beschriebenen Eigenschaften von Cyber-Physischen Produkten, stellen aber dennoch gängige Technologien in der Produktion und Intra-Logistik dar. Die RFID Technologie ist zudem grundsätzlich für die Echtzeitdaten Bereitstellung geeignet (vgl. Zühlke et al. 2017, S. 155). Produkte der Klasse drei und vier verfügen jeweils über die Fähigkeit Daten zu verarbeiten, was es ihnen ermöglicht komplexe Umweltmodelle intern zu verwalten (vgl. Manzei et al. 2017, S. 27). Produkte der Klasse vier verfügen über dies über eine Anbindung an das

(globale) Informationsnetz und können mit ihrer Umwelt kommunizieren (vgl. Reinhart et al. 2013, S. 84ff.; vgl. Zühlke et al. 2017, S. 149ff.; Zbib et al. 2008). „Aufgrund wirtschaftlicher und physischer Aspekte ist es nicht immer sinnvoll bzw. möglich, ein Produkt selbst mit Intelligenz auszustatten, wie z.B. für Flüssigkeiten [...] oder für günstige und kleine Produkte [...]“ (Bauernhansl et al. 2014, S. 60). Für diesen Fall könnten die Verwendung von Systemen der Klassen eins und zwei auch weiterhin eine Lösung bieten, die dann an ein intelligentes Produkt der Klassen drei und vier „angehängt“ werden können (vgl. ebd.).

1.3.4 Cyber-Physische (Intra-) Logistiksysteme

Auch die Intra-Logistik trägt hierzu ihren Teil bei, da auch sie im Zuge der Digitalen Produktion „intelligent“ werden muss (dies gilt in letzter Konsequenz auch für die Extra-Logistik, dieses soll aber im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet werden). Auch für diese Systeme gelten die gleichen Anforderungen wie für alle vorgenannten CPS hinsichtlich technischer und sensorischer Ausstattung sowie die Autonomie der Module. Cyber-Physische Logistiksysteme (CPLS) und Assistenzsysteme steigern die Flexibilität der Produktion. Durch den Ansatz des modularen Aufbaus der Systeme sind diese kleiner und flexibler im Einsatz als feststehende Fördersysteme. Ein weiterer Vorteil von CPLS ist neben ihrer geringen Größe ihre Skalierbarkeit, denkbar sind hier Module in der Größenordnung eines Kleinladungsträgers (KLT) bis hin zu Flurförderzeugen. Dies ermöglicht eine größere Flotte von Intra-Logistik Systemen, bei der ein Ausfall eines einzelnen Moduls keinen negativen Einfluss auf die Gesamtproduktion hat (Bauernhansl et al. 2014, 19 ff.). Dies wird durch den Modularen Aufbau von CPLS, das Vorhandensein von redundanten Ressourcen und Routen ermöglicht. Konventionelle Systeme, die nicht über einen modularen Aufbau und Redundanzen verfügen können bei Ausfall die Produktion zum Erliegen bringen. Bedingt durch die Tatsache, dass CPLS in Unterstützungsfunktionen Anwendung finden, beispielsweise zum Beschicken von Werkern an ihren Arbeitsplätzen, müssen diese über geeignete Sensorik verfügen. Die Sensorik muss geeignet sein Menschen in der Produktion zu erkennen und deren Verhalten zu bewerten, um Gefahren zu vermeiden (Vogel-Heuser et al. 2017c, S.50f.). Hierbei beschränkt die Priorität der Personensicherheit die Autonomie des Systems, gemäß der Asimovschen Robotergesetze (vgl. ebd.) Des Weiteren ermöglicht die Sensorik aber auch neue Interaktionsmöglichkeiten zwischen Mensch und Maschine. In diesem Zusammenhang finden sich in der Literatur verschiedene Interaktionsformen, wie

Gestensteuerung oder Sprachsteuerung. Beispiele für die Mensch-Maschine Interaktion wurden bereits im Rahmen von Forschungsprojekten umgesetzt (s. Vogel-Heuser et al. 2017c, S. 45ff.). Neben den Flurförderzeugen und KLT Systemen können CPLS aber auch die Form von Fördersystemen wie Fließbändern oder Rollgittern annehmen. Hierbei werden mehrere modular aufgebaute Teilstücke zu einem Gesamtsystem zusammengeführt um Transportaufgaben über größere Strecken zu erfüllen. Sie folgen hierbei dem Grundsatz von Plug & Produce und konfigurieren sich selbst. Dies wird durch die Eigenschaft der Kommunikation zwischen den Modulen ermöglicht. Eine weitere Eigenschaft dieser Module ist die Fähigkeit die Topografie des Gesamtsystems zu erkennen und mit dem Transportgut (einem CPP) zu kommunizieren und dieses autonom an ihren Bestimmungsort zu befördern. auf dem kürzest möglichen Weg (vgl. Vogel-Heuser et al. 2017c, S. 3 ff.). Nur wenn die CPLS ein genaues Bild ihrer Umwelt haben, sind sie in der Lage die optimale Route für den Transport zu wählen. Hinzu kommt die Anforderung Kollisionen von Transportmitteln oder Transportgütern zu vermeiden, die durch Kreisschlüsse entstehen können und „Deadlock“ genannt werden. Dies stellt bei Stetigfördersystemen eine Herausforderung an die dezentrale Koordination dar (Vogel-Heuser et al. 2017c, S. 7ff.)

2. Cyber-Physische Produktion

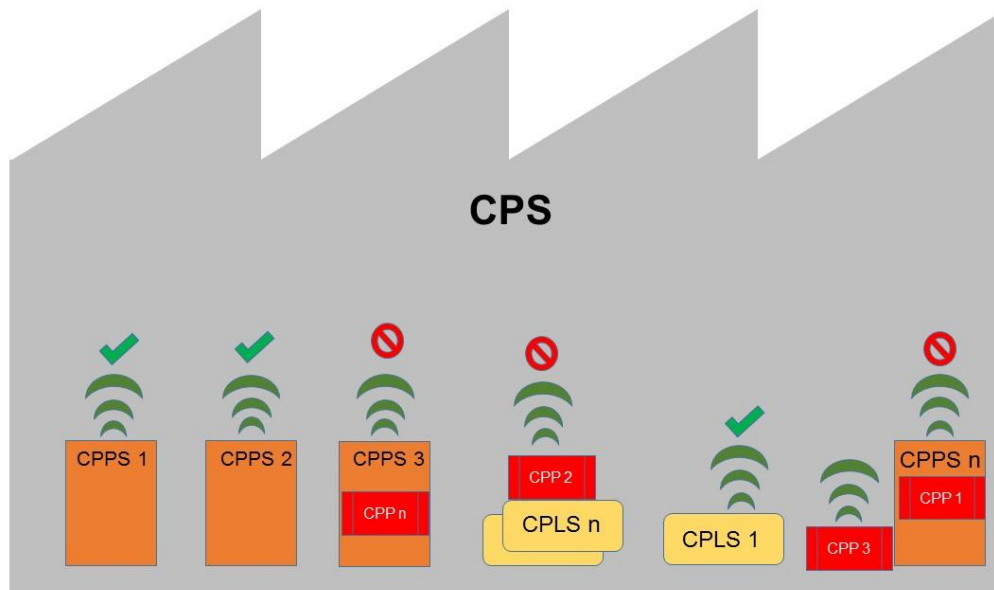


Abbildung 2 Schematische Darstellung von Cyber-Physischen Systemen (Quelle: Eigene Grafik)

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt angedeutet ist die Cyber-Physische Produktion ein komplexes Zusammenwirken verschiedener Untersysteme, die in der Lage sind weitestgehend autonom zu agieren und miteinander zu kommunizieren (s. Abb.2). Damit das CPS diese Aufgaben bewerkstelligen kann, sind erhebliche Veränderungen in der Organisation der Produktion auf unterschiedlichsten Ebenen notwendig. Neben den technischen Anforderungen an die physischen Maschinen ist die Bereitstellung eines geeigneten Modells, welches die Produktion und alle verbundenen Prozesse in einem ausreichend detaillierten Maße abbildet um einen reibungslosen Ablauf des Produktionsprozesses zu gewährleisten, notwendig. Neben diesen beiden Anforderungen ist auch die Bereitstellung einer geeigneten Infrastruktur, im Sinne einer ausreichenden Breitbandinternet Anbindung notwendig. Daher sollen im folgenden Abschnitt die Unterschiede zwischen einer konventionellen Fertigung und einer CPS basierten Fertigung beleuchtet werden und die systemseitige Umsetzung, sowie die technischen Voraussetzungen und deren Möglichkeiten näher beschrieben werden.

2.1 Konzeption adaptiver Systeme

Der Einsatz von IT-Systemen in der Produktion und weiteren Unternehmensbereichen ist bereits seit den 1980er Jahren unter Schlagworten wie Computer Integrated Manufacturing (CIM) oder „CAx“ (Computer Aided...) bekannt.

Wie auch die Cyber-Physische Produktion basiert das CIM Konzept auf einem ganzheitlichen Ansatz, wobei das CIM Konzept auf eine hierarchische IT Infrastruktur von der Planung bis zur Fertigung setzt (Vogel-Heuser et al. 2017a, S. 47). Das Scheitern der CIM Fertigung ist jedoch nicht nur mit dem hierarchischen IT-System und den hohen Investitionskosten, sondern auch durch die „Forderung nach einer großen Produktvielfalt, kurzen Innovationszyklen und kurzen Lieferzeiten bei gleichzeitig sinkenden Marktpreisen“ (Rücker 2006, S. 1) begründet. Allerdings ist die Komplexität der Fertigung ohne den Einsatz von IT-Systemen unmöglich und einzelne Systeme aus der CIM Ära sind bis heute erhalten geblieben, z.B. CNC gesteuerte Fräsen oder Computer Aided Design (CAD). Auch wenn heutige Produktionsplanungs- und Steuerungssysteme (PPS) in der Lage sind durch übergeordnete Regelschleifen einen optimalen Produktionsdurchlauf zu gewährleisten und Wartezeiten im Produktionsfluss zu minimieren, wodurch eine kundenindividuelle Fertigung in „Losgröße 1“ ermöglicht wird, können diese Systeme nicht unternehmensübergreifend eingesetzt werden (vgl. Zühlke et al. 2017, S. 147ff.). Diese Lücke kann durch Cyber-Physische Lösungen geschlossen werden, da die Kommunikation und die relevante Datenhaltung auf dem Produkt selbst stattfindet und somit auch in einen weiteren Produktionsstandort weiterverarbeitet werden kann, unabhängig von der betrieblichen Organisation (Bettenhausen und Kowalewski 2013, S. 3). Damit dies aber ermöglicht werden kann bedarf es einer Vielzahl von Änderungen, die nicht nur auf technischer Ebene stattfinden müssen, sondern auch auf organisatorischer Ebenen eines Betriebs. Mit der steigenden Automation und Sensorik im Cyber-Physischen Produktionsprozess steigt die Datenmenge, die mit dem Produktionsprozess einhergeht. Diese Datenmenge ist zum einen die Grundlage einer adaptiven echtzeitbasierten Steuerung der Produktion, stellt aber auch eine Herausforderung an die Darstellung der Informationsaufbereitung dar (vgl. Bettenhausen und Kowalewski 2013, S. 4).

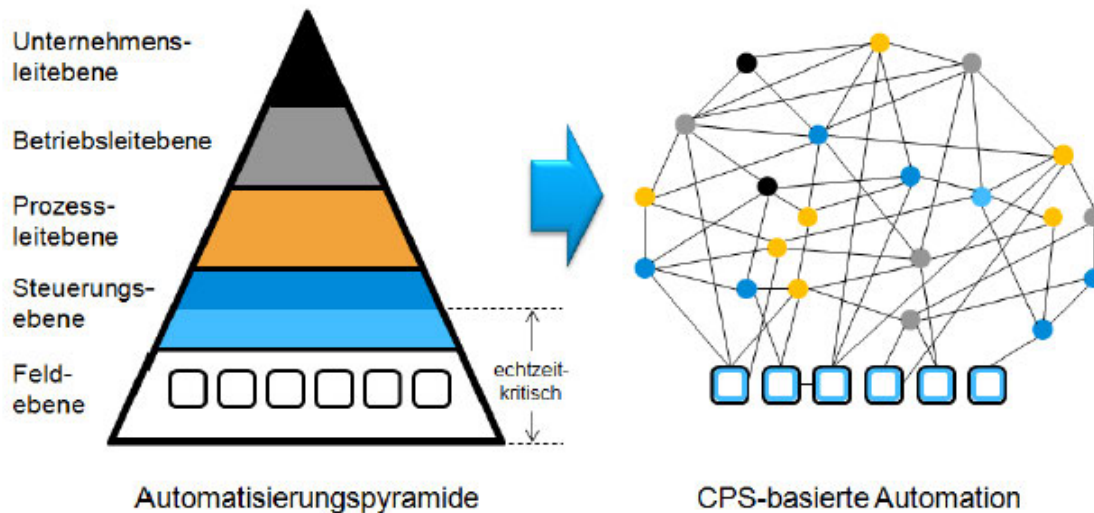


Abbildung 3 Automatisierung im Wandel (Quelle: VDI)

Aus der Grafik geht hervor, dass Informationen aus allen Ebenen der betrieblichen Organisation für eine CPS Basierte Produktion benötigt werden. Dies macht die Auflösung bisheriger Strukturen unerlässlich. Um die bisherigen Strukturen in ein Netzwerk zu überführen ist die Erfassung von Daten auf allen Ebenen unerlässlich, hierzu müssen die Zustandsdaten von Produkten in der Fertigung, Materialbeständen, Kapazitäten in den CPPS etc. genutzt und entsprechend aufbereitet werden. Ziel der selbstständigen Datenerfassung ist es „selbststeuernde Prozesse im Bereich Produktion und Logistik in dezentralen organisatorischen Einheiten“ zu ermöglichen (Kontny et al. 2017, S. 34). Neben der Automatisierung in der Produktion bedarf es jedoch auch der horizontalen Integration weiterer IT-Systeme wie z.B. Enterprise Resource Planning (ERP)- und Material Resource Planning (MRP)- Systemen, um die generierten Daten an die Organisation zurückzumelden und zu verwerten. Zur Verwirklichung einer „Smart Factory“ bedarf es neben einer leistungsfähigen technischen Infrastruktur auch der vertikalen und horizontalen Integration der IT Systeme. Des Weiteren bedarf es einer Anpassung von organisatorischen Prozessen, um das Ziel einer Echtzeit gesteuerten, sich kontextadaptiven Produktion zu ermöglichen.

2.1.1 Infrastrukturanforderungen

Die Infrastrukturanforderungen einer Cyber-Physischen Produktion wurden in einigen Teilen bereits im vorangegangenen Abschnitt kurz angesprochen. Im Folgenden soll nun erörtert werden, wie eine konkrete Umsetzung aussehen kann und welche technischen Anforderungen hierzu benötigt werden. Die technische Ausstattung von Cyber-Physischen Produkten und Cyber-Physischen Produktionssystemen, sowie die Kommunikation innerhalb des Produktionsprozesses stellen den zentralen Aspekt der Fertigung in der digitalen Fabrik dar. Es bedarf einem komplexen Zusammenspiel verschiedener Komponenten um die digitale Fertigung zu ermöglichen. Diese Komponenten sollen im Folgenden Abschnitt vorgestellt werden und ihre Rolle für die Transformation der Fertigung beschrieben werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Umsetzung und Implementierung strukturiert erfolgen sollte, statt ad hoc (vgl. Kontny et al. 2017, S. 35).

2.1.2 Referenzarchitekturen

Die Referenzarchitektur stellt die Blaupause für ein bestimmtes System dar, indem sie die Systemelemente, den Bezugsrahmen und die Beziehungen zwischen den Systemelementen definiert. „Vereinfacht dargestellt legt eine Referenzarchitektur für einen Bestimmten Bereich fest, welche Bausteine es gibt, wie sie zusammengefügt werden können und optional, wie ein Entwickler vorgehen muss bzw. wie eine Musterlösung aussieht“ (Zühlke et al. 2017, S. 54). Gerade im Kontext der CPS basierten Fabrik ist dies notwendig, denn „Industrie 4.0 bedeutet die firmenübergreifende Vernetzung und Integration über Wertschöpfungsnetzwerke. Diese kollaborative Zusammenarbeit wird nur mithilfe gemeinsamer, einheitlicher Standards gelingen. Für deren technische Beschreibung und Umsetzung ist eine Referenzarchitektur notwendig“ (Kagermann et al. 2013, S. 6). Das Ergebnis dieser notwendigen Referenzarchitektur ist die „Referenzarchitektur Industrie 4.0“ (RAMI 4.0) (vgl. Plattform Industrie 4.0 2015, S. 41). Bei der Entwicklung von RAMI 4.0 wurden bereits bestehende Ansätze integriert und weiterentwickelt, sowie unterschiedliche Akteure bei der Entwicklung einbezogen (vgl. Zühlke et al. 2017, S. 55). Eine Herausforderung stellt der hohe Abstraktionsgrad, bei gleichzeitig hohem Komplexitätsgrad der Anwendung, da sich die Referenzarchitektur vom Engineering an über den gesamten Produktlebenszyklus erstreckt. Bei RAMI 4.0 handelt es sich daher um eine „Layer“-Architektur, die auf mehreren Ebenen verschiedene Ansichten

ermöglicht. Bei diesem Modell handelt es sich um eine Modifikation des Smart Grid Modells (SAGM), welches als Grundlage für intelligente Stromnetze dient. Des Weiteren bedient sich RAMI 4.0 auch bereits bestehenden Standards für die verschiedenen „Layer“, wie z.B. Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) als Grundlage für die „Communication Layer“. Hierbei erfüllt jede Schicht eine bestimmte Funktion, wie beispielsweise die Definition von Geschäftsprozessen (Business Layer), die Definition von Datenübertragung und Kommunikationsstandards (Communicationlayer) oder der virtuellen Repräsentation von realen Objekten mittels QR-Code (vgl. Plattform Industrie 4.0 2015, S. 44ff.).

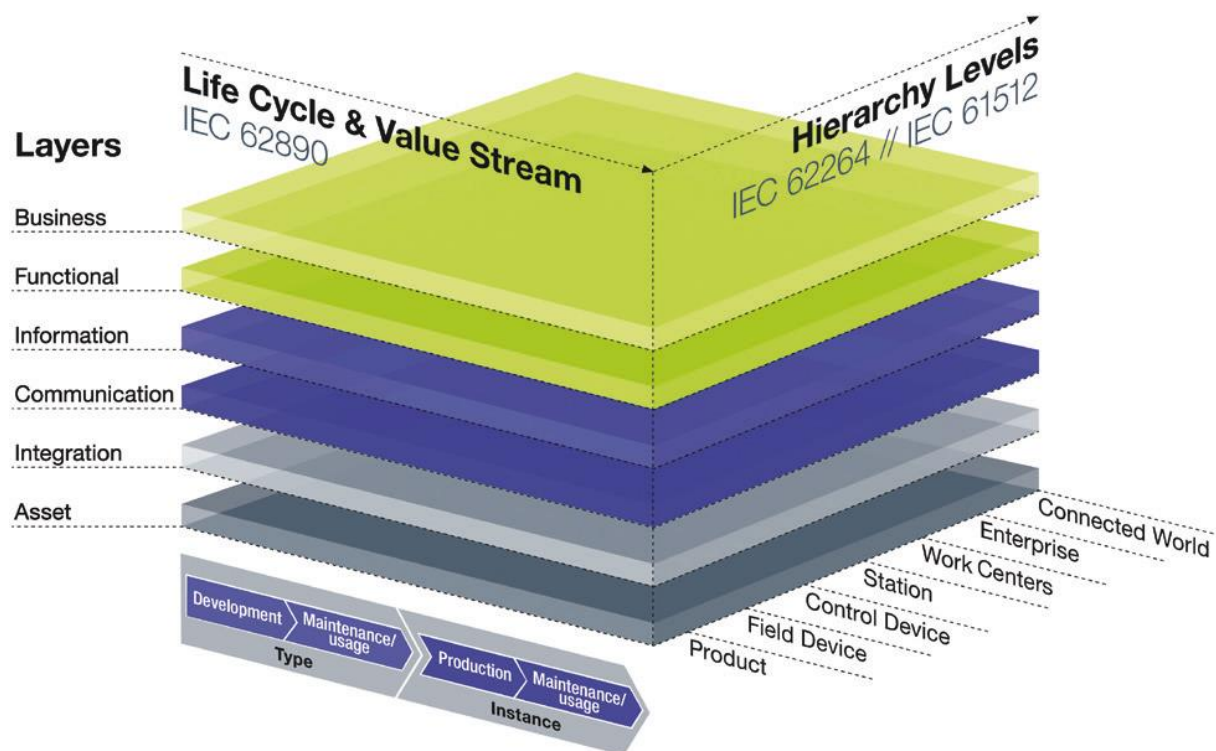


Abbildung 4 Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0) (Quelle: Plattform Industrie 4.0)

Die Weiterentwicklung und Integration bereits bestehender Normen und Standards bei der Entwicklung von RAMI 4.0 dient hierbei der übergeordneten Zielsetzung, mit möglichst wenigen Standards eine funktionsfähige Referenzarchitektur zu schaffen (vgl. Plattform Industrie 4.0 2015, S. 40ff.). Zudem ermöglicht die Bereitstellung einer Referenzarchitektur einen einfachen Zugang für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) in den Bereich die Cyber-Physische Produktion ermöglichen, da die Know- How intensive Entwicklung eines eigenen Referenzmodells entfällt (vgl. Manzei et al. 2017, S. 101). Branchenspezifische Anpassungen müssen jedoch entsprechend ergänzt werden um den konkreten Anwendungsfall systemseitig

abbilden zu können. Hierin besteht auch ein Kritikpunkt an der Referenzarchitektur, die zwar in Kooperation zwischen Wissenschaft und Praxis entwickelt wurden, jedoch durch ihre „allgemeingültige Repräsentation“ nicht nah genug an einer konkreten Anwendungslösung herankommen (Zühlke et al. 2017, S. 66). Trotz dieser berechtigten Kritik an Referenzarchitekturen stellen diese jedoch eine wichtige Grundvoraussetzung für die weitere Entwicklung einer CPS basierten Produktion dar.

2.1.3 Speichersysteme

Ein Wichtiges Bindeglied innerhalb der Produktion ist der Informationsfluss zwischen den unterschiedlichen Systemen. Um dies zu gewährleisten kommt der Datenhaltung und -verarbeitung innerhalb der Produktion und über das weitere Produktleben eine zentrale Bedeutung zu. Hierzu müssen alle realen Objekte innerhalb der Fertigung mit einem Speicher ausgestattet, der sowohl gelesen als auch beschrieben werden kann, und gleichzeitig mit dem Produktionsnetzwerk verbunden sein. Im Falle der CPPS werden beispielsweise neben der eigentlichen Funktion des Systems (z.B. eine Fräse) über die eingebauten Sensoren auch Zustandsdaten der Maschine erhoben und ermöglichen somit eine vorausschauende Wartung (Predictive Maintenance) (vgl. Kagermann et al. 2013, S. 107) und (vgl. Manzei et al. 2017, S. 42ff.). Aus Sicht des Produktes dient der Speicher der Durchführung des Auftrags (z.B. zur Herstellung eines bestimmten Werkstücks oder Halbfertigfabrikats) und der Protokollierung von Daten zur Qualitätssicherung. Je nach Art des Fertigprodukts kann auch die Steuerung von Sensorik und Aktorik hier gespeichert sein, in Form einer Speicher- programmierbaren- Steuerung (SPS). Um die genannten Eigenschaften zu erfüllen bedarf es also nicht nur eines Speichers der zur eindeutigen Identifikation des Produkts und Speicherung von Daten geeignet ist, wie es beispielsweise durch einen Strichcode oder einen RFID-Chip möglich wäre und in der Logistik vielfach zum Einsatz kommen (vgl. Seifert und Decker 2005, S. 31). Sondern es bedarf auch der Fähigkeit zur Datenverarbeitung und Interaktion/ Kommunikation (vgl. Zühlke et al. 2017, S. 148ff.). Die Beiden letztgenannten Fähigkeiten werden durch eingebettete Systeme („Embedded Systems“) ermöglicht, die eine Kombination aus Hard- und Softwarekomponenten darstellen und ihrerseits erst durch technische Weiterentwicklungen von System on Chip Technik ermöglicht wurde (vgl. Bakhkhat et al. 2010, S. 4). „Die Software für eingebettete Systeme war bis dato, auch bedingt durch die begrenzte Leistungsfähigkeit der Systeme, recht

einfach, [...]“ (Manzei et al. 2017, S. 27). Erst durch die leistungsfähigere Hardware wurde es möglich, dass CPP komplexe Modelle der Umwelt intern verwalten können“ (vgl. ebd). Der Einsatz von „Embedded Systems“ ist jedoch nicht auf die Produktebene begrenzt, da über sie auch die Steuerung anderer CPx Komponenten und die Kommunikation zwischen den Komponenten abgewickelt werden kann. Die Größe dieser Systeme kann, entsprechend dem Einsatzzweck, stark variieren. Auf Produktebene sind kleine Lösungen, wie beispielsweise ein Raspberry Pi Zero W² denkbar, wohingegen in Betriebsmitteln größere und leistungsfähigeren Komponenten verbaut werden können. Im Falle einer Kleinstcomputer Lösung bedarf es neben der Speicher Funktion auch noch einer Anbindungsmöglichkeit an das Netzwerk, wie es beim Raspberry Pi Zero W der Fall ist. Bei Produktionssystemen und der Verbindung von Logistikmodulen kann die Netzwerkanbindung mittels Feldbussen abgedeckt werden. Auch hierbei bietet sich die Verwendung bereits etablierter Systeme wie Ethernet, LON, KNX oder Profibus an (vgl. Manzei et al. 2017, S. 26).

2.1.4 Relevante Daten

Nachdem nun geklärt wurde, wo die Produktionsrelevanten Daten in der Cyber-Physischen Produktion gespeichert werden, sollte noch auf die Thematik erörtert werden, welche Daten für die Produktion überhaupt als relevant anzusehen sind. Auch hier ist der Blickwinkel entscheidend, für das Produkt sind andere Daten relevant als für die Maschine oder die Logistiksysteme. Zudem ist eine Unterscheidung zwischen der vertikalen Produktionsebene und der Horizontalen Datenverarbeitungsebenen zu treffen. Dem CPP fällt jedoch eine zentrale Rolle zu, da hier Informationen über das Produkt, seinen derzeitigen Zustand und den angestrebten Zielzustand, aber auch Konfigurationen für Produktionsmittel oder Intralogistik Transportaufträge gespeichert werden. Alle diese Daten werden direkt auf dem Produkt gespeichert und durch die gesamte Produktion mit transportiert (vgl. Bauernhansl et al. 2014, S. 6). Dieser „Informationsschatten“ kann neben den Auftragsdaten des Produktes auch Konstruktionszeichnungen oder Arbeitsanweisungen enthalten, die in der Produktion benötigt werden (Vogel-Heuser et al. 2017c, S. 39). Durch die Speicherung auf dem Produkt kann sichergestellt werden, dass die Daten zu richtigen Zeitpunkt (wenn das Produkt zur Verarbeitung

² <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-zero-w/>

bereitstehet) am richtigen Ort (an der benötigten Maschine) zur Verfügung stehen. Dies impliziert auch, dass nur die benötigten Daten am jeweiligen Ort des nächsten Prozessschrittes zwischen Produkt und jeweiligem System ausgetauscht werden dürfen. Für die Authentifizierung zwischen Produkt und CPPS oder CPLS können beispielsweise zeitlich begrenzte Zertifikate genutzt werden (vgl. Manzei et al. 2017, S. 33) oder auch andere kryptographische Verfahren wären hier denkbar. Das Cyber-Physische Produkt muss neben den Systemkomponenten zur Authentifizierung und den Auftragsdaten, wie beispielsweise Start- und Endzeit für die Auftragsbearbeitung auch die Stückliste, Konstruktionszeichnungen (z.B. STEP Dateien) und Arbeitsanweisungen enthalten beziehungsweise die „Bill of Material“ (BOM) mit sich führen, die nach Engineering Disziplinen gegliedert werden sollten (vgl. Bedenbender et al. 2017, S. 28ff.). Mit dieser Ausstattung kann das Cyber-Physische Produkt durch die Produktion bis zur Fertigstellung gelangen.

2.1.5 Datensicherheit

Durch die Bestrebung nach einer adaptiven Produktion, die in der Lage ist in Echtzeit auf veränderte Bedingungen wie z.B. einen Maschinenausfall oder veränderte Durchlaufzeiten zu reagieren, ist neben der Datenhaltung auch die Datensicherheit von höchster Relevanz. Durch die Vernetzung aller am Produktionsprozess beteiligten Komponenten werden auch sicherheitskritische Daten innerhalb der Produktion benötigt. Wie bereits in Abschnitt 2.1.4 erläutert, befinden sich diese Daten am Produkt selbst. Dieser Aspekt gewinnt zusätzlich an Relevanz in einem Wertschöpfungsnetzwerk, das über Unternehmensgrenzen hinausgeht. Daher wird in der Debatte um die digitale Produktion im Handlungsfeld „Security“ an Lösungen gearbeitet, wie die Sicherheit von Daten gewährleistet werden kann. Denn nur mit einer abgesicherten Datenübertragung, die gewährleisten kann, dass „[...] die Informationen und Daten sicher und korrekt nachweislich zwischen den tatsächlich berechtigten Partner ausgetauscht werden“ kann eine digitale Produktion funktionieren (vgl. Plattform Industrie 4.0 2015, S. 70ff.). Hierbei steht die Industrie vor mehreren Herausforderungen gleichzeitig, da zum einen das Thema IT Sicherheit zunehmend Unternehmensübergreifend gedacht werden muss und zum anderen die verwendete Technologie andere technische Voraussetzungen bietet als bisherige Systeme (vgl. Plattform Industrie 4.0 2015, S. 74; vgl. Bauernhansl et al. 2014, S. 397ff.). Der Unternehmensübergreifende Aspekt soll an dieser Stelle jedoch nicht

weiter betrachtet werden, sondern die innerbetriebliche Perspektive auf CPS Ebene genauer erläutert werden. Auf der Ebene von Cyber-Physischen Systemen steht der technische Aspekt zur Gewährleistung im Vordergrund. Die intelligenten Komponenten innerhalb der Produktion werden, gerade im Falle von CPP, limitiert durch Speicherkapazität, Rechenleistung und Energieversorgung (vgl. Bauernhansl et al. 2014, S. 397). Hinzu kommt, dass die Komponenten bedingt durch ihre permanente Verfügbarkeit nicht ohne weiteres „[...]im Regelbetrieb Sicherheits-Patches, wie aus der Business IT wohlbekannt, aufzuspielen“, das dies eines Neustarts des Systems benötigen würde (ebd.). Updates wären nur dann aufspielbar, wenn es zu einer Wartung und dem damit verbundenen Maschinenstillstand kommt. Dies führt zu einem Zielkonflikt zwischen „hoher Sicherheit und geringer Stillstandszeit“, der die Grenzen von klassischen Sicherheitssystemen im Kontext einer digitalen Produktion aufzeigt (Manzei et al. 2017, S. 232ff.). Gepaart mit den limitierten technischen Möglichkeiten (Speicher, Rechenleistung, Energie) dieser Systeme sind Lösungen, „wie man sie in der heutigen Business IT findet, [...] nicht für die ressourcenschonende, einfache Absicherung beschränkter, vernetzter Komponenten im Automatisierungs- und Produktionsumfeld geeignet“ (Bauernhansl et al. 2014, S. 397). Die Szenarien einer Verletzung der Sicherheitsrelevanten Infrastruktur sollten jedoch realistisch bewertet werden und entsprechende Maßnahmen zur Folge haben. Neben einer Absicherung sollten auch „Responsemaßnahmen“ definiert werden, um im Falle einer Sicherheitsverletzung (sowohl intern also auch extern) ausreichend abgesichert und reaktionsfähig zu sein (vgl. Plattform Industrie 4.0 2015, S. 71ff.). Sicherheit muss daher zum integralen Bestandteil der digitalen Fertigung werden und sich ständig weiterentwickeln, mit dem Ziel ein größtmögliches Maß an Sicherheit zu gewährleisten. Ausschließen lässt sich eine Verletzung derzeit nicht, es können aber geeignete Maßnahmen ergriffen werden um Risiken zu minimieren. Hierbei können bereits vorhandene Standards und Protokolle, sowie Soft- und Hardware Komponenten weiterentwickelt werden (vgl. Manzei et al. 2017, S. 240; vgl. Plattform Industrie 4.0 2015, S. 71ff.). Aber auch neue Technologien können zu einer besser gesicherten digitalen Produktion beitragen. Gerade bei den Produkten selbst, sie können neben den Auftragsdaten auch weitere vertrauliche Daten enthalten und müssen daher besonders geschützt werden. Eine Lösung wären kryptografische Verfahren, wie beispielsweise die Blockchain Technologie, die es ermöglicht eine gegenseitige sichere Identifikation

zwischen Maschine und Produkt bzw. auch zwischen Maschinen (Machine- to-Machine, M2M) zu gewährleisten. Die Technologie existiert bereits am Markt und ist, was für den Produktionsablauf relevant ist, echtzeitfähig. Darüber hinaus kann diese Technologie auch Unternehmensübergreifend eingesetzt werden. Dies kann im Kontext von Wertschöpfungsnetzwerken und arbeitsteiliger Produktion die Sicherheit zusätzlich verbessern, da die Zugriffsrechte vordefiniert werden können. Somit können Informationen und Prozessdaten vor unerlaubtem Zugriff geschützt werden (vgl. Fridgen 2017).

2.2 Plug and Produce

Eine der Kernfähigkeiten von Cyber-Physischen Systemen ist die Fähigkeit „adaptiv“ zu sein, sie können sich also ihrer Produktionsumwelt anpassen und auf Umwelteinflüsse reagieren. Mit dieser Fähigkeit geht auch der Umstand einher, dass diese Systeme sich selbst konfigurieren und in ihre Umgebung einfügen. Vereinfacht gesagt, eine Maschine oder ein Logistiksystem wird an das Netzwerk angeschlossen und ist direkt einsatzbereit, da es seine eigene Funktion kennt, die im Netzwerk vorhandenen CPS erkennt und mit diesen kommunizieren kann. Der Begriff „Plug and Produce“ bezieht sich auf das bekannte „Plug and Play“ Konzept, bei dem externe Geräte an einen PC angeschlossen werden und sofort einsatzbereit sind. In der Literatur findet sich aber auch der Begriff „Plug and Work“, als Synonym (vgl. Vogel-Heuser et al. 2017b, S. 62; vgl. Sauer 2017, S. 22). Das Konzept von „Plug and Play“ wurde auf den modularen Aufbau von intelligenten Systemen, unabhängig von ihrer Aufgabe in der Fertigung, übertragen. Durch die Fähigkeit zur Selbstkonfiguration der Anlage bzw. des CPS, kann das System beliebig erweitert werden und durch weitere oder neue Module ergänzt werden (vgl. Vogel-Heuser et al. 2017c, S. 5). Selbiges gilt auch für die Erst-Inbetriebnahme (vgl. Sauer 2017, S. 22). Hierin liegt auch der große Unterschied zur konventionellen Automatisierung, denn „das technische System kennt weder Produkt noch Automationsziel“ (gemeint sind hier konventionelle Automationssysteme) und die steigende Komplexität bei zunehmender Anlagengröße, welche die Skalierbarkeit einschränkt (Vogel-Heuser et al. 2017b, S. 60). Genau hierin unterscheiden sich die intelligenten Systeme, wie sie im Kontext von Industrie 4.0 entwickelt werden von den konventionellen Systemen. Im Gegensatz zu der Vorabdefinition der Fähigkeiten und Funktion von konventionellen Systemen, werden intelligente Systeme zielorientiert programmiert.

Dies bedeutet, dass durch die Definition von Zielen „z.B. eine Beschreibung des finalen Produktes, der Durchsatzziele oder den maximalen Energieverbrauch [...] deklarativ formuliert“ werden (Vogel-Heuser et al. 2017b, S. 61). Durch die deklarative Formulierung erhält das System „formalisiertes Problemlösungswissen“ und hierdurch die nötige Flexibilität, „die im späteren Betrieb für Adaption und Anpassungsfähigkeit“ gewährleistet (ebd.). Diese Fähigkeit erleichtert auch die Rekonfigurierbarkeit von bestehenden modularen Anlagen, da diese ohne großen technischen Aufwand verändert werden können und steigert dazu noch die Wiederverwertbarkeit des Systems. Hierzu bedarf es der „Entkopplung der technischen Ausführung der Module von der [...] Aufgabe (Vogel-Heuser et al. 2017c, S. 5). Um „Plug and Produce“ zu ermöglichen bedarf es jedoch einem übergeordneten „Manufacturing Execution System“ (MES), dass die Kommunikation zwischen den Modulen verschiedener Hersteller gewährleistet. In diesem Zusammenhang wird auch die Verwendung einheitlicher Standards gefordert, auf Basis bereits bestehender offener Standards wie z.B. AutomationML™ oder OPC UA (vgl. Sauer 2017, S. 22f.). Auch wenn bereits dezentral organisierte Systeme Anwendung finden, so können diese das Versprechen von „Plug and Produce“ nur teilweise einlösen. Das „emergente Systemverhalten“ ermöglicht dies durch „intuitive lokale Entscheidungsregeln“ (Vogel-Heuser et al. 2017c, S. 18). Diese Aufgabe können die Systeme jedoch nicht ohne den Einsatz von „Middleware“ erbringen und beschränken sich daher auf die „[...] Erkennung, Konfiguration und Einbindung von Hardware Komponenten in eine bereits existierend Steuerungslogik (Vogel-Heuser et al. 2017b, S. 70). Der „Plug and Produce“ Ansatz stellt für die digitale Produktion einen weiteren wichtigen Baustein dar, um eine adaptive Fertigung zu ermöglichen. Hierbei wird, wie auch in anderen Bereichen, in der Literatur sowie in der praktischen Verwendung bereits bestehender Systeme eine Standardisierung gefordert (vgl. Vogel-Heuser et al. 2017c, S. 18f.; vgl. Sauer 2017, S. 22ff.). Aber wie auch in der Diskussion um die Referenzarchitektur RAMI 4.0, sollen hierbei bereits vorhandene Ansätze und Standards genutzt werden (vgl. Vogel-Heuser et al. 2017b, S. 70). Auch dies findet in der Praxis bereits statt, wie an den nationalen und internationalen Bestrebungen zu erkennen ist (vgl. Sauer 2017, S. 24).

2.3 Dezentrales Auftragsmanagement

Die bisher beschriebenen Techniken und theoretischen Konzepte dienen ganz oder teilweise der Umsetzung der Vision einer digitalen Produktion. Eines der Kernelemente stellt hierbei die dezentrale Organisation der Auftragsbearbeitung dar. So ist beispielsweise die zunehmende Ausstattung mit Sensortechnik, die ihrerseits ein wichtiges Merkmal der CP-Systeme darstellen, eine zentrale Technologie zur Umsetzung einer echtzeitfähigen Produktion (vgl. Zühlke et al. 2017, S. 148). Die aus der Sensorik gewonnenen Daten hinsichtlich des aktuellen Betriebs, die ihrerseits in das übergeordnete „Auftrags-CPS“ gemeldet und hierin verarbeitet werden, bilden die Grundlage um ein dezentrales Auftragsmanagement zu ermöglichen (Kontny et al. 2017, S. 34). Durch das zwischenschalten einer weiteren Instanz innerhalb der vertikalen Integration steigt das Maß an Flexibilität für das einzelne CPS, da dieses die „Information direkt an die betroffenen vor- und nachgelagerten CPS“ weiter leitet (Kontny et al. 2017, S. 34). Abweichungen zwischen Soll- und Ist- Zustand in der Produktion werden also nichtmehr direkt in das zentrale ERP System gemeldet, um anschließend eine Problemlösung zu ermöglichen. Die Rückmeldung in das ERP System ginge zu Lasten der Echtzeitfähigkeit und steht daher im Gegensatz zu den Anforderungen an eine digitale Fertigung.

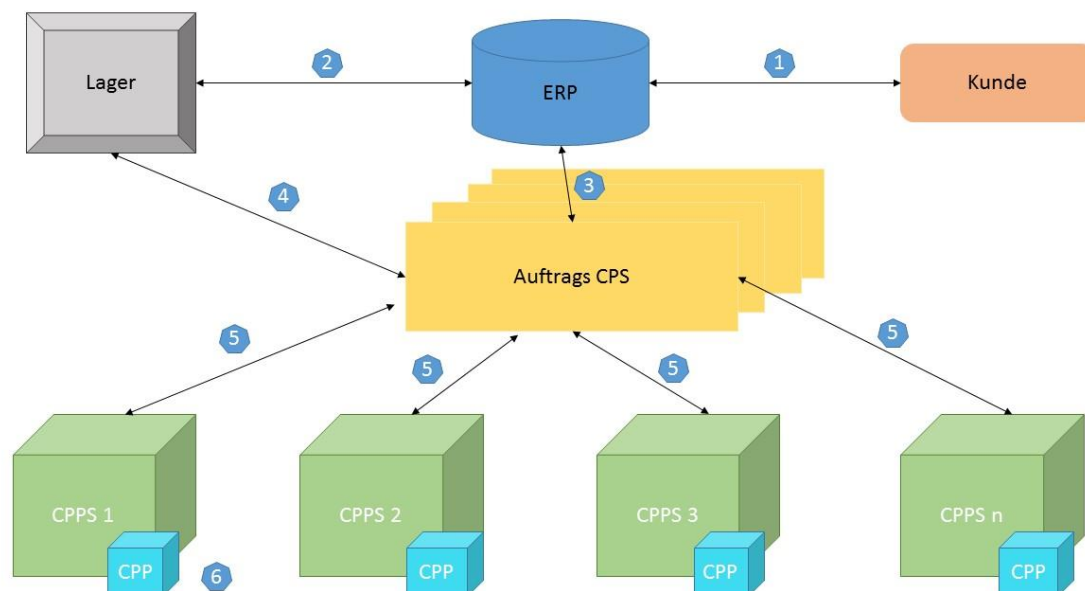


Abbildung 5 Schema "Auftrags CPS" (Quelle: Nach Kontny et. al. (2017))

Die Gewährleistung einer echtzeitbasierten dezentralen Organisation stellt hierbei eine große Herausforderung dar, da diese nur durch ein komplexes Zusammenspiel

verschiedener Komponenten ermöglicht werden kann (s. Abbildung 4). Aus Vereinfachungsgründen wurden nur die Relevanten Komponenten dargestellt und auf vertikaler und horizontaler Ebene auf eventuelle Zwischensysteme verzichtet. Wie in der Abbildung dargestellt, wird der Kundenauftrag in das ERP System gemeldet (1). Dies erfolgt entweder manuell oder durch elektronische Übermittlung per EDI (Electronic Data Interchange). Über das ERP System können auch die Materialbestände überprüft werden, allerdings nicht in Echtzeit, da es keine Rückmeldung über die in der Produktion verwendeten Artikel gibt (2). Schritt (2) entspricht hierbei dem Vorgehen in einer konventionellen Fertigung. Das ERP System übergibt dann den Kundenauftrag in das Auftrags CPS (3), welches den Auftrag dann an die Cyber-Physischen Produkte bzw. deren Rohmaterialien weitergibt (4)(6), woraufhin diese in den CPPS bearbeitet werden (5)(6). Hierbei erfolgt jeweils eine Rückmeldung in das Auftrags CPS zurückgemeldet. Hierdurch wird sichergestellt, dass die physische Position und der Herstellungsfortschritt des Produkts bzw. dessen Halbfertigfabrikate im Auftrags CPS digital vorhanden ist. Dies ist für die dezentrale Verwaltung des Kundenauftrags wichtig, da durch die Rückmeldung an das Auftrags CPS in Kombination mit den Sensordaten von den untergeordneten CPx auf Umwelteinflüsse reagiert werden kann. Das Auftrags CPS kann auf diese Umwelteinflüsse (z.B. Maschinenausfall) mit der Methode der „dynamischen Reihenfolgenbildung“ reagieren und die Bearbeitungsreihenfolge der Kundenaufträge an die neuen Umweltbedingungen anpassen (vgl. Zühlke et al. 2017, S. 158). Das bedeutet, dass die Kundenaufträge neu priorisiert werden, hierbei werden Aufträge vorgezogen, welche z.B. die ausgefallene Maschine nicht benötigen. Hierdurch werden freigehaltene Kapazitäten in nachgelagerten Betriebsmitteln effizient genutzt und ein Produktionsstillstand vermieden (vgl. ebd.). Um das beschriebene System umzusetzen bedarf es zum einen einer geeigneten Zielfunktion mit den notwendigen Freiheitsgraden, die es dem System ermöglicht die entsprechenden Entscheidungen selbstständig zu treffen. Die Entscheidungsfindung wird hierbei durch das „lösen eines Optimierungsproblems aus Modell, Randbedingungen und Messwerten hinsichtlich einer gegebenen Zielfunktion“ ermöglicht (Zühlke et al. 2017, S. 200). Zum anderen die „logische, nicht zwangsläufig physische Zusammenfassung von mehreren Arbeitssystemen in der Produktion [...], um die Komplexität einer zielgerichteten Produktionssteuerung unter Einsatz aktueller Auftragsinformationen zu reduzieren“ (Zühlke et al. 2017, S. 155). In

der Praxis konnte bereits gezeigt werden, dass eine situative Produktionssteuerung möglich ist und hierdurch die „Zielerreichung hinsichtlich bspw. der Durchlaufzeit, Termintreue und Kosteneinsparungen“ ermöglicht werden (Zühlke et al. 2017, S. 163). Dies setzt jedoch eine genaue Prozessanalyse und eine klar definierte Zielfunktion mit den entsprechenden Freiheitsgraden, sowie eine schrittweise Umsetzung voraus (vgl. Kontny et al. 2017, S. 33ff.). Simulationsverfahren und geeignete Modelle können die Entwicklung eines dezentralen Auftragsmanagements zusätzlich unterstützen bzw. absichern und das System kontinuierlich optimieren (vgl. Zühlke et al. 2017, S. 147ff.). Es wird aber auch in der Literatur darauf hingewiesen, dass Systeme mit dem Ziel eines voll-autonome Betriebs eine Zukunftsvision darstellen (vgl. Zühlke et al. 2017, S. 198ff.).

3. Produktionsprozess Konzeption

In diesem Teil der Thesis soll Anhand eines fiktiven Anwendungsbeispiels die Möglichkeiten einer digitalen Produktion aus den Perspektiven des Produktes (CPP), der Logistikmodule (CPLS) und der Produktionssysteme (CPPS) näher beleuchtet werden. Zu diesem Zweck soll eine Modellhafte Fertigung eines kundenindividuellen Fahrrades entwickelt werden um eine Massenfertigung mit der Losgröße 1 zu realisieren. Das Fahrrad wird vom Kunden online Konfiguriert, ähnlich wie es bereits z.B. in der Automobilbranche der Fall ist aber auch bei Fahrrädern bereits Anwendung findet³⁴. Bei den aufgeführten Beispielen handelt es sich jedoch um Fälle von „Adaptive Customization“. Dieser Begriff beschreibt die kundenseitige Individualisierung von standardisierten Produkten (Winkler 2010, S. 27). Ziel einer digitalen Produktion sollte jedoch eine „Collaborative Customization“ sein. Der Begriff der „Collaborative Customization“ beschreibt die Herstellung von individuellen Produkten nach Kundenvorgabe (ebd.). Der Kunde kann zwischen Damen und Herren Fahrrädern in den Kategorien „Mountainbike“, „Rennrad“ und „Trekkingrad“ wählen und kann diese dann frei nach seinen Vorstellungen konfigurieren. Hierbei gelten natürlich einige Restriktionen, wie z.B.: dass Mountainbike Reifen nicht mit einem Rennrad Rahmen kombiniert werden können und vice versa. Darüber hinaus kann der Kunde zwischen verschiedenen Gangschaltungen, Sattel, Pedale, Bremssystemen (Felgenbremse oder Scheibenbremse), Gabeln (Standard oder Federgabel), Lenkertypen, Schutzblechen, Farben, Reifengrößen und -profilen, sowie Beleuchtungen und im Falle des Mountainbikes und des Trekkingrads zwischen verschiedenen Elektromotoren wählen. Die Rahmengeometrie wird anhand von Körperabmessungen des Kunden definiert. Durch die in Echtzeit verfügbaren Bestände und Produktionsauslastung wäre es dann theoretisch möglich dem Kunden bereits vor der Bestellung einen voraussichtlichen Fertigstellungs- bzw. Liefertermin zu errechnen und zu nennen. Denn trotz hoher Produktindividualität erwarten Kunden kurze Lieferzeiten, die mit Produkten aus der Serienfertigung vergleichbar sind (vgl. Winkler 2010, S. 1). Eine hohe Liefertreue zählt zu einer der wichtigsten Ziele in der Fertigung, wie in der Literatur betont wird (vgl. Kontny et al. 2017, S. 33ff.; vgl. Winkler 2010, S. 1). Die vom Kunden gewählte Konfiguration dient hierbei als Grundlage der Stückliste bzw. der Bill of Material (BOM), welche die Grundlage

³ <http://konfigurator.velo-de-ville.de/>

⁴ <https://www.rosebikes.de/inhalt/bike-konfiguration/>

für die Fertigung bildet. Aus Vereinfachungsgründen soll die Komplexität der Modellfabrik jedoch nur auf die Haupttätigkeit „Rahmenfertigung“ und „Montage“ reduziert werden. Daraus folgt, dass alle anderen Komponenten des Fahrrads Zukaufteile sind und extern bezogen werden. Bei den Zukaufteilen handelt es sich ebenfalls um intelligente Produkte, sofern sie nicht aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht mit Intelligenz ausgestattet werden können (s. 1.3.3). Das Anwendungsszenario setzt das Vorhandensein bestimmter Grundvoraussetzungen voraus. Hierzu zählen neben einer geeigneten technischen Infrastruktur, Software und auch die benötigten Prozesse vom Engineering bis hin zur Fertigstellung des Produkts.

3.1 Fabriklayout

Wie in der Einleitung zu dieser Arbeit beschrieben, soll die intelligente Fabrik in der die Fahrräder gefertigt werden komplett frei geplant werden. Dies dient dem Zweck, dass die Gestaltung der Fabrik den Produktionsbedürfnissen angepasst werden können und auf den Produktionsprozess ausgerichtet werden können. Des Weiteren kann hierdurch das volle Potential einer digitalen Fertigung gezeigt werden, da eine Integration von konventionellen Maschinen in das CPS entfällt. Die Integration von nicht intelligenten Komponenten in ein CPS bringen einen erheblichen Mehraufwand mit sich (vgl. Laas und Theuer 2017, S. 15ff.). Bei der Planung der intelligenten Fabrik ist neben der physischen Planung und Anordnung von Produktionsmitteln

auch die Konzeption der virtuellen Repräsentation in der Planung zu berücksichtigen.

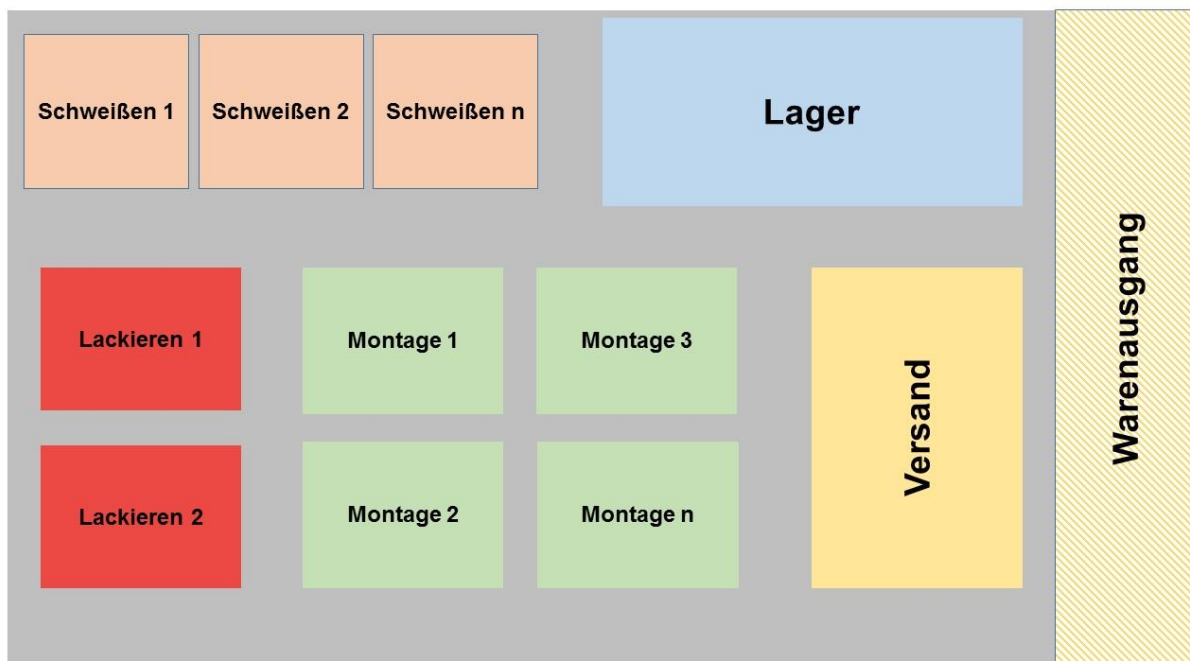


Abbildung 6 Fabriklayout (Quelle: Eigene Grafik)

Die Grafik zeigt den Aufbau der digitalen Fabrik mit den verschiedenen Arbeitsschritten, die für die Herstellung des kundenindividuellen Fahrrads benötigt werden. Hierbei stellt jede Station ein CPS für sich dar, das dem Fertigungs-CPS untergeordnet ist. Das Fertigungs-CPS wiederum bildet die Schnittstelle zum ERP System (s. Abb. 5). Im Lager befinden sich neben den Rohstoffen für die Rahmenfertigung auch die Zukaufteile für die Endmontage und die benötigten Verpackungsmaterialien, sowie die Lademöglichkeiten für die CP Logistiksysteme. Die Arbeitsplätze „Schweißen“ dienen der Herstellung des Rahmens, verfügen über einen Rohmateriallager am Arbeitsplatz, eine Mensch-Maschine Schnittstelle, Säge, Schweißgeräte und eine Qualitätssicherung. Zudem werden die Rahmen hier „intelligent“ gemacht, das physische Objekt „Rahmen“ erhält den Kleinstcomputer mit den Auftragsdaten. Von diesem Punkt kann das CPP sich selbstständig weiter durch die Fertigung steuern. Die Lackierung umfasst die Vorbereitung des Rahmens, die Lackierung selbst und eine weitere Qualitätskontrolle. Bei Lack ist zu erwähnen, dass der physische Lack aus technischen Gründen nicht selbst intelligent sein kann. Die Lackiererei hingegen kann mit cyber-physischen Komponenten ausgestattet sein. Daher muss für die Lackierung ein intelligentes Produkt der Kategorie eins oder zwei zum Einsatz kommen (s. Abb. 1). Dies gilt auch für die in der Montage verwendeten Kleinteile. Die Montage Arbeitsplätze sind neben einer Mensch-Maschine-

Schnittstelle (z.B. einem Monitor für Montageanleitungen), intelligenten Werkzeugen zur Qualitätssicherung und einer Lagerfläche für die benötigten Zukaufteile auch mit Behältern für Kleinteile ausgestattet. Hierbei könnte ein „Pick-2-Light“ Arbeitsplatz Anwendung finden, der durch Lichtsignale (rot für falsche Entnahme, grün für korrekt entnommenes Material) die Materialentnahme registriert (vgl. Zühlke et al. 2017, S. 135ff.). Mit dieser Poka Yoke Maßnahme werden Fehler in der Montage vermieden und fügt sich in das Lean Management ein (vgl. Zühlke et al. 2017, S. 135; vgl. Kontny et al. 2017, S. 34). Da das Fahrrad nur Teilweise montiert wird, bevor es zum Kunden versandt wird, werden nur die Zukaufteile in der Montage bereitgestellt, die für die Teilmontage benötigt werden. Teile die aus versandtechnischen Gründen nicht montiert werden, werden bei der Verpackung im Versand bereitgestellt. Der Versandarbeitsplatz verfügt ebenfalls über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle, ein Lager für Verpackungsmaterial und Zukaufteile sowie eine weitere Qualitätskontrolle. Denkbar wäre in diesem Fall die Verwendung eines Packassistenzsystems, welches die Verpackung des Teilmontierten Fahrrads und den nichtmontierten Komponenten überwacht und die korrekte und vollständige Verpackung des Pakets sicherstellt (vgl. Vogel-Heuser et al. 2017c, S. 52f.). Die Beschriebenen Arbeitsstationen werden durch intelligente Intra-Logistiksysteme verbunden und die Lagerflächen bzw. Kleinteillager am Arbeitsplatz bestückt. Hierbei könnten modulare Transportsysteme wie die im Forschungsprojekt KARIS PRO entwickelten dezentralen Ladungsträger zum Einsatz kommen (vgl. Vogel-Heuser et al. 2017c, S. 55ff.). Im folgenden Abschnitt soll der Produktionsprozess aus der Perspektive des Produktes, des Produktionssystems und der Intra-Logistik dargestellt werden.

3.2 Musterprozess CPP

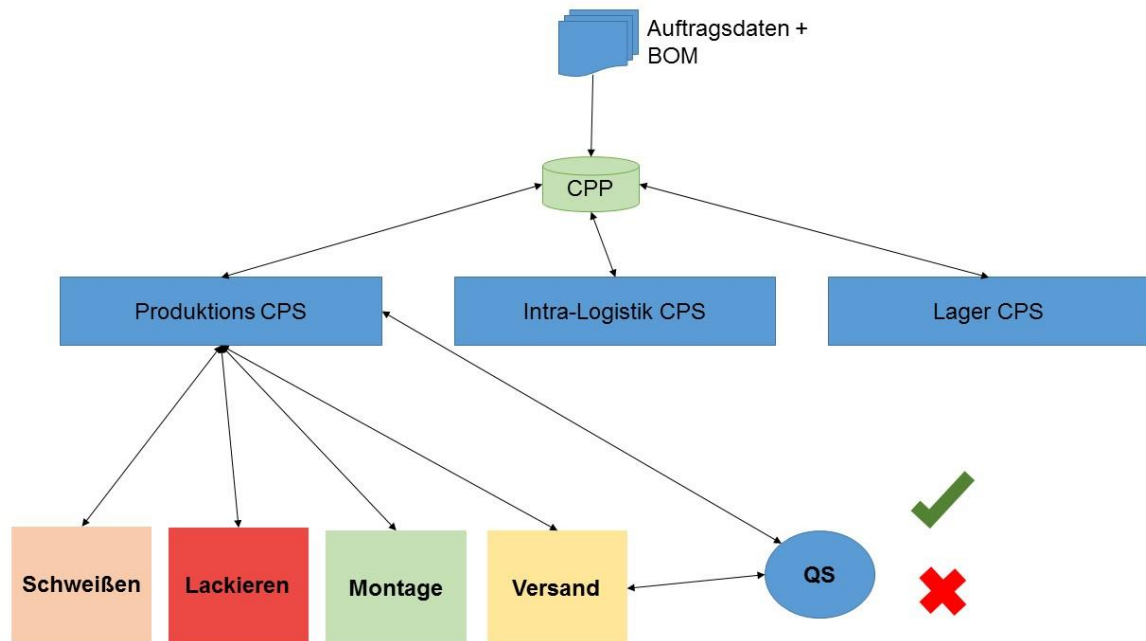


Abbildung 7 Musterprozess CPP (Quelle: Eigene Grafik)

Mit Eingang des Kundenauftrags und der Erstellung der BOM, zunächst im ERP System mit anschließender Weiterleitung und Freigabe in das CPS, werden die Auftragsdaten und die BOM auf dem Produkt gespeichert. Das CPP kommuniziert mit den dargestellten CPS, die Zeitpunkte zu denen diese Kommunikation stattfindet sind in der Grafik nicht dargestellt. Manche Kommunikationen erfolgen auch mehrfach innerhalb des Produktionsprozesses. Zunächst kommuniziert das CPP mit dem Produktions- CPS, damit der Rahmen an einer der Schweißstationen gefertigt werden kann. Nach dem Abschluss eines Vorgangs erfolgt jeweils eine Qualitätskontrolle, die nur bei Bestehen den Weg zum Nächsten Produktionsschritt führt. Diese Information wird zum einen an das Produktions-CPS weitergeleitet und zum andern an das CPP. Bei Nichtbestehen der Qualitätsprüfung muss das CPP entweder nachträglich bearbeitet werden oder es wird dem Ausschuss zugeführt. Das CPP fordert nach bestandener Qualitätsprüfung ein CPLS zum Transport zwischen den jeweiligen Arbeitsschritten beim Intra-Logistik CPS an. Aber nicht nur den Transport des Rahmens, der hier das CPP repräsentiert, wird von diesem selbstständig organisiert. Es werden vom CPP auch die benötigten Zukaufteile aus dem Lager angefordert und zu dem Entsprechenden Bearbeitungsschritt über ein CPLS bereitgestellt. Für ein einzelnes CPP ist die Fertigung ein gradliniger Prozess, gewinnt jedoch an Komplexität, wenn sich mehrere Produkte gleichzeitig in der

Produktion befinden oder einzelne CPPS ausfallen. In diesem Fall greift das Konzept der dynamischen Reihenfolgenbildung, welches es dem Produkt erlaubt möglichst schnell durch die Produktion zu gelangen. Ein weiteres denkbare Szenario wäre, dass der Kunde gegen Aufpreis eine schnellere Fertigung bestellen kann. Hierdurch würde dem CPP eine höhere Priorität eingeräumt und somit ein Vorrang gegenüber andern in der Fertigung befindlichen Produkten hätte. Diese Vorrangbehandlung darf jedoch nicht zu Lasten der Liefertreue anderer Produkte gehen. Mit diesen zusätzlichen Einflussfaktoren wird der Prozess und dessen dezentrale Organisation zu einer komplexen Aufgabe.

3.3 Musterprozess CPLS

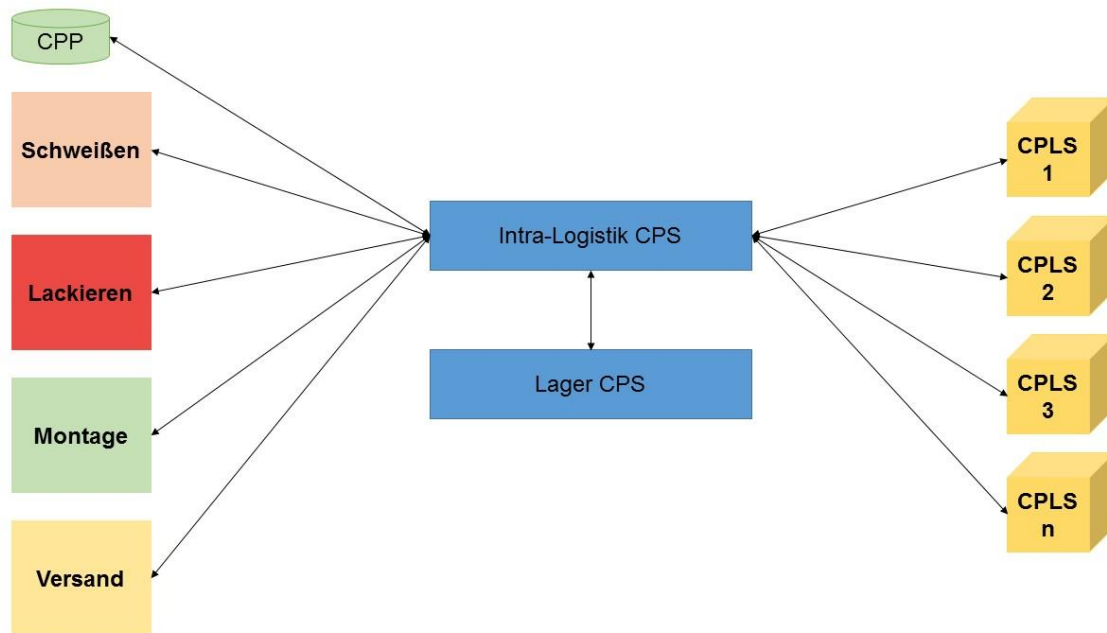


Abbildung 8 Musterprozess CPLS (Quelle: Eigene Grafik)

Im Gegensatz zum zuvor beschriebenen Musterprozess für das CPP unterscheidet sich der Musterprozess für die CPLS deutlich. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde auf die Darstellung von direkten Interaktionen zwischen den „bestellenden“ Systemen (linke Seite der Grafik) und den CPLS verzichtet. Die Systeme auf der linken Seite generieren Transportaufträge und melden diese an das Intra-Logistik CPS. Zum einen können dies Transportaufträge für den Transport von A nach B sein, wie im Falle des CPP, um von einem Bearbeitungsschritt zum Nächsten zu gelangen. Zum anderen werden aber auch Transportaufträge zur

Materialbereitstellung oder zum Abtransport von leeren Behältern vom Arbeitsplatz. Im Falle eine CPP kann es aber auch die Bereitstellung von Benötigtem Material für den jeweils nächsten Bearbeitungsschritt sein. Zusätzlich muss das Intra-Logistik CPS mit dem Lager CPS kommunizieren um Materialbedarfe für Transportaufträge anzumelden, sodass das Material bereitgestellt werden kann. Die Kernaufgabe des Intra-Logistik CPS besteht jedoch in der adaptiven Steuerung der CPLS Flotte. Die Flotte besteht aus modular aufgebauten Transporteinheiten, die in der Lage sind sich autonom innerhalb der Fabrik zu bewegen. Durch die geringe Größe der Transporteinheiten werden Redundanzen geschaffen und der Ausfall einzelner Module hat nur einen negativen Einfluss auf das aktuell geladene Transportgut, der übrige Produktionsablauf wird nicht gestört (s. 1.3.4). Um autonom navigieren zu können müssen die CPLS in der Lage sein sich ein Bild von ihrer Umwelt zu machen, um anschließend den kürzesten Weg von A nach B zu finden. Auch das Intra-Logistik CPS vergibt seine Transportaufträge nach dem Prinzip der dynamischen Reihenfolgenbildung, in der die Aufträge nach Prioritäten geordnet eingesteuert werden. Hinzu kommt im Falle der CPLS, dass diese ihre Verfügbarkeit in das CPS melden und Verfügbarkeit für neue Transportaufträge zu signalisieren. Die im CPS als verfügbar gemeldeten Transportmodule erhalten einen neuen Transportauftrag dann, wenn sie sich als das günstigste Transportmittel erweisen. Hierbei ist die räumliche Nähe zum nächsten Transportauftrag das entscheidende Kriterium. Es müssen aber auch andere Faktoren berücksichtigt werden, wie beispielsweise der Ladezustand der CPLS Batterie, die Traglast oder die Art des Systems. Denn der modulare Aufbau einzelner CPLS schließt nicht aus, dass es verschiedenen konfigurierte CPLS gibt im Parallelbetrieb (z.B. Flurförderzeuge und KLT Systeme) gibt. Durch diese technischen Möglichkeiten soll eine echtzeitbasierte, kontextadaptive Intra-Logistik gewährleistet werden.

3.4 Musterprozess CPPS

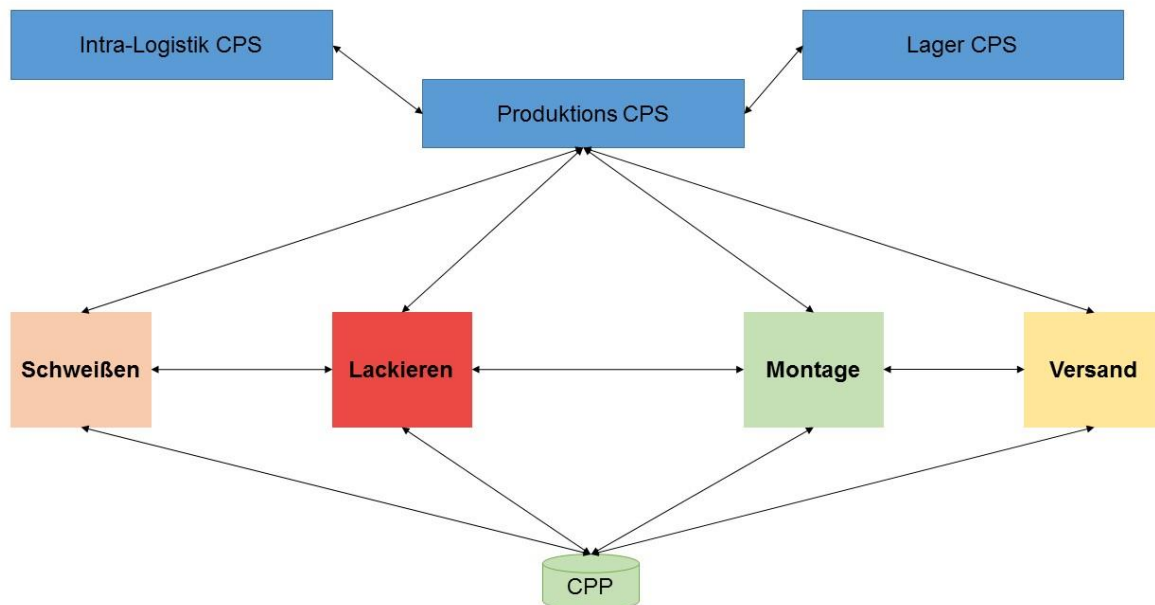


Abbildung 9 Musterprozess CPPS (Quelle: Eigene Grafik)

Im Folgenden soll der in der Grafik dargestellte Musterprozess für die Cyber-Physischen Produktionssysteme näher erläutert werden. Auch in diesem Fall wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit auf bestehende Verbindungen zu anderen CPS weitestgehend verzichtet. Zudem repräsentieren die einzelnen Bearbeitungsstationen Schweißen, Lackieren, Montage und Versand mehrere Arbeitsstationen des jeweiligen Produktionsschritts. Wie auch bei der Intra-Logistik werden aktuelle Auslastung, Verfügbarkeit, Ausfälle oder Wartungsbedarf von den jeweiligen CPPS Modulen an das Produktions-CPS gemeldet. Die Zuweisung von Fertigungs- oder Montageaufträgen erfolgt auch im Falle der CPPS auf Basis einer dynamischen Reihenfolgenbildung. Im Gegensatz zu den CPLS ist aber der Standort nicht das ausschlaggebende Kriterium, da CPPS in der Regel an einen Standort gebunden sind. Entscheidend für den Zuschlag für den Fertigungs- oder Montageauftrag ist die verfügbare Kapazität bzw. die aktuelle Belegung der jeweiligen Maschine oder Arbeitsstation. Eine niedrige Auslastung bzw. hohe verfügbare Kapazität repräsentiert hierbei die niedrigsten „Kosten“ für das zu fertigende Produkt. Je kürzer das Produkt auf die weitere Bearbeitung warten muss, desto kürzer ist die Gesamtdurchlaufzeit. Neben der Interaktion mit dem Produktions-CPS kommunizieren die Cyber-Physischen Produktionssysteme mit der Intra-Logistik und mit dem CPP. Das CPP liefert die produktspezifische Stückliste mit den

entsprechenden Arbeitsanweisungen an den jeweiligen Arbeitsplatz und die Qualitätssicherungsdaten bzw. deren Sollwerte. Des Weiteren könnte durch die Kommunikation zwischen den jeweils vor- und nachgelagerten Prozessschritten die Entstehung von Bottlenecks frühzeitig erkannt werden und die Produktionsleistung entsprechend an die neuen Umweltbedingungen angepasst werden, sei es durch das Vorziehen von einzelnen Produktionsschritten oder dem Umleiten auf andere Fertigungsanlagen. Dieses kontextadaptive Umleiten von einer Produktionseinheit auf eine zweite konnte bereits erfolgreich in der Praxis angewendet werden (vgl. Zühlke et al. 2017, S. 179–195). Die praktische Umsetzung gilt auch für die bereits beschriebenen Anwendungen in CPLS und CPP (vgl. Vogel-Heuser et al. 2017c, S. 1–45; vgl. Vogel-Heuser et al. 2017b, S. 39ff.).

4. Fazit

4.1 Zusammenfassung

In dieser Thesis sollte die Frage geklärt werden, wie adaptives Auftragsmanagement die Grundlage einer digitalen Produktion bilden kann. Im Zuge der Recherche stellte sich jedoch heraus, dass neben dem adaptiven Auftragsmanagement noch weitere Einflussfaktoren zur Umsetzung einer digitalen Produktion benötigt werden. Zur Umsetzung werden neben technischen Komponenten auch eine geeignete Referenzarchitektur zur Abbildung der Geschäftsprozesse benötigt. Hierbei konnte gezeigt werden, dass bisherige hierarchisch organisierte Systeme die Anforderung nach einer kundenindividuellen Fertigung in Losgröße 1 hinreichend ermöglichen. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass die digitale Produktion nur durch eine Auflösung bisheriger Strukturen ermöglicht werden können. Daher ist die Entwicklung und Implementierung einer Referenzarchitektur, trotz berechtigter Kritik hinsichtlich der Allgemeingültigkeit, notwendig. Ohne diese Grundlage können die auf der Referenzarchitektur aufbauenden Cyber-Physischen Systeme nicht funktionieren. Allerdings ist die Referenzarchitektur eine sehr abstrakte Thematik, da sie die reale Welt in die Virtuelle überführt. Die Initiativen von Branchenverbänden und in der Forschung zeigen zum einen die Relevanz für die digitale Produktion, zum anderen machen diese Initiativen es auch möglich die Implementierung für Unternehmen zu erleichtern. In verschiedenen Forschungsprojekten konnte des Weiteren gezeigt werden, dass die technischen Möglichkeiten zur Umsetzung der digitalen Produktion

gegeben sind und im Modellversuch funktionieren. Hierbei gibt es Konzepte, die nah an einer tatsächlichen Umsetzung (z.B. modulare Logistiksysteme), anderen hingegen (z.B. CPP der Klasse 3 und 4) noch recht weit von einer Umsetzung in der Praxis entfernt. Die Möglichkeit einer adaptiven Auftragsbearbeitung zählt zu den erst genannten Konzepten. Gleichzeitig bildet sie, neben der Referenzarchitektur, eine weitere Grundlage um den Erfolg von Technologien wie CPS zu ermöglichen. Die Digitale Produktion kann also nicht monokausal erklärt werden. Es ist viel mehr das Zusammenspiel vieler verschiedener Komponenten die zur Umsetzung einer digitalen Produktion beitragen. Auch die Modellhafte Umsetzung in Abschnitt 3 der Thesis macht deutlich, dass die technischen Möglichkeiten grundsätzlich gegeben sind und im Modell funktionieren. Dies kann jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass die Planung auf der grünen Wiese nicht den Normalfall als Implementierungsstrategie darstellt. Des Weiteren bedarf es auch der nötigen Infrastruktur, im Sinne einer ausreichenden Breitbandanbindung und einer entsprechenden Sicherheitsarchitektur.

4.2 Kritische Würdigung

Der im Rahmen der Recherche festgestellten Umfang der Thematik lässt Spielraum für weitere Fragestellungen. Hierzu zählen unter anderem Brownfield Szenarien und deren Lösung, sprich die Integration von konventionellen Produktionssystemen in eine CPS basierte Umwelt, da sie einen weitaus realitätsnäheren Ansatz darstellen. Dies könnte auch als Argument für die Theorie von Industrie 4.0 als einen evolutionären Prozess dienen. Unabhängig von dieser Fragestellung ist das gesamte Themengebiet der digitalisierten Produktion extrem umfangreich und weist viele verschiedene Facetten auf. Hinzu kommt, dass es sich um ein sehr dynamisches Themengebiet handelt, welches konstanter Veränderung unterliegt. Adaptives Auftragsmanagement ist ein wichtiger Teil der zu dieser Entwicklung beiträgt, jedoch würde es den disruptiven Charakter der Veränderungen in allen Wirtschaftsbereichen nicht hinreichend würdigen. Ferner wären auch konkrete Implementierungsstrategien für Unternehmen ein Thema für weiterführende Untersuchungen. Diese Fragen konnten aber im Rahmen dieser Thesis nicht behandelt werden, da diese sonst den Umfang erheblich erweitert hätten.

4.3 Ausblick

Für den deutschen Maschinenbau ist die Entwicklung von Cyber-Physischen Systemen und kommerzielle Vermarktung dieser Systeme eine der Kernaufgaben für die kommenden Jahrzehnte. Die Einführung von Cyber-Physischen Systemen im industriellen Maßstab bringt eine weitere Herausforderung an die Produktion der Zukunft mit sich. Dies soll jedoch keine Zukunftsprognose sein, sondern erneut unterstreichen von welcher zentraler Bedeutung die künftigen Entwicklungen sein werden. An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass erst die Zeit zeigen wird, ob die digitale Produktion ein Erfolg wird, oder ob auch die Industrie 4.0 das Schicksal von CIM ereilen wird. Allerdings hat auch CIM seinen Einfluss hinterlassen. Das Ziel einer vollständig selbstständigen Produktion ist jedoch in jedem Fall zu ambitioniert und wird eine Vision bleiben.

„Verschwenden Sie keinen Gedanken ans Morgen, das ist ihr gutes Recht. Aber beklagen Sie sich nicht, wenn es plötzlich da ist und Sie haben nichts mitzureden.“
(Brunner 1985, S. 103).

LITERATURVERZEICHNIS

Ahrens, Volker (2012): Inflation Industrieller Revolutionen. In: *Productivity Management* 17 (5), S. 30–31.

Bakhkhat, Sidi; Böde, Franziska; Brucke, Matthias; Degen, Knut; Ebert, Dr. Christof; Einsiedler, Ingrid et al. (2010): Eingebettete Systeme –Ein strategisches Wachstumsfeld für Deutschland. Anwendungsbeispiele, Zahlen und Trends. Hg. v. Stephan Ziegler und Anne Müller. BITKOM e.V. Berlin.

Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael ten; Vogel-Heuser, Birgit (Hg.) (2014): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg (SpringerLink). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-04682-8>.

Bedenbender, Dr. Heinz; Bentkus, Alexander; Epple, Prof. Dr. Ulrich; Hadlich, Dr. Thomas; Hankel, Martin; Heidel, Roland et al. (2017): Beziehungen zwischen I4.0-Komponenten – Verbundkomponenten und intelligente Produktion. Fortentwicklung des Referenzmodells für die Industrie 4.0–Komponente SG Modelle und Standards. Ergebnispapier. Hg. v. Plattform Industrie 4.0. Bundesministerium für Wirtschaft. Berlin.

Bettenhausen, Dr.-Ing. Kurt D.; Kowalewski, Dr.-Ing. Stefan (2013): Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation. Hg. v. VDI/ VDE-Gesellschaft Mess- und Automtisierungstechnik. Düsseldorf.

Brunner, John (1985): Der Schockwellenreiter. 3. Auflage. München: Wilhelm Heyne Verlag (Heyne Science Fiction Fantasy, 06/3667).

Fridgen, Gilbert (2017): Blockchain zum Verstehen und Mitreden - Erklärungen von Prof. Dr. Gilbert Fridgen: Fraunhofer Institut für Angewandte Informationstechnik FIT. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=2LFENhlwSvI>, zuletzt geprüft am 10.03.2018.

Kagermann, Henning; Wahlster, Wolfgang; Helbig, Johannes (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Büro der Forschungsunion. Berlin.

Kontny, Henning; Wagner, Julia; Wagenitz, Axel; Möbius, Jan; Royla, Stefan (2017): Verkürzung der Auftragsdurchlaufzeiten durch cyber-physische Systeme. In: *Productivity* 22 (2), S. 33–35.

Laas, Sander; Theuer, Hanna (2017): CPS-Integration im Brownfield. In: *Productivity* 22 (2), S. 15–17.

Manzei, Christian; Schleupner, Linus; Heinze, Ronald (Hg.) (2017): Industrie 4.0 im internationalen Kontext. Kernkonzepte, Ergebnisse, Trends. 2., neu bearbeitete und erweiterte Ausgabe. Berlin, Offenbach, Berlin, Wien, Zürich: VDE Verlag GmbH; Beuth. Online verfügbar unter <https://content-select.com/de/portal/media/view/58a1b07c-9f54-4f96-80ea-0d61b0dd2d03>.

Plattform Industrie 4.0 (Hg.) (2015): Umsetzungsstrategie Industrie 4.0. Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0. Unter Mitarbeit von Wolfgang Dorst. BITKOM e.V.; VDMA e.V.; ZVEI e.V. Berlin, Frankfurt am Main.

Reinhart, G.; Engelhardt, P.; Geiger, F.; Scholz-Reiter, B.; Thoben, K.-D.; Gorltd, C. et al. (2013): Cyber-Physische Produktionssysteme - Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerung durch die Vernetzung intelligenter Systeme in der Fabrik. In: *wt Werkstattstechnik online* 103 (2), S. 84–89.

Rücker, Thomas (2006): Optimale Materialflusssteuerung in heterogenen Produktionssystemen. 1. Aufl. s.l.: DUV Deutscher Universitäts-Verlag (Schriften zum Produktionsmanagement). Online verfügbar unter <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=751058>.

Sauer, Olaf (2017): PLUGandWORK - Maschinen und Komponenten für Industrie 4.0 befähigen. In: *Productivity* 22 (2.2017), S. 22–24.

Seifert, Wolfgang; Decker, Josef (Hg.) (2005): RFID in der Logistik. Erfolgsfaktoren für die Praxis ; Dokumentation des BVL-Arbeitskreises "RFID in der Logistik". Bundesvereinigung Logistik. Hamburg: Dt. Verkehrs-Verl. (Schriftenreihe Wirtschaft & Logistik).

Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael ten (Hg.) (2017a): Handbuch Industrie 4.0. Bd. 1: Produktion. 2., erweiterte und bearbeitete Auflage. Berlin: Springer Vieweg (Springer Reference Technik). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-45279-0>.

Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael ten (Hg.) (2017b): Handbuch Industrie 4.0. Bd. 2 : Automatisierung. 2., erweiterte und bearbeitete Auflage. Berlin: Springer Vieweg (Springer Reference Technik). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-53248-5>.

Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael ten (Hg.) (2017c): Handbuch Industrie 4.0. Bd. 3: Logistik. 2., erweiterte und bearbeitete Auflage. Berlin: Springer Vieweg (Springer Reference Technik). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-53251-5>.

Winkler, Hannes (2010): Beitrag zur Positionierung von Kundenentkopplungspunkten in Produktionsnetzwerken. Zugl.: Dortmund, Techn. Univ., Diss., 2009. Dortmund: Verl. Praxiswissen (Unternehmenslogistik).

Zbib, Nadine; Raileanu, Silviu; Sallez, Yves; Berger, Thierry; Trentesaux, Damien (2008): From passive products to Intelligent products: The augmentation module concept. 5th International Conference on Digital Enterprise Technology. University of Valenciennes and Hainaut-Cambrésis. Metz, Frankreich, November 2008. Online verfügbar unter http://scp-gdr-macs.cran.uhp-nancy.fr/Metz%20Nov%202008/presentation_gdrmacs%20Nadine%20ZBIB.pdf, zuletzt geprüft am 13.03.2018.

Zühlke, Detlef; Reinhart, Gunther; Scholz-Reiter, Bernd; Wittenstein, Manfred (Hg.) (2017): Intelligente Vernetzung in der Fabrik. Industrie 4.0 Umsetzungsbeispiele für die Praxis. Stuttgart: Fraunhofer-Verl.

5. Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Ich erkläre mich damit

einverstanden,

nicht einverstanden

dass ein Exemplar meiner Bachelor- (Master-) Thesis in die Bibliothek des Fachbereichs aufgenommen wird; Rechte Dritter werden dadurch nicht verletzt.

Hamburg, den

.....

(Lennart Lenzing)