Hochschule Ludwigshafen am Rhein
University of Applied Sciences

Fachbereich II MBA Logistik Management & Consulting

(Masterarbeit)

Industrie 4.0 – Eine logistische Herausforderung

vorgelegt von:

Björn Englert aus Berlin

Betreuer:
Prof. Dr. Wolfgang Müller
Bearbeitungszeitraum
von 10.02.2013 – 10.08.2014

Online-Fassung
Einige Abbildungen und Textauszüge wurden entfernt und kleinere Korrekturen vorgenommen.

Dieses Material steht unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International. Um eine Kopie dieser Lizenz zu sehen, besuchen Sie http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/.

Über diese Lizenz hinausgehende Erlaubnisse können Sie unter http://lizenzen.dislozierung.de erhalten.

http://www.dislozierung.de

ver. 2 (17.07.2015)

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung ... 6

2. Einführungen und Definitionen ... 7

2.1. Zur Begriffsbildung der industriellen Revolution und Industrie 4.0 ... 7
2.1.1. Hintergrund des Begriffes Industrie 4.0 ... 7
2.1.2. Begriff der Industriellen Revolution ... 8
2.1.3. Begriffsverwendung der Industriellen Revolution ... 10
2.1.4. Die 4. industrielle Revolution ... 12
2.1.5. Begriffsbestimmung Industrie 4.0 ... 14
2.1.6. Definition des Begriffes der Industrie 4.0 für diese Arbeit ... 15

2.2. Zur Theorie der Logistik ... 16
2.2.1. Theorie der Logistik im Allgemeinen ... 16
2.2.2. Logistik als Prozess und Darstellung im Logistikmodell ... 18
2.2.3. Werkzeuge und Managementansätze der Logistik ... 19
2.2.4. Einordnung der Industrie 4.0 in die Theorie der Logistik ... 19

3. Forschungsfeld Industrie 4.0 und Logistik ... 21

3.1. Akteure und Forschungsfelder ... 21
3.1.1. Politik und Interessenverbände ... 21
3.1.2. Privatwirtschaft ... 21
3.1.3. Forschung ... 21

3.2. Wirtschaftliches und gesellschaftliches Umfeld ... 22
3.2.1. Vorbemerkung zur Studienbetrachtung ... 22
3.2.2. Deutsche Wirtschaft im globalen Wettbewerb ... 22

3.3. Logistikwirtschaft ... 24
3.3.1. Abgrenzungsschwierigkeiten der Logistik ... 24
3.3.2. Wirtschaftliche Gesamtsituation der Logistikbranche ... 25
3.3.3. Veränderungstreiber in der Logistik ... 26
3.3.4. Konsequenzen für die Logistikwirtschaft ... 27
3.3.5. Strategieansätze der Logistikwirtschaft ... 29

3.4. Veränderungen mit Industrie 4.0 ... 30
3.4.1. Technologie- und Veränderungstreiber im industriellen Umfeld ... 30
3.4.2. Konvergenz von Entwicklungen ... 31
3.4.3. Embedded Systems CPS ... 32
3.4.4. Smart Factory ... 34
3.4.5. Robuste Netze, mobile Kommunikation und Sicherheit ... 35
3.4.6. Cloud-Technologien ... 36

3.5. Die Industrie 4.0 braucht eine neue Logistik ... 38
3.5.1. Logistik der nächsten Generation ... 38
3.5.2. Paradigmenwechsel Selbststeuerung und Integration ... 39

3.6. These ... 41

4. Lastenheft für die Logistik 4.0 42

4.1. Migrationsstrategie für die Logistik 4.0 42

4.2. Intralogistik 43
4.2.1. Organisation der innerbetrieblichen Logistik 43
4.2.2. Produktionslogistik 45
4.2.3. Beschaffung (Procurement) 46
4.2.4. Distribution 47
4.2.5. Wandel im Handel 48

4.3. Extralogistik 49

4.4. Unternehmensorganisation 50
4.4.1. Veränderung der Organisationsstrukturen 50
4.4.2. Software und Technik 50
4.4.3. Logistikcontrolling 52

4.5. Zusammenfassung 53

5. Lösungsansatz für die Logistik 4.0 55

5.1. Konzeptansatz 55
5.1.1. Vorüberlegungen 55
5.1.2. Konzeptansatz der Fraktalen Fabrik 55
5.1.3. Ansatz der fraktalen Selbststeuerung 57
5.1.4. Skalierung des Modells der fraktalen Fabrik 57
5.1.5. Vorgehensweise zur Umstellung 59

5.2. Paradigma der Logistik 4.0 60

5.3. Anwendungsbeispiel 61
5.3.1. Ansatz von Siemens mit dem TIA-Portal 61
5.3.2. Automatisierungsaufgabe am Beispiel einer Farbmischanlage 62
5.3.3. Betrachtung des Beispiels aus logistischer Sicht 63
5.3.4. Fertigungsbeispiel nach Industrie 4.0 65

6. Schlussbetrachtung und Diskussion 67

Literaturverzeichnis 68

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die Smart Logistics, eingebettet in das Umfeld des Internet der Dinge und Dienste ... 14
Abbildung 2: Ebenen der Logistik (nach Delfmann et al.) ... 16
Abbildung 3: Das SCOR-Modell (v.10) ... 19
Abbildung 4: Wichtigste deutsche Exporte 2013 ... 22
Abbildung 5: Gesamtwirtschaftliche Bedeutung der Logistik ... 23
Abbildung 6: Zusammensetzung der Logistikkosten der Industriebetriebe ... 24
Abbildung 7: Logistikmarktschätzungen seit 1995 ... 25
Abbildung 8: Technologiefelder der Industrie 4.0 ... 31
Abbildung 9: Konvergenz der Technologien ... 32
Abbildung 10: Schema eines CPS ... 33
Abbildung 11: Darstellung der Wertkette nach Porter ... 42
Abbildung 12: Auflösung der Automatisierungspyramide nach VDI ... 51
Abbildung 13: Selbstähnliche Fraktale ... 56
Abbildung 14: Topologie der Automatisierung ... 61
Abbildung 16: Modell der Farbmischanlage ... 63
Abbildung 17: Darstellung der Farbmischanlage im Wertstrom ... 64

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Lastenheft der Logistik für Industrie 4.0 54

1. Einleitung

Das Schlagwort Industrie 4.0 elektrisiert derzeit die deutsche Industrie. Nicht zuletzt als Leitmotto für die weltgrößte Industriemesse hat die „industrielle Revolution“ die Titelseiten der Magazine und Fachmedien erobert. Dabei verbinden sich hiermit ganz unterschiedliche Vorstellungen und fast alles im industriellen Umfeld soll derzeit mit Industrie 4.0 zu tun haben.

Abseits des öffentlichen Rummels zeigt sich die Unschärfe im Umgang mit dem Wandel in der Industrie. Festzustehen scheint, dass die mit immer leistungsfähigerer Computertechnik ausgestattete Fertigung deren Anwendungsmöglichkeiten vielfältiger werden lassen und bislang gängige Konzepte der Produktion zumindest in Frage stellen. Aber wie genau diese Konzepte aussehen und was genau mit vernetzter, intelligenter Fertigungstechnik anzufangen ist, ist alles andere als klar. Die Technik hat die Theorie überholt, es fehlen Konzepte und die dahinter stehenden Modelle für den Umgang mit den neuen Möglichkeiten Cyber-Physikalischer Systeme.

Die meisten Betriebe arbeiten noch nach konventionellen Methoden. Lediglich der Technikeinsatz hat sich geändert. Die Großen im Markt – allen voran die Automobilhersteller – sind bereits einen Schritt weiter und integrieren ursprünglich technisch und organisatorisch getrennte Bereiche der Produktplanung, -entwicklung und der Fertigung. Dennoch folgen auch ihre Konzepte den tradierten Modellen, die aus den Globalisierungsherausforderungen der 1990er Jahre entwickelt wurden. Der Individualisierung als Megatrend wird mit Variantenvielfalt begegnet, so ist nach wie vor die Serienfertigung und das massenproduzierte Produkt Kern aller produktionstechnischen Bemühungen.

Die Aufgaben der Logistik haben sich parallel zu diesen Entwicklungen stetig erweitert. So ist die Logistik heute nach weitem Verständnis eine Querschnittsfunktion, der umfassende Aufgaben in der Planung, Organisation und Koordination der Waren- und Informationsflüsse über Unternehmensgrenzen hinweg zukommen. Die Logistik liefert die Organisationskonzepte für die reibungslose Produktion von Gütern jeder Art, von ihr müssen auch die Antworten auf die Fragen kommen, die sich mit den neuen Möglichkeiten einer Industrie 4.0 stellen.

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten, das Themengebiet der Industrie 4.0 aus logistischer Sicht zu erschließen. Dazu wird der häufig verwendete Begriff der industriellen Revolution besprochen und eingeordnet, sowie die Bezüge zur Industrie 4.0 beleuchtet. Es erfolgt eine Überleitung in das Gebiet der Logistik mit Darstellung der Schwierigkeiten, welche die Logistik und eine Theoriebildung zur Logistik noch heute haben. Darüber hinaus untersucht die vorliegende Arbeit anhand eines Beispiels, ob Überlegungen zur Industrie 4.0 mit den heute verfügbaren technischen Möglichkeiten konkret in die Praxis übersetzt werden können. Ferner wird die Frage diskutiert, ob es einer neuen Logistik bedarf, um den Herausforderungen der Industrie 4.0 zu begegnen.

Braucht es eine Logistik 4.0?

2. Einführungen und Definitionen

2.1. Zur Begriffsbildung der industriellen Revolution und Industrie 4.0

2.1.1. Hintergrund des Begriffes Industrie 4.0

Industrie 4.0 hat sich binnen kürzester Zeit zu einer omnipräsenten Bezeichnung in den Fachpublikationen entwickelt und ist nicht zuletzt als Leitmotto für die Industriemesse 2014 in Hannover[1] einem größeren öffentlichen Publikum bekannt geworden. Auch der Weltkonzern Siemens, einer der führenden Anbieter im Bereich der Automationstechnik für die Industrie hat in seiner Presse- und Analystenkonferenz vom 07. Mai 2014 die Neuausrichtung des Konzerns auf die Schwerpunkte Elektrifizierung, Automatisierung und Digitalisierung unter dem Stichwort „Vision 2020“ bekanntgegeben[2]. Der Konzern richtet sich damit auf die wesentlichen Felder der unter Industrie 4.0 beschriebenen Technologien aus.

Der Begriff Industrie 4.0 ist eine Wortschöpfung, deren Ursprung auf den gleichnamigen Arbeitskreis eines Forschungsprojektes der Forschungsunion[3] zurückgeht, welcher im Rahmen der Hightech-Strategie (HTS) der Bundesregierung gefördert wurde[4]. Die Arbeitsgruppe der Forschungsunion hat hierzu im Oktober 2012 ihren Forschungsbericht mit dem Titel „Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0“ vorgelegt[5].

Häufig wird in diesem Zusammenhang von einer industriellen Revolution gesprochen, die gerade beginne und genauer betrachtet sei dies nun die vierte industrielle Revolution nach jenen durch die Computer- und Kommunikationstechnik, der Elektrifizierung sowie der Erfindung der Dampfmaschine. Die Nummerierung der Revolutionen spiegelt dabei den durch Informationstechnik geprägten Zeitgeist wider und erklärt den Begriff Industrie 4.0 angelehnt an die Versionierung (Releases) von Software.

Bevor im Rahmen dieser Arbeit auf die vierte industrielle Revolution und dem daraus abgeleiteten Begriff der Industrie 4.0 sowie deren Bedeutung für die Logistik eingegangen wird, sollen zunächst die Begriffe sortiert und erläutert werden. Während im Umfeld der computertechnologisch geprägten Fertigung von der vierten Industriellen Revolution gesprochen wird, existieren auf anderen Feldern weitere Beschreibungsansätze, die sich z.B. auf die Definition von industriellen Revolutionen aus dem Zusammenhang mit Veränderung von Energieregimen beziehen[6] bzw. den Begriff der industriellen Revolutionen nur im Gesamtzusammenhang mit wirtschaftlichen, politischen und gesellschaftlichen Veränderungen akzeptieren[7]. Auch der Zählerstand bei den Revolutionen ist uneinheitlich. In der Literatur finden sich unterschiedliche Einschätzungen zur Klassifizierung und semantischen Ordnung von industriellen Revolutionen. *Rifkin* beschreibt die aktuellen Veränderungen als die Dritte industrielle Revolution[8], welche das Ende des Ölzeitalters markiere, *Ziegler* problematisiert bereits den Begriff der zweiten industriellen Revolution und akzeptiert daher nur für die erste Phase der gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Umwälzungen im 18. Jahrhundert die Bezeichnung Revolution[9]. Die Definitionsansätze in der Literatur sind dabei aber nicht komplett widersprüchlich, sondern nehmen vielmehr unterschiedliche Sichten auf den Begriff der industriellen Revolution ein. Im folgenden Abschnitt soll die Begriffsverwendung der Industriellen Revolution daher zur Herstellung eines Grundverständnisses für diese Arbeit erläutert werden.

---

1 Auf der Hannovermesse 2011 stellte sich die Initiative „Industrie 4.0“ erstmalig vor. Vgl. Kagermann et al., 2011, S. 3
Die Hannovermesse 2014 verlief unter dem Leitmotto „Industrie 4.0“. Vgl. Ciupek, 2014b, S. 1

2 Vgl. SIEMENS AG, 2014a

3 Die Promotorengruppe ist auch nach Vorlage des Berichtes noch aktiv und u.a. in der Arbeitsgruppe Industrie 4.0 der gleichnamigen Plattform, einem Zusammenschluss mehrerer Branchenverbände aktiv. Vgl. Promotorengruppe, 2014

4 Das Forschungsprojekt zur Industrie 4.0 ist eines der sogenannten „Zukunftsprojekte“ aus dem Forschungsprogramm „Hightech-Strategie (HTS)“ der Bundesregierung. Ziel der Hightech-Strategie ist dabei die ressortübergreifende Bündelung von Forschungsaktivitäten, die mit jeweiligen konkreten Zielsetzungen verbunden sind. Vgl. Hightech-Strategie, 2014; BMBF, 2012b

5 Vgl. Kagermann et al., 2012. Dabei handelt es sich um eine Vorabversion.
Zum Schlussbericht: Vgl. Kagermann et al, 2013

6 Vgl. Rifkin, 2014

7 Vgl. Ziegler, 2012

8 Vgl. Rifkin, 2014, S. 22ff.

9 Vgl. Ziegler, 2012, S. 101ff.

2.1.2. Begriff der Industriellen Revolution

Im Umfeld der Veröffentlichungen zur „Industrie 4.0“ wird vorwiegend auf die technologisch-induzierten Veränderungen eingegangen und dabei vor allem auf die Vernetzung und Automatisierung von Fertigungsprozessen fokussiert[10]. Der Blick kann aber auch aus einer ganz anderen Perspektive erfolgen. *Rifkin* sieht beispielsweise die Veränderungen der Energieversorgung weg von zentral organisierten, auf fossilen Energieträgern basierenden Versorgungssystemen hin zu dezentral, selbstorganisierten „grünen“ Energien (regenerative und umweltfreundliche Energien) und die Kommunikationstechnologien als die maßgeblichen Treiber der aktuellen industriellen Revolution. Diese sei demnach nur möglich, weil sich auch das Energieregime ändert[11], technologische Innovationen allein vermögen nach seiner Ansicht keine Revolution auszulösen.

Kennzeichen einer (industriellen) Revolution sind grundlegende Veränderungen, die nicht nur einen Teil einer Branche, Industrie oder Gesellschaft betreffen, sondern vielmehr alle Bereiche gesellschaftlichen Lebens und der Ökonomie verändern und neu ordnen[12]. Die Verwendung des Begriffes der industriellen Revolution lässt sich bis in das 19. Jahrhundert rückverfolgen, bspw. im Werk „Principles of Political Economy“ (1848) von *Stuart Mill*[13] sowie in „Lectures on the industrial revolution of the 18th century in England“ (1894) von *Toynbee*[14]. Hierin werden die Auswirkungen durch technologische Neuerungen auf den Arbeitsalltag der Menschen und die gesamte Gesellschaft als revolutionär beschrieben und der Begriff der Revolution im Zusammenhang mit volkswirtschaftlichen und technologischen Veränderungen verwendet[15].

Mit den Veränderungen der Produktionsarbeit gingen in der Vergangenheit auch große gesellschaftliche Veränderungen einher (z.B. Wanderungsbewegungen in die Städte hin zur Arbeit), die selbst auch Auswirkungen auf die Organisation des Staates haben können[16]. Im Rahmen dieser Arbeit sollen die sozialwissenschaftlichen Diskussionen über die Begrifflichkeiten, deren Anwendung sowie die unterschiedlichen Wertungen nicht betrachtet werden. Festzuhalten bleibt, dass auch der Begriff der industriellen Revolution in seiner sozialwissenschaftlichen Bedeutung und richtigen Anwendung nicht unumstritten ist. Die Einteilung in verschiedene Phasen der Industrialisierung und deren Benennung ist daher je nach Quelle unterschiedlich. Im Zusammenhang mit der Behandlung der Industrie 4.0 wird häufig in die Unterteilung in eine erste, zweite und dritte industrielle Revolution vorgenommen[17]:

Die 1. Industrielle Revolution: Gekennzeichnet ist diese Phase durch die zunehmende Mechanisierung der Produktion und die Verbreitung der Dampfmaschine, ausgehend von der Textilindustrie Großbritanniens Ende des 18.Jahrhunderts. Es entstehen Fabriken, deren Arbeitsplätze zunehmend die vormals protoindustrielle[18] Arbeitsweise ersetzen[19]. Mehrere Maschinen (meist Webstühle) können von einem einzelnen Arbeiter bedient werden[20]. Holz und Kohle dominieren zu dieser Zeit als Energieträger, die ersten Industrien siedeln in der Nähe der Rohstoffvorkommen. Erst mit der Erfindung der Eisenbahn und dem sukzessiven Ausbau von Streckennetzen konzentrieren sich die Industrien in den Städten. Mit der Telegraphentechnik entlang der Bahnstrecken entsteht ein grobmaschiges Kommunikationsnetz, das erstmals über große Distanzen reicht und den schnellen Austausch von Informationen ermöglicht.

Die 2. industrielle Revolution: Mit der Entwicklung des Dynamo- und des Verbrennungsmotors werden mehrere Energiequellen in einer Fabrik möglich. Die vor allem von Henry Ford betriebene Fließbandfertigung und die von Frederic Taylor erforschte und entwickelte Konzeption der Arbeitsteilung begründen die nächste Revolutionsstufe der Industrialisierung. Ausgehend von den USA geht diese Entwicklung nach dem Ersten Weltkrieg mit zunehmender Automatisierung und dem Übergang

---

10 Vgl. Kagermann et al., 2013, S. 17f.
11 Vgl. Rifkin, 2014, 30f.
12 Vgl. Schubert, 2011
13 Vgl. Mill, S., 1848
14 Vgl. Toynbee, A., 1894
15 Eine abschließende Betrachtung der Begriffsentstehung und erstmaligen Verwendung wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.
16 Vgl. Ziegler, 2012, S. 129ff.
17 Vgl. Gausemeier, 2014, S. 4; Kagermann et al., 2013, S. 17;
Anmerkung: Viele der Veröffentlichungen zum Thema Industrie 4.0 zitieren die vier Stufen der industriellen Revolution mit Nennung der DFKI als Autorin. Vorstufen dieser Darstellung finden sich ebenfalls in Präsentationsunterlagen von Prof. Wolfgang Wahlster. Die exakte Urheberschaft für die Einteilung der Industriellen Revolution in vier Stufen konnte bis zum Abschluss dieser Arbeit nicht geklärt werden.
18 Hierunter wird im Allgemeinen die häusliche Arbeit am eigenen Hof, innerhalb der Familienstrukturen verstanden. Die Herstellung von Erzeugnissen diente hierbei der Selbstversorgung sowie dem räumlich begrenzten lokalen Handel. Vgl. Scheuplein, 2006 und darin zitierte Literatur.
19 Vgl. Liedtke, 2012, S. 19
20 ebenda, S. 32ff.

zur Massenfertigung einher. Parallel vollzieht sich die Elektrifizierung der Städte und Haushalte. Öl und petrochemische Produkte lösen Holz und Kohle als Energieträger ab und verdrängen die Dampfmaschine. Das massengefertigte Automobil, welches mit der von Ford eingesetzten Fließfertigung für breite Käuferschichten erschwinglich wird, ersetzte die Fuhrwerke als bis dahin gebräuchlichste Transportmittel. Neben dem weiter voranschreitenden Ausbau der Verkehrsinfrastruktur erfolgt auch der Ausbau der Kommunikationsstrukturen, die Telegraphenverbindungen weichen den Telefonnetzen mit immer feingliedriger Ausprägung.

Die 3. industrielle Revolution: Als Beginn der dritten Stufe wird der Einzug der Computertechnik in der Fertigung gegen Ende der 1970er Jahre angesehen[21]. Vormals festverdrahtete Maschinen[22] konnten durch den zunehmenden Einsatz von intelligenter Steuerungstechnik flexibler und schneller auf geänderte Anforderungen eingestellt werden. Erste Ansätze waren auf Lochkarten gespeicherte Maschinenbewegungen, die von der Maschine eingelesen und ausgeführt wurden und den Ursprung der NC-Technik begründen[23]. Der Trend der Computerisierung führte mit der CNC-Technik[24] zu immer besseren Verfahren und hält dabei bis in die heutige Zeit an. Die Entwicklungen münden heute in einer zunehmenden Digitalisierung der Produktion mit vollständiger Vernetzung der Fertigung untereinander. Mit der Internettechnologie und mobilen Kommunikationstechniken bieten sich zudem immer mehr Möglichkeiten, die Vernetzung der Unternehmen untereinander und mit ihrer Umgebung durchzuführen und ermöglichen dezentrale Fertigungskonzepte[25]. Neben dem wie in den vorherigen industriellen Revolutionen beschriebenen Wandel in der Infrastruktur (hier die zunehmende Bedeutung der Kommunikationsnetze) und den Veränderungen in der Produktionsweise (Automatisierung) lässt sich auch im Energiesektor mit der (noch zögerlichen) Abkehr von fossilen Energieträgern hin zu erneuerbaren Energien ein grundlegender Wandel feststellen[26].

Zu beachten ist hierbei der Unterschied in der europäischen und der US-amerikanischen Perspektive auf die industriellen Revolutionen, begründet aus den unterschiedlichen geschichtlichen, geographischen und wirtschaftlichen Gegebenheiten der Länder. Den deutlichsten Unterschied markiert der Erste Weltkrieg, der für die Entwicklung Europas gravierendere Konsequenzen als für die USA hatte. Aber auch bei Betrachtungen der Industrialisierung des 18. und 19. Jahrhunderts in den einzelnen europäischen Ländern stellen sich deutliche Unterschiede in den Verläufen der industriellen Entwicklung und des Zeitpunktes heraus. Eine allgemeine zeitliche Einordnung der industriellen Revolutionen (besonders der Ersten) lässt sich daher für Europa nicht treffen. Vielmehr müssen hierzu die Länder und bei näherer Betrachtung sogar die einzelnen Regionen des jeweiligen Landes betrachtet werden[27]. Vor diesem Hintergrund sind die zeitlichen Einordnungen der industriellen Revolutionen also eher als grobe Zeitmarken zu betrachten.

Wie bereits weiter oben angesprochen, ist die Einteilung in bislang drei industrielle Revolutionen nicht unumstritten. Diskutiert wird hierbei u.a., dass nicht die technische Innovation, wie die Erfindung der Dampfmaschine und später der Elektromotoren und Kommunikationstechnik allein eine industrielle Revolution begründeten. Vielmehr wird das Zusammentreffen verschiedener Veränderungsprozesse in Technik, Gesellschaft, Politik und Wirtschaft als Initiator einer industriellen Revolution gesehen[28].

Neben der unterschiedlich gewichteten Bedeutung der Energiefrage herrscht aber Übereinstimmung in der Betonung der Bedeutung der Rolle des Staates. Es wird herausgestellt, dass es gerade auch staatlicher Einflussnahme geschuldet ist, Veränderungsprozesse maßgeblich beschleunigen aber auch bremsen zu können[29]. In der europäischen Perspektive bedeutet dies vor allem den Abbau von Zollschranken und den Einstieg in den Ausbau von Schienen- und Straßennetzen. In der Phase der zweiten Industriellen Revolution wären Investitionsvorhaben dieser Größe von der Privat-

---

21 Vgl. Kagermann et al., 2013, S. 18

22 Hierunter sind manuell einzurichtende Maschinen zu verstehen, deren Einstellungen (Parameter) direkt an der Maschine, ggfs. mechanisch vorgenommen werden müssen. Vgl. Kief et al., 2013, S. 29ff.

23 „NC steht für ‚Numerical Control', auf deutsch: Steuern mit Zahlen. Speziell bei Werkzeugmaschinen versteht man darunter die direkte Eingabe der Maßzahlen des formenden Werkstückes. Heutige numerische Steuerungen sind unter Verwendung von Mikroprozessoren aufgebaut und werden als CNC, d.h. Computerized Numerical Control, bezeichnet. Mikroprozessoren verfügen über eine so hohe Rechenfrequenz, dass 1 Prozessor ausreicht, um mehrere Maschinenachsen simultan und mit höchster Präzision zu steuern. [...] CNC-Maschinen sind frei programmierbare Maschinen, d.h. die Bewerbungsabläufe der einzelnen Achsen werden über austauschbare NC-Programme vorgegeben." Zitiert aus Kief et al., 2013, S. 49

24 ebenda, S. 49

25 Vgl. Rifkin, 2014, S. 68f.

26 Vgl. REN21, 2014a; REN21, 2014b

27 Vgl. Ziegler, 2012, S. 10ff.

28 Vgl. Ziegler, 2012, S. 1

29 ebenda, S. 15ff.

wirtschaft allein nicht zu bewerkstelligen gewesen. Auch die rechtlichen Rahmenbedingungen z.B. in der Schaffung der Kapitalgesellschaften, insbesondere der Aktiengesellschaft (Aktiengesetz in Deutschland von 1843) und dem Aufbau eines verlässlichen Währungsregimes[30] schufen erst die Rahmenbedingungen für privatwirtschaftliches Risiko und den Zugang zum erforderlichen Investitionskapital für Großprojekte wie den Eisenbahnbau[31].

Gleichzeitig wird betont, dass sich alle sogenannten Revolutionen nicht abrupt innerhalb kurzer Zeit vollzogen, sondern regional sehr unterschiedlich in Ausprägung und Tempo und dabei stets über mehrere Generationen erstreckten[32]. Dabei wird auch die Ansicht vertreten, dass die Industrialisierung der „schwerindustriellen Phase“[33] längst noch nicht abgeschlossen scheint. Bei globaler Betrachtung sind beispielsweise China und die lateinamerikanischen Staaten noch mitten in der zweiten Industrialisierungsphase, die in Europa, Japan und den USA bereits durchlaufen ist. Letztere scheinen dabei sogar bereits am Ende der dritten Phase und im Übergang zu einer neuen Phase zu stehen[34].

Die hier zitierten Autoren kommen trotz unterschiedlicher Beurteilungen der industriellen Revolutionen zu ähnlichen Schlussfolgerungen in ihrer Charakterisierung. Sie sehen das Zusammentreffen mehrerer Disziplinen als Auslöser industrieller Revolutionen[35]. Der von *Rifkin* beschriebene Zusammenhang von Energieversorgung, Transportwesen /Mobilität und Kommunikationsstrukturen[36] findet sich ebenso bei *Ziegler*, auch wenn dieser nicht explizit darauf abstellt [37]. Allerdings lehnt *Ziegler* bereits die Begrifflichkeit der „Zweiten Industriellen Revolution“ mit der Begründung ab, dass die Veränderung der Zusammensetzung eines „Industriellen Führungssektorkomplexes“ z.B. beim Übergang von der stahl- und kohlegeprägten Industriephase zur elektro-, petrochemisch dominierten und später der von Automatisierung und Massenfertigung gezeichneten Industriephase lediglich den technischen Fortschritt aber keine industrielle Revolution begründen[38]. Optimierung, Innovationen und Evolution der eingesetzten Technik, als auch die Beschleunigung wirtschaftlicher Prozesse begründen danach allein keine industrielle Revolution. Er spricht stattdessen von den „neuen Industrien“[39] und teilt die Industrialisierung in die drei Phasen der „leichtindustriellen Phase“ (1770 – 1840), der „schwerindustriellen Phase“ (1830 – 1890) und der „neuen Industrien“ (1880 – 1914)[40].

2.1.3. Begriffsverwendung der Industriellen Revolution

Es bleibt vermutlich späteren Generationen an Historikern überlassen, ob sich die aktuellen Veränderungen, die unter Industrie 4.0 aufgeführt werden, als revolutionär einstufen lassen und die Begriffsverwendung der industriellen Revolution tatsächlich berechtigt ist. Zumal dann noch zu klären wäre, um welche Stufe der industriellen Revolution es sich dann handelt. So bleibt hier festzuhalten, dass der Begriff der vierten industriellen Revolution zwar nicht irreführend und kein reiner Marketingbegriff ist, aber unter sozialwissenschaftlichen Betrachtungspunkten (Verwendung des Revolutionsbegriffes) einer genaueren Untersuchung bedarf. Darüber hinaus wird in der Literatur auch diskutiert, ob angesichts der langen Zeiträume der Umwälzungen anstelle einer Revolution nicht besser von einer Evolution zu sprechen wäre[41].

Wie beschrieben, verlaufen industrielle Revolutionen in den jeweils betrachteten Staaten oder Kontinenten nicht einheitlich. Zudem treten die Staaten auch zu unterschiedlichen Zeitpunkten in neue industrielle Phasen ein. Beispielhaft sind hier die Entwicklungen in den US-amerikanischen und europäischen Staaten angeschnitten worden, die Betrachtung würde bei Ausweitung auf weitere Staaten bspw. den BRICS-Staaten[42] zu einem noch heterogeneren Gesamtbild führen. Gemeinsamkeiten lassen sich dennoch feststellen und sollen hier zur Verdeutlichung nochmals aufgeführt werden. Unabhängig von mitunter nur regionalen Unter-

30 Durch Einführung des Goldstandards, Ende des 19. Jahrhunderts von Großbritannien ausgehend und anschließend in den europäischen Ländern übernommen. Vgl. Ziegler, 2012, S. 32f.
31 ebenda, S. 79ff.
32 ebenda, S. 10ff.
33 ebenda, S. 10ff.
34 ebenda, S. 1
35 Vgl. Liedtke, 2012, S. 29
36 Vgl. Rifkin, 2014, S. 9; ausführlich auf S. 46ff.
37 Vgl. Ziegler, 2012, S. 51ff., S. 101ff.
38 ebenda, S. 101ff.
39 ebenda, S. 101ff.
40 ebenda, S. 10ff.
41 Vgl. Sendler, 2013, S. 7f.
42 Brasilien, Russland, Indien, China und Südafrika

schieden in den Ländern lassen sich danach die folgenden maßgeblichen Rahmenbedingungen für den Verlauf industrieller Revolutionen feststellen:

- Die vorhandene Wirtschaftsstruktur des Landes und die sektorale Verteilung der wirtschaftlich Tätigen (primärer, sekundärer und tertiärer Sektor) bestimmen die Ausprägung der Veränderungen.
- Die gesellschaftlichen Verhältnisse, insbesondere Sozialwesen und staatliche Strukturen hemmen oder verstärken „revolutionäre" Veränderungen.
- Politische Aktivität oder Passivität und die Durchsetzungsfähigkeit staatlicher Maßnahmen können ebenfalls Entwicklungsprozesse beschleunigen oder hemmen.
- Geographische Begebenheiten bestimmen die Infrastruktur.
- Der Zugang zu Rohstoffen und Wissen entscheidet über die Geschwindigkeit von Veränderungen.
- Kriege und andere Katastrophen können die Entwicklung eines Landes beeinträchtigen oder sogar zurückwerfen.

Die genannten Bedingungen finden sich in unterschiedlichen Ausprägungen in allen vorherigen industriellen Epochen und hatten maßgeblichen Einfluss auf die Entwicklung der Regionen[43]. Zwar ist die jeweilige Merkmalsausprägung unterschiedlich, dennoch sind sie in jeder der genannten Revolutionen zu finden und können somit als Indikatoren herangezogen werden.

Eine abschließende Bewertung der Begriffsverwendung „Industrielle Revolution" soll im Rahmen dieser Arbeit gerade vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Bewertung und dem noch andauernden Diskurs in den Fachbereichen nicht vorgenommen werden. Es sei auf die zitierte Literatur verwiesen, die sich hierzu ausführlich auseinandersetzt. Für diese Arbeit von Relevanz ist, dass sich aus den unterschiedlichen Standpunkten in der Literatur Gemeinsamkeiten ableiten lassen, welche hier wiederum als Orientierungsrahmen dienen sollen. Die Begriffe „industrielle Revolution" als auch der weiter unten noch zu diskutierende Begriff der „Industrie 4.0" als die deutsche Definition der vierten industriellen Revolution oder „Advanced Manufacuturing 2.0" als die US-amerikanische Entsprechung sollten dabei stets vor dem Hintergrund der geschilderten Abgrenzungsproblematik und der unterschiedlichen Ansätze gesehen werden. Die Begriffe sollten daher nicht als definitorisch und allgemeingültig interpretiert werden, sondern müssen stets im jeweiligen Kontext betrachtet werden.

Darüber hinaus gilt es zu beachten, dass sich die bisherigen Betrachtungen dabei lediglich auf den US-amerikanischen, sowie den europäischen Wirtschaftsraum beziehen. Untersuchungen der Verwendung des Begriffes in den BRICS-Staaten, sowie den asiatischen Märkten wurden für diese Arbeit nicht herangezogen. In dieser Arbeit wird hierzu ausgehend von den herangezogenen Quellen eine Vergleichbarkeit der Revolutionen in allen Industrienationen unterstellt. Diese Länder befinden sich danach lediglich in unterschiedlichen Phasen der industriellen Entwicklung und damit auch in unterschiedlichen Phasen der industriellen Revolutionen und deren Ausprägung. Es erscheint dabei nicht unwahrscheinlich, dass gerade die sogenannten Schwellenländer sogar eine Revolutionsstufe überspringen können, wenn die Gegebenheiten (Technologie, Energie, Infrastruktur) dies ermöglichen. Dort sind in einigen Regionen beispielsweise die mobilen Kommunikationstechnologien bereits stärker entwickelt als die kabelgebundenen Technologien[44]. Gleiches gilt für darauf basierende Dienstleistungen[45].

Ähnliche Entwicklungen wären für die Erschließung durch erneuerbare Energien und damit verbundene, dezentrale Versorgungsstrukturen denkbar. Untersuchungen und detaillierte Beschreibungen sollen hierzu in dieser Arbeit aber nicht angestellt werden.

43 Vgl. hierzu die Darstellung am Beispiel Großbritanniens in der ersten Stufe der Industrialisierung in: Liedtke, 2012, S. 29ff.
44 Vgl. Dreier, 2013
45 So ist in Afghanistan das mobile Bezahlen mit dem Handy bereits etabliert, während in westlichen Industrienationen der klassische Filialbetrieb bzw. das Online-Banking vorherrschend ist. Vgl. Bartsch, 2013, S. 96ff.

2.1.4. Die 4. industrielle Revolution

Wie bereits im vorherigen Abschnitt dargestellt, sehen einige Autoren in den aktuellen Entwicklungen erst die dritte industrielle Revolution[46]. Vorwiegend mit der Begründung, die Computerisierung der Fertigungstechnik ab den 1970er Jahren sei als technische Evolution zu sehen und habe keine revolutionären Züge. Selbiges wird von einigen Autoren bereits für die sogenannte zweite industrielle Revolution angenommen (vgl. Abschnitt 2.1.3) Die gegensätzlichen Einschätzungen und der Diskurs hierzu wurde in dieser Arbeit angeschnitten und kann nicht abschließend behandelt werden. Herauszustellen bleibt, dass sich unabhängig von der Benennung der Entwicklungen große Gemeinsamkeiten in der Beschreibung der aktuellen Veränderungen finden.

Rifkin sieht die von ihm als dritte Stufe der Industriellen Revolutionen beschriebenen Veränderungen auf fünf Säulen begründet:[47]

- den Umstieg auf erneuerbare Energien,
- den Wandel zu Mikrokraftwerken, welche Energie dezentral vor Ort erzeugen,
- den Einsatz dezentraler Energiespeicher in Gebäuden und Knotenpunkten zur Speicherung von unregelmäßiger Energie,
- die Nutzung von Internettechnologie zur Organisation eines Energy-Sharing-Netzes (Intergrid) zu Verteilung lokaler Energieüberschüsse und
- die Umstellung der Transportflotten auf Steckdosen- und Brennstoffzellenfahrzeuge.

Diese Sicht ist damit vor allem durch die Konzentration auf die erneuerbaren Energien und Kommunikationsnetze und die hierfür erforderlichen dezentralen Infrastrukturen sowie den sich daraus ergebenen Auswirkungen auf Gebäude- und Transport-/Verkehrstechnik geprägt[48]. In weitergehenden Konzepten wie bspw. den „Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0“[49] nehmen die erneuerbaren Energien und die Implikationen hieraus ebenfalls eine bedeutende Rolle ein und sind als Konzept der „Smart Grids“ für die Stromnetze, als Konzept „Smart Buildings“ für die Gebäudetechnik und „Smart Mobility“ als Konzept für die Elektromobilität beschrieben[50].

Die Energiefrage ist hierbei allerdings nur ein Teilaspekt der aktuellen industriellen Revolution. Aus den neuen, dezentralen Energieerzeugungs- und Kommunikationsstrukturen leiten sich auch Konsequenzen für die Organisationsformen ab[51]. Zentralisierte Organisations- und Arbeitskonzepte werden demnach zunehmend lateralen[52] Konzepten weichen[53]. Die Digitalisierung ermöglicht zudem nicht nur neue Fertigungstechniken, sie strahlt gleichfalls auf die Organisationsstrukturen der Unternehmen ab. Wissensarbeiterinnen und -arbeiter sind in der Ausübung ihrer Tätigkeiten nicht mehr an einen bestimmten Ort gebunden und können ihrer Arbeit an unterschiedlichen Arbeitsplätzen und –orten im Unternehmen nachgehen. Voraussetzung ist dafür lediglich der Zugang zu schnellen Kommunikationsnetzen. Für die Fertigung scheinen sich – zumindest in einigen Branchen – ähnliche Tendenzen abzuzeichnen. Unter der Bezeichnung „Local Sourcing“ oder „near-shoring“ werden Leistungen global geplant und vernetzt, aber lokal organisiert und realisiert (vgl. Abschnitt 3.3.3). Dezentralisierung von Arbeit und deren Neuorganisierung ist daher eine der Hauptfolgen der Digitalisierung. Vergleichbare Visionen zur Dislozierung sind bereits in *Warnecke*[54] beschrieben und finden sich aktuell in einer Studie des Fraunhofer-Instituts wieder, darin beschrieben als das Konzept der Minifabriken[55].

Die „intelligente“[56] Fertigung stellt die Keimzelle der unter Industrie 4.0 beschriebenen Veränderungen dar. Die weiter voranschreitende Computerisierung der Produktionstechnik geht über in die Virtualisierung der Fertigung. Maschinen und ganze Fabriken werden mittels digitaler Werkzeuge am Computer entworfen und sind damit vollständig digital beschrieben. Die durchgängige Vernetzung ermöglich zudem jederzeitigen Zugriff und Auskunft über jede einzelne Komponente eines komplexen Fertigungsprozesses[57].

---

46 Vgl. Rifkin, 2014, S. 10
47 Vgl. Rifkin, 2014, S.48f.
48 Vgl. hierzu die Idee der „Internetze“: Vgl. Rifkin, 2014, S. 48
49 Vgl. Kagermann et al., 2013
50 ebenda, S. 23ff.
51 Vgl. Rifkin, 2014, S. 145ff.
52 Der Begriff dürfte hier am ehesten im Sinne von „verteilt, gestreut“ verstanden werden.
53 Vgl. Rifkin, 2014, S. 152
54 Vgl. Warnecke, 1992, S. 170
55 Vgl. Cuhls et al., 2009, 76f.
56 Zu den Eigenschaften solcher „intelligenter“ Systeme: Vgl. Gausemeier et al., 2013a, S. 49f.
57 Vgl. Geisberger, 2012, S. 54

Die Kommunikationstechnik wird durch den stetigen Ausbau der Mobilfunk- und Nahbereichsfunknetze (wie bspw. WLAN) immer flexibler einsetzbar.

Die für die vorherigen industriellen Revolutionen definierten Rahmenbedingungen (Abschnitt 2.1.3) lassen sich anhand der aktuellen Entwicklungen wiederfinden. Darin wurde definiert, dass sich industrielle Revolutionen auf alle Bereiche des gesellschaftlichen Lebens und Wirtschaftens auswirken. Diese sind anhand der Merkmale Technologie, Infrastruktur (geographisch, bautechnisch), Zugang zu Rohstoffen sowie Gesellschaftsstruktur zu identifizieren und finden sich mit ihren Entsprechungen auch in den aktuellen Entwicklungen wieder:

Infrastruktur: Entstehung und weiter voranschreitender Ausbau des Internets sowie mobiler Kommunikationstechnologien. Neben die in vorherigen industriellen Revolutionen sehr bedeutende Verkehrsinfrastruktur in der realen Welt tritt die virtuelle Infrastruktur der Daten- und Kommunikationsnetze. Straßen-, Schienen und Luftverkehrsnetze bleiben bedeutend, werden aber durch immer leistungsfähigere Datennetze ergänzt.

Zugang zu Rohstoffen: Dieser ist im globalisierten Handel in Friedenszeiten zumindest kein technisches Problem mehr. Wichtiger wird zunehmend die Ressource Wissen und der Zugang hierzu.

Geographische Begebenheiten: Deren Gewicht schwindet zugunsten der Bedeutung des Zugangs zu qualifizierten Personal, welches wiederum gleichzeitig Zugang zu guten Bildungssystemen und Wissensquellen hat.

Technologie: Computertechnik unterliegt einer stetigen Miniaturisierung und gleichzeitigen Zunahme an Leistung und Kapazitäten (Mooresches Gesetz[58]). Hinzu kommt ein stetiger Preisverfall. Hierdurch begünstigt, findet Computertechnik Eingang in immer mehr Geräte des Alltagslebens sowie in Maschinen der Fertigungstechnik[59].

Kommunikation: Was die Telegraphennetze der ersten industriellen Revolution und die Telefonnetze der zweiten industriellen Revolution waren, sind heute die Daten- und Kommunikationsnetze in Form des Internets. Sie heben geographische Distanzen auf und ermöglichen die globale Kollaboration von Unternehmen über Zeitzonen hinweg.

Gesellschaft: Hier zeichnet sich ein Split zwischen ortsgebundener und ortsunabhängiger Arbeit ab. Immer mehr Bereiche der Arbeitswelt lassen sich ortsunabhängig am Computer verbunden über das Internet ausführen.

Anhand der Punkte wird deutlich, dass die aktuellen Entwicklungen den Begriff einer industriellen Revolution rechtfertigen, wenngleich an dieser Stelle keine abschließende Untersuchung stattfinden kann. Festzuhalten bleibt, dass nicht nur einige, sondern alle Bereiche des gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Tuns von den Veränderungen betroffen und einem Wandel unterworfen sind. Dabei wird die Stärke des Wandels auch hier von den jeweiligen lokalen Bedingungen abhängen, ähnlich wie das bereits weiter oben für die vorherigen industriellen Revolutionen beschrieben wurde.

Die aktuelle industrielle Revolution ist dabei im Wesentlichen durch die folgenden Punkte charakterisiert:

- Digitalisierung
- Individualisierung von Produkten und Dienstleistungen
- Automatisierung der Produktion
- mobile Kommunikationstechniken
- Vernetzung von Menschen, Gütern und Maschinen im Internet der Dinge und Dienste
- Dezentralisierung von Arbeit und Produktion

Unabhängig von den beschriebenen Diskussionen zur Zählweise, soll auch in dieser Arbeit von der 4. Stufe der industriellen Revolution gesprochen werden. Die Zählweise ist dabei unerheblich für die folgenden Betrachtungen, soll aber zur Vermeidung von Irritationen und Missverständnissen der mehrheitlich verwendeten Einordnung nach übernommen werden. Basis für folgende Einführung des Begriffes der Industrie 4.0 ist die Annahme, einer aktuell stattfindenden industriellen Revolution.

58 Das sogenannte Mooresche Gesetz ist kein Gesetz im naturwissenschaftlichen Sinne, sondern beruht auf Beobachtungen von Gordon Moore, nach der sich die Leistungsfähigkeit von Computerchips in regelmäßigen Abständen verdoppelt. Seine These wurde in einem Zeitschriftenartikel im Jahr 1965 veröffentlicht und wenig später als das Mooresche Gesetz in breiter Öffentlichkeit diskutiert. Vgl. Moore, 1965

59 Vgl. Sendler, 2013, S. 39

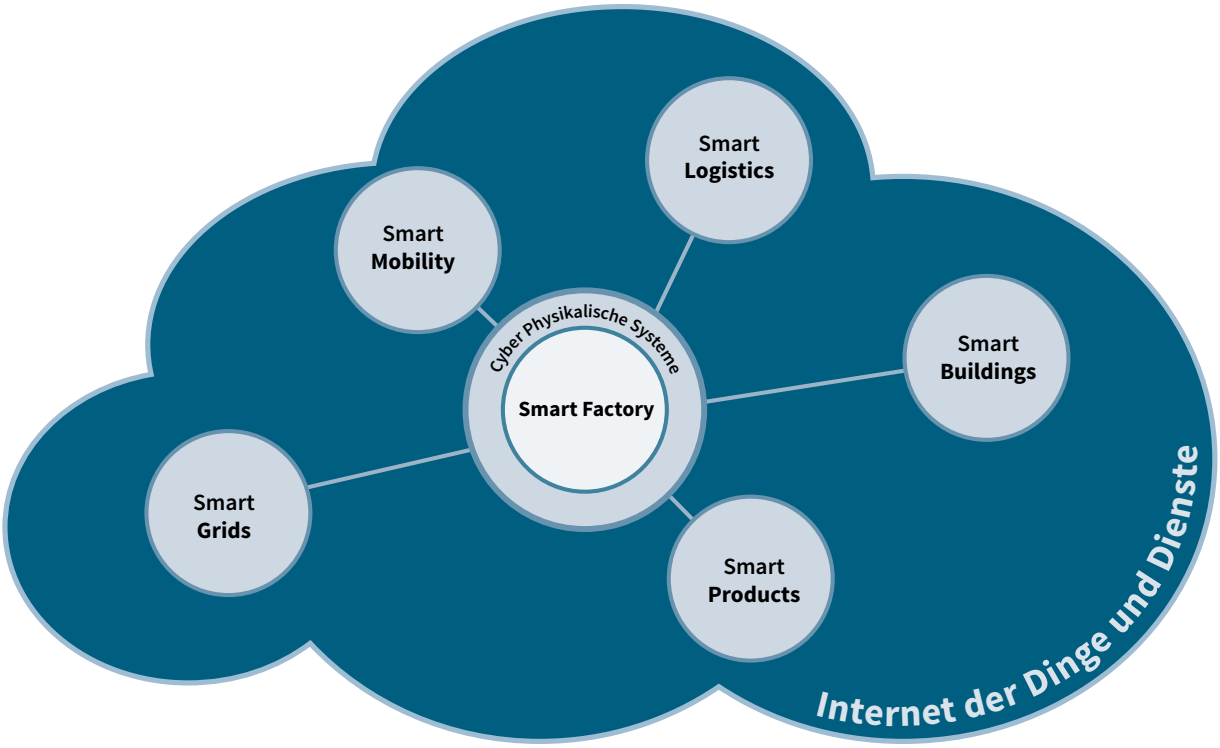


Abbildung 1: Die Smart Logistics, eingebettet in das Umfeld des Internet der Dinge und Dienste[66]

2.1.5. Begriffsbestimmung Industrie 4.0

Im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, sowie des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie wurden Studien (2009, „Nationale Roadmap Embedded Systems“[60]) und die bereits weiter oben genannten Handlungsempfehlungen im Rahmen der Hightech-Strategie vorgelegt (2013, „Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0“[61]), welche aktuell das öffentliche Verständnis von einer Industrie 4.0 prägen[62]. Dass dieser Begriff einen derartigen Hype erlebt, hat dabei selbst die Initiatoren überrascht[63]. Dabei ist die Bezeichnung „Industrie 4.0“ wie bereits eingangs erwähnt, eine rein deutschsprachige Wortschöpfung, die sich erst langsam über die Landesgrenzen hinaus verbreitet[64]. Dies liegt nicht zuletzt darin begründet, dass Deutschland als Weltmarktführer im Bereich des Anlagen- und Maschinenbaus eine gewisse Leitfunktion zugesprochen werden kann und der Begriff in den Medien weite Verbreitung gefunden hat. Zunehmend wird Industrie 4.0 auch als Marketingbegriff in der Produktwerbung eingesetzt während er parallel in einer stetig steigenden Anzahl von Studien und Fachartikeln sukzessive in der seiner Bedeutung klarer definiert wird. Neben der häufigen Nennung in den Massenmedien greifen gerade die Fach- und Regierungspublikationen den Begriff der Industrie 4.0 als thematische Klammer auf. In den wissenschaftlichen Einrichtungen wie den Fraunhofer-Instituten und den Hochschulen (vorwiegend in der Produktionsforschung und Logistik) wird der Begriff ebenso verwendet und diskutiert. Damit erscheint eine künftige starke Verbreitung und Akzeptanz des Begriffes der Industrie 4.0 und die Einordnung in eine Theorie der Logistik durchaus realistisch.

Die Industrie 4.0 berührt neben dem Kerngebiet der Industrie auch den Bereich der Gesundheits- und Energiewirtschaft sowie der Gebäude- und mobiler Kommunikationstechnik. Der Arbeitskreis der Plattform Industrie 4.0 hat die Logistik in seinem Abschlussbericht unter dem Stichwort „Smart Logistics“ gegenüber den anderen Industrie 4.0-Bereichen abgegrenzt[65]. Die Abgrenzung wird für diese Arbeit übernommen (Abbildung 1) und weiter unten noch ausführlich behandelt. Die Abbildung zeigt zugleich die Einordnung der verschiedenen Kernfelder in das alle Bereiche umschließende Internet der Dinge und Dienste. Deutlich wird hier-

60 Vgl. ZVEI, 2009
61 Vgl. Kagermann et al., 2013
62 Siehe hierzu Ausführungen zur Industrie 4.0 im Rahmen der Hightech-Strategie der Bundesregierung. Vgl. Hightech-Strategie, 2014
63 Vgl. Ciupek, 2014a, S. 2
64 Vgl. Weiss, 2014, S. 2
65 Vgl. Kagermann et al., 2013, S. 23
66 Abbildung angelehnt an Kagermann et al., 2013, S. 23

bei, dass es letztlich nicht nur um die Vernetzung von Logistik und moderner Fabrik geht, sondern auch in den anderen Kernfeldern über die gleichen Kommunikationsstrukturen untereinander und zwischen den Feldern miteinander kommuniziert wird, also Daten ausgetauscht werden. Als Kern dieser Industrie 4.0 wird die „Smart Factory" gesehen. Auf das Konzept wird ebenfalls weiter unten noch genauer eingegangen.

Keimzelle der Smart Factory ist die Fertigung, welche durch die zunehmende Computerisierung in den vergangenen Jahren immer intelligenter und Bestandteil stark vernetzter Infrastrukturen geworden ist. Diese sogenannten Cyber-Physikalischen Systeme (CPS)[67], die eine globale Vernetzung der intelligenten Fabriken ermöglichen[68] und die Konzepte der Digitalen Fabrik[69] laufen zusammen mit dem Ansatz der Smart Factory[70] und stellen damit die eigentliche Neuerung der industriellen Revolution im Blickpunkt der Produktionstechnik dar. Die Vernetzung aller Elemente der Automatisierungstechnik (Aktorik, Sensorik, Steuerungs- und Peripheriegeräte) über Netzwerktechnologien ermöglichen die „intelligente Produktion". Sensoren können jederzeit an jede Stelle ihre Meldungen geben, Aktoren können direkt adressiert und mit Steuerungsbefehlen beschickt werden. Maschinen können damit aus der Ferne konfiguriert und kurzfristig für den jeweiligen Anwendungszweck eingerichtet werden, ohne dass es hierzu eines manuellen Eingriffs direkt an der Maschine bedarf.

Während der Begriff der vierten industriellen Revolution die globale, also bereichsübergreifende Beschreibung vornimmt, reduziert der Begriff der Industrie 4.0 den Fokus auf die Fertigungstechnik. Die aus dem Wandel in der Fertigungstechnik induzierten Veränderungen werden dann in den Teilkonzepten mit dem Zusatz „Smart" beschrieben.

Dabei ist die Darstellung uneinheitlich. Häufig wird bei der Begriffsverwendung von Industrie 4.0 auf die Definition der Plattform Industrie 4.0 Bezug genommen. Diese sieht den Begriff Industrie 4.0 als Synonym für die vierte industrielle Revolution, bleibt in der Ausführung dann aber auf die Fertigungstechnik und die Organisation der Wertschöpfung fokussiert. Danach stellt die Industrie 4.0 einen konzeptionellen Ansatz zur Organisation und Steuerung der Wertschöpfungskette zur Realisierung von individuellen Kundenwünschen dar. Diese Organisation erfolgt durch die Vernetzung von „Menschen, Objekten und Systemen"[71]. Dabei bleiben Betrachtungen der gesellschaftlichen und politischen Aspekte zunächst außen vor. Gleichwohl erfordert die vierte industrielle Revolution auch Veränderungen in der Gesellschaft, bspw. im Bildungswesen[72]. Da die revolutionären Veränderungen aber ihren Ursprung in der Produktion haben, verwundert diese Fokussierung zunächst nicht. Vielmehr ist anzunehmen, dass sich die ebenfalls berührten Bereiche wie die Technik- und Sozialwissenschaften, sowie die Arbeitswissenschaften dieser Thematik ebenfalls annehmen werden, um Lösungen für die hier auftretenden Herausforderungen zu entwickeln. Es ist also nicht auszuschließen, dass sich im Verlaufe dieses Prozesses noch neue Begriffe bilden und ggfs. neben die bereits bekannten Bezeichnungen treten werden[73].

Im Rahmen dieser Arbeit soll daher der Begriff der industriellen Revolution die globalen, bereichsübergreifenden Veränderungen beschreiben, während sich der Begriff der Industrie 4.0 auf die Beschreibung der Veränderungen in der industriellen Wertschöpfung konzentriert.

2.1.6. Definition des Begriffes der Industrie 4.0 für diese Arbeit

Unter dem Begriff der Industrie 4.0 soll hier die zunehmende Computerisierung und Digitalisierung der industriellen Wertschöpfung verstanden werden, in der Cyber-Physikalische Systeme (CPS) die Basis der intelligenten Produktion beschreiben. Wesentlichstes Kennzeichen der Industrie 4.0 ist die Aufhebung starrer und zentral deterministisch geplanter Produktionsabläufe zu Gunsten selbstorganisierter Prozesse. Industrielle Fertigung nach der Definition der Industrie 4.0 ist vollständig di-

67 Unter der Bezeichnung Cyber Physikalische Systeme bzw. Cyber-physische Systeme, engl. Cyber Physical Systems werden Maschinen bzw. Maschinenteile verstanden, deren Aktorik und Sensorik durch Miniaturisierte Computertechnik mit „Intelligenz" ausgestattet sind und deren einzelne Bestandteile dabei mit der Umwelt (theoretisch mit jedem über das Netzwerk erreichbaren Gerät) vernetzt sind. CPS sind somit in der Lage, Daten auszutauschen und neue Programme zu empfangen. Die Gesamtheit der CPS bildet dann das sogenannte „Internet der Dinge". Vgl. BMBF, 2012a, S. 10

68 Vgl. Bauer et al., 2014, S. 24f.

69 Zur Definition: Vgl. Bracht et al., 2011, S. 11

70 Vgl. Bauer et al., 2014, S. 20; Kagermann et al., 2013, S. 112

71 Vgl. Plattform Industrie 4.0, 2013a

72 Auf die Behandlung der Anforderungen an die Ausbildungsinhalte bzw. Konzeption der Studiengänge soll hier nicht eingegangen werden. Zu den Anforderungen: Vgl. Spath et al., 2013, S. 123ff.

73 So sprechen einige Akteure in Anlehnung an den Begriff der Industrie 4.0 bereits von einer „Logistik 4.0.": Vgl. VDI, 2014; sowie einer „Produktionsarbeit 4.0": Vgl. Spath et al., 2013, S. 6

gital abgebildet und dabei vertikal und horizontal vollständig integriert.

Die Industrie 4.0 beschreibt damit die Ausprägungen, welche sich aus der vierten industriellen Revolution auf den Bereich der Industrie beziehen. Die mit Industrie 4.0 beschriebenen Wandlungsprozesse in der industriellen Fertigung werden getrieben durch global wirksame Trends, die in Abschnitt 2.1.3 als die Indikatoren einer industriellen Revolution ausgemacht wurden. Der Begriff der industriellen Revolution schließt das Teilgebiet der Industrie 4.0 mit ein. Die Begriffe sind also nicht synonym zu verwenden.

2.2. Zur Theorie der Logistik

2.2.1. Theorie der Logistik im Allgemeinen

Es gibt bislang in Theorie und unternehmerischer Praxis keine einheitliche Definition, was unter Logistik zu verstehen ist[74]. Die Definitionen und Systematisierungsansätze gehen allein in der deutschen Literatur deutlich auseinander und sind im internationalen Zusammenhang nochmals unterschiedlich[75]. Eine allgemeine Theorie der Logistik hat sich somit bislang nicht herausgebildet[76], obwohl diese als Disziplin bereits seit den 1970er Jahren[77] in Fachkreisen breit diskutiert und weiterentwickelt wird. Seitdem hat sich die Logistik in mehreren Phasen von der Funktionsspezialisierung über die Ausprägung zur Koordinationsfunktion bis hin zur Gestaltung von flussorientierter Wertschöpfung entwickelt[78].

Mit dem Übergang der flussorientierten Verbindung aller Unternehmen der Wertschöpfungskette zu sogenannten Supply Chains ist aktuell die vierte Phase der Logistik erreicht[79]. Bereits in der dritten erfolgte die Betrachtung über die eigenen Unternehmensgrenzen hinaus und logistische Kernfunktionen wurden zunehmend um Führungsfunktionen ergänzt[80]. Schwierig ist bislang die Abgrenzung der logistischen Disziplin von anderen Fachbereichen, mit denen sie wiederum Schnittmengen hat. Daher wird der Begriff der Logistik vielfach bereits deutlich weiter gefasst und als interdisziplinär analysierende, modellierende, steuernde und beschreibende Tätigkeit von Güter- und Personenflüssen formuliert[81]. Wesentlichstes Charakteristikum der Logistik ist danach die Betrachtung der Flüsse in den Netzwerken ihrer Akteure. Dies können Informations-, Personen-, Güter- und sonstige Objektflüsse sein[82]. Viele Ansätze zur Entwicklung einer Theorie der Logistik sehen daher wissenschaftliche Forschungsgebiete wie die Systemtheorie, Spieltheorie[83], Transaktionskostentheorie[84] und die klassische Betriebswirtschaftslehre als selbstverständliche Bestandteile der Logistiktheorie, derer sich die

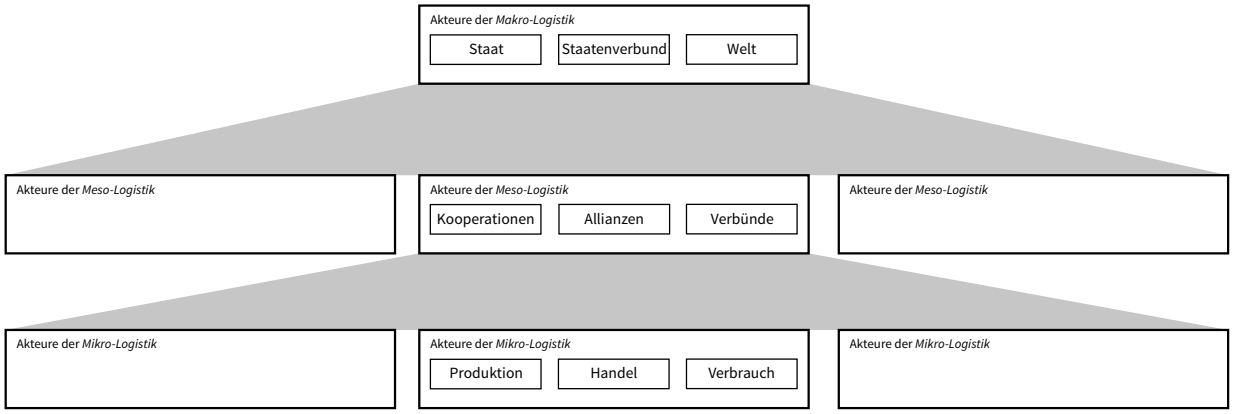


Abbildung 2: Ebenen der Logistik (nach Delfmann et al.)

74 Vgl. Weber, 2012, S. 3ff.
75 Vgl. Klaus, 2012, S. XVII ff.
76 Vgl. Nyhuis et al., 2008 S. 3
77 Darstellung der Logistik im Zeitverlauf in: Baumgarten, 2008, S. 14
78 Vgl. Nyhuis et al., 2008, S. 2f.
79 Vgl. Weber, 2012, S. 19ff.
80 ebenda, S. 14ff.
81 Vgl. Delfmann et al., 2010, S. 3ff.; Arnold, 2008, S. 4ff.
82 ebenda, S. 4
83 Vgl. Wiendahl, 2008, S. 283f.
84 Vgl. Wildemann, H., 2008, S. 32f.

Logistik als interdisziplinäre Wissenschaft in den jeweiligen Aufgabenstellungen bedient[85]. Ihr Ziel ist dabei die Gestaltung und Modellierung von Gesamtprozessen zur Entwicklung von Güterflüssen in Netzwerkstrukturen[86] und die Gewinnung von Erkenntnissen aus der Analyse derartig verknüpfter Strukturen[87].

Für die Betrachtung werden dabei drei unterschiedliche Sichten eingenommen: die technische, die organisatorische und die soziale Sicht[88]. *Delfmann et al.* definieren zur Differenzierung der wirtschaftlichen Aktivitäten die Mikro-, Meso- und Makro-Ebene der Logistik (siehe Abbildung 2)[89]. Die Mikro-Ebene beinhaltet dabei die kleinstteilige Betrachtung des Zusammenwirkens unterschiedlicher Wirtschaftseinheiten und Individuen (Handel, Fabrik etc.), während die Meso-Ebene diese Akteure gruppiert und deren Konstellationen mit anderen Gruppen untersucht (bspw. vertikale und horizontale Kooperationen). Auf der Makro-Ebene wird weiter abstrahiert und die Wirkungen von Staaten oder Staatsgemeinschaften im internationalen Handel untersucht. Die Netzwerkgestaltung der Logistik entspricht dabei durch ihre Selbstähnlichkeit zugleich einer fraktalen Struktur[90], so stellen die Netzwerke der Mikro-Ebene wiederum Elemente eines Netzwerkes der darüber liegenden Meso-Ebene dar usw.[91]

Als eine der unmittelbaren Unternehmenspraxis entstammende Disziplin ist die Logistikwissenschaft dabei nicht nur als reaktive, sondern auch als pro-aktive Wissenschaft zu verstehen, welche anwendungsorientiert (also mit unmittelbarem Praxisbezug) Lösungen sucht[92]. Dies erklärt, warum die Logistiktheorie aktuell *„der Praxis hinterherhinkt“*[93] und sich verschiedene Modellansätze aus den unterschiedlichen Praxisanwendungen heraus gebildet haben. Die Allgemeine Systemtheorie liefert mit der Definition von Systemen, der Modellkonstruktion und deren Hierarchisierung eine gute Bezugsbasis für eine Theorie der Logistik[94]. Derartige hierarchische Ansätze[95] werden auch für die systematische Betrachtung innerhalb von einzelnen Betrieben bis hinunter auf die Ebene einzelner Geräte oder Aggregate verwendet. So werden als Komponenten die einzelnen Bestandteile einer Maschine verstanden, die im Zusammenhang mit weiteren Komponenten eine bestimmte Funktion ausführen können (z.B. Ein- und Auslagern). Diese Funktionsgruppen lassen sich wiederum zusammenfassen und zu Sub-Systemen abstrahieren (z.B. ein Hochregallager). Die höchste Abstraktionsebene stellt danach das System dar und beschreibt die Gesamtanlage (z.B. Warenverteilzentrum)[96]. Aus diesem hierarchischen Modell leiten *Delfmann et al.* ein Design-Paradigma für Materialflussnetzwerke ab[97].

Das Verständnis der Logistik als interdisziplinäre Wissenschaft zur Analyse und Modellierung arbeitsteiliger Wirtschaftsprozesse sowie die beschriebene Phasenunterteilung der Logistik und Modellierung ihrer Objekte in flussorientierten Systemen wird dabei von vielen AutorInnen geteilt[98] und auch von der Bundesvereinigung der Logistik (BVL) in einem Positionspapier unterstützt[99].

Für die Entwicklung einer Logistiktheorie wird die flussorientierte Netzwerkbetrachtung ebenfalls herangezogen. Danach leiten sich aus der Modellierung und Analyse von Logistikprozessen neben den Erkenntnissen über deren Zusammenhänge auch die Begrifflichkeiten ab, welche zur Bildung eines einheitlichen „Begriffsgebäudes“ führen sollen (erster Bereich einer Logistiktheorie). Eine widerspruchsfreie Ontologie der Logistik soll zugleich die „Durchgängigkeit“ in den verschiedenen Teildisziplinen der Logistik erhalten. Mit der so gefundenen Terminologie lassen sich die aus den Beobachtungen abstrahierten Sachverhalte beschreiben und als „Modellmenge“ der Logistik definieren (zweiter Bereich einer Logistiktheorie). Aus der Modellmenge lassen sich dann wiederum Methoden und Verfahren der Logistik ableiten[100]. Den dritten Teil einer Logistiktheorie macht dann die Systematisierung, Klassifizierung und Einordnung der Gesamt-

85 Vgl. Delfmann et al., 2010, S. 7
86 Vgl. Delfmann et al., 2010, S. 4f.
87 ebenda, S. 7
88 ebenda, S. 4
89 ebenda, S. 6ff.
90 Delfmann spricht hier von „Selbstähnlichkeit“, vgl. Delfmann et al., 2010, S. 5f.
91 ebenda, S. 5
92 Vgl. Delfmann et al., 2010, S. 9; Weber, 2012, S. 3ff.
93 Vgl. Nyhuis et al., 2008, S. 3;
94 Zur Modellkonstruktion und Systemtheorie: Vgl. Ropohl, 2012, S. 52ff.
95 Zum hierarchischen Konzept: ebenda, S. 57
96 Vgl. Delfmann et al., 2010, S. 33ff.
97 ebenda, S. 33ff.
98 Vgl. Weber, 2012, S. 4 und darin aufgeführte Literatur.
99 Vgl. BVL, 2010
100 Vgl. Delfmann et al., 2010, S. 8f.

heit der möglichen Anwendungen aus. Für die Entwicklung eines Logistikmodells sind dabei vier Schritte von Bedeutung: Systemabgrenzung, Merkmalsbeschreibung, Modellformalisierung und Modellüberprüfung[101].

Damit wird bereits deutlich, warum sich bislang keine einheitliche Logistiktheorie herausbilden konnte. Anhand der von *Delfmann* skizzierten drei Teile einer solchen Theorie bedeutet dies, zunächst eine einheitliche, für alle Fachdisziplinen verständliche Sprache zu finden. Ebenso muss Klarheit darüber bestehen, welche Tätigkeiten überhaupt der Logistik zuzuordnen sind, um den Umfang des zu beschreibenden Systems abzugrenzen. Ferner darf nicht unterschätzt werden, dass die Logistik je nach gewähltem Umfang mehrere Fachgebiete berührt, was eine hohe Fachkompetenz und Detailkenntnis der Akteure verlangt.

Kille wählt in seinen Studien[102] einen engeren Logistikbegriff, der sich auch mit den Definitionen im internationalen Vergleich verwenden lässt. Hierbei begrenzt er bewusst den Begriff der Logistik auf die klassischen TUL-Aktivitäten[103] (Transportieren, Umschlagen, Lagern) und fügt diesen noch die unmittelbar zuzuordnenden administrativen Tätigkeiten der Disposition und Auftragsabwicklung hinzu[104]. Vorrangiges Ziel dieser engen Definition ist die Herstellung von Messbarkeit logistischer Aktivitäten und Vergleichbarkeit mit anderen Wirtschaftsräumen (z.B. den USA), in denen der Logistikbegriff anders besetzt ist[105].

Im Rahmen dieser Arbeit soll der weite Logistikbegriff als Bezugsbasis dienen, da sich die Betrachtungen vorwiegend auf den deutschen bzw. europäischen Raum konzentrieren und die Veränderungen aus der Industrie 4.0 gerade auf die Möglichkeiten der Vernetzung abzielen und damit auch Logistikkonzepte als aussichtsreich erscheinen, die bereits auf Netzstrukturen hin angelegt sind. Aus der ursprünglichen reinen TUL-Tätigkeit der Logistik ist demnach eine dienstleistungsorientierte Tätigkeit geworden, welche unternehmensintern und -extern entlang der gesamten Wertschöpfungskette wirksam ist. Hierzu wurde in den 1990er Jahren der Begriff des Supply Chain Managements geprägt, welcher das umfassende Management aller logistischen Tätigkeiten in der Wertschöpfungskette beschreibt[106].

2.2.2. Logistik als Prozess und Darstellung im Logistikmodell

Trotz der noch unvollständigen Theorie der Logistik haben sich aus der Auseinandersetzung mit logistischen Prozessen in den unterschiedlichen Bereichen wie der Produktion oder Distribution Modelle herausgebildet, mit denen dort den spezifischen Herausforderungen begegnet wird. Als übergreifenden Ansatz, welcher alle von der Logistik verbundenen Prozesse in der Wertschöpfungskette als System[107] zusammenfasst, gilt das Modell des Prozesskettenmanagements[108]. Danach wird zunächst auf den Fluss eines Auftrages, von Material bzw. von Informationen in einem System (z.B. einer Wertschöpfungskette), abgestellt. Die Umwandlung eines bestimmten Eingangswertes (Input) in einen Ausgangswert (Output) wird von Prozessen bewerkstelligt, welche die Wesensveränderung des Inputs durchführen (Throughput). Dabei kann ein Prozess wiederum aus Prozessen oder Subsystemen, die wiederum selbst wieder aus Prozessen bestehen, zusammengesetzt sein. Die Selbstähnlichkeit von Prozessen ermöglicht unterschiedlich detaillierte Betrachtungen eines komplexen Systems, in dem viele Prozesse zu „Hauptprozessen“ aggregiert werden. In der Anwendung auf die Logistik werden hierbei einzelne Prozesse nach ihren Logistikfunktionen typisiert: Beschaffungsprozesse, Produktionsprozesse und Distributionsprozesse[109]. Das von *Delfmann et al.* beschriebene Design-Paradigma für Materialflussnetzwerke (Abschnitt 2.2.1) geht in diesem Konzeptansatz auf.

Das skizzierte Prinzip des Prozesskettenmanagements ist aktuell in Gestalt des SCOR-Modells in vielen Unternehmen implementiert[110]. Die Logistischen Tätigkeiten im Detail werden anhand des Modells unterschieden und klassiert. Das SCOR-Modell verfolgt ebenfalls den Flussgedanken und verwendet einen fraktalen Aufbau seiner Objekte.

---

101 Vgl. Wiendahl, 2008, S. 280ff.
102 Die Studien „Top 100 der Logistik“ erscheinen im jährlichen Rhythmus, abwechselnd in englischer und deutscher Sprache. Vgl. Top100, 2014
103 Hierunter werden die Kerntätigen Transportieren Umschlagen und Lagern (TUL) der Logistik verstanden, aus denen sich die Logistik als Disziplin entwickelt hat.
104 Vgl. Kille et al., 2012, S. 424f.
105 Vgl. Straube et al., 2008, S. 26
106 Vgl. Klaus, 2012, S. 554ff.
107 Vgl. Ropohl, 2012, S. 52ff., 71ff.
108 Vgl. Arnold, 2008, S. 216ff.
109 ebenda, S. 219f.
110 Vgl. Supply Chain Council, 2010, S. 20

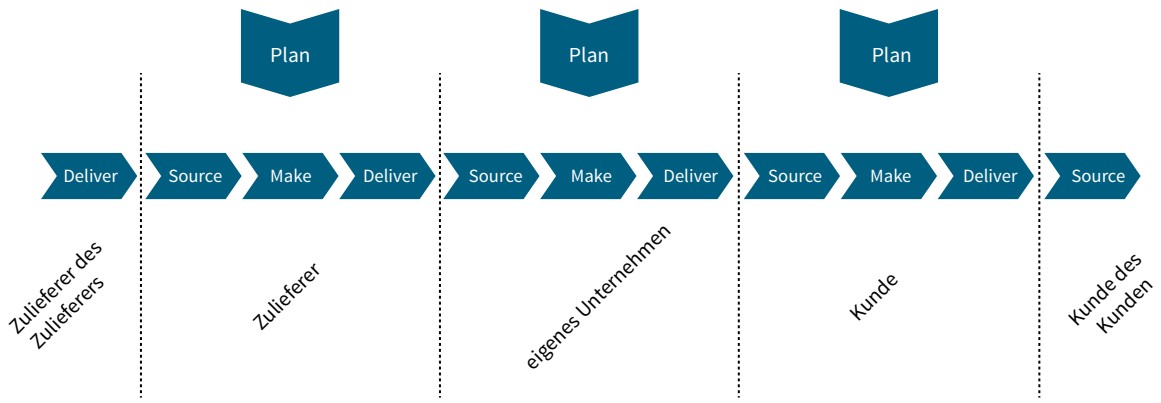


Abbildung 3: Das SCOR-Modell (v.10)[112]

Die Logistik verbindet hierbei als Querschnittsdisziplin die industrielle Fertigung (Produktion) auf der einen Seite mit seinen Zulieferern (Beschaffungslogistik) sowie auf der anderen Seite die Produktion mit den Abnehmern der produzierten Güter (Distributionslogistik). Die Prozesse sind als durchgängiger Fluss modelliert. Zugleich organisiert die Logistik auch die Fertigungsprozesse (Produktionslogistik), wie anhand des SCOR-Modells[111] in Abbildung 3 dargestellt ist.

2.2.3. Werkzeuge und Managementansätze der Logistik

Ebenfalls auf dem Ansatz der Prozessorientierung basierend, haben sich seit den 1990er Jahren die Werkzeuge und Managementansätze der Logistik entwickelt. Für die Produktionslogistik steht das mit dem Toyota Produktionssystem (TPS)[113] begründete Lean Management für den erfolgreichsten und populärsten Ansatz. Werkzeuge wie das Wertstromdesign[114] und die Kanban-Methoden entstammen dem Lean-Gedanken[115]. Der Gedanke der Autonomation[116] spiegelt sich heute in vielen Bereichen der Produktion wider. Zentrale Planungsprinzipien sind bislang in Form einer Produktionsplanung und -steuerung (PPS) implementiert. In Kanban-Systemen sind aber bereits Ansätze für sich selbst steuernde Prozesse angelegt, da hierbei der nachgelagerte Prozess automatisch nur so viele Teile aus dem vorgelagerten Prozess entnimmt wie für die Bearbeitung gerade benötigt werden[117]. Auf derartigen Prozessen bauen die Ansätze der Selbststeuerung auf, die im Kontext der Industrie 4.0 diskutiert werden und auf die an späterer Stelle noch eingegangen wird.

Festzuhalten bleibt aber, dass auch moderne Lean-Methoden mit deterministischen Planungsmethoden (Stücklistenauflösung, Programmplanung, Reihenfolgeplanung) arbeiten und die Fertigung vorgeplant ist.

2.2.4. Einordnung der Industrie 4.0 in die Theorie der Logistik

Die Auswirkungen und erforderlichen Neuausrichtungen der Logistik, die durch die Veränderungen mit der Industrie 4.0 als notwendig erscheinen, werden im Konzeptansatz der Smart Logistics beschrieben (vgl. Abschnitt 2.1.5).

Mit dem Paradigmenwechsel der Industrie 4.0 zur Selbststeuerung der Dinge und der durchgehenden Vernetzung aller Bereiche in der Wertschöpfungskette, wird die Logistik unmittelbar adressiert. Schließlich ist es ihre ureigene Aufgabe, Güter, Informationen etc. durch Wertschöpfungsnetze zu befördern. Mit der Definition der Logistik als Koordinations- und Planungsfunktion kommt ihr darüber hinaus die Leitfunktion in einem Produktionssystem bzw. -verbund zu. Ohne die Anpassung der Logistikmodelle an das Paradigma der Selbststeuerung kann die Industrie 4.0 nicht Realität werden.

111 Vgl. Supply Chain Council, 2010, S. 6
112 Darstellung angelehnt an Supply Chain Council, 2010, S. 6
113 Vgl. Ohno et al., 2009
114 Einführung in das Wertstromdesign: Vgl. Rother et al., 2004, S. 3ff.
115 Zur Erläuterung des Kanban-Verfahrens: Vgl. Ohno et al., 2009, S. 36ff.
116 ebenda, S 38ff.
117 ebenda, S. 134ff.

Dabei zeichnen sich zwei wesentliche Herausforderungen ab:

1. Wenn sich die Dinge im Zeitalter der Industrie 4.0 selbst steuern, dann bedarf es eines grundlegend neuen Konzeptes der Flusssteuerung. Dies betrifft sowohl die Materialflusssteuerung innerhalb der Fabrik als auch über die gesamte Supply Chain. Die zentrale planerische Vorwegnahme der Steuerung mit den konventionellen Methoden der Produktionsplanung und -steuerung weicht einem dezentralen System, welches die Infrastruktur (dezentrale Produktionssteuerung[118]) bereitstellt, die eine Selbststeuerung der Dinge nach den Zielen des Unternehmens bzw. Unternehmensverbundes erfüllt.

2. Die Vernetzung der intelligenten Fertigungstechnik führt darüber hinaus auch zu einer Auflösung starrer Wertschöpfungsverkettungen, da sich nach dem Paradigma der Selbststeuerung auch die Maschinen miteinander auftragsbezogen vernetzen können. Das Prozesskettenmanagement wandelt sich dann zum Management lose verketteter Services[119].

Die Industrie 4.0 fügt sich danach nicht widerspruchsfrei in die bisherigen Theorieansätze der Logistik ein, sondern stellt diese an elementaren Punkten sogar in Frage. Darüber hinaus erscheint eine Logistik für die Industrie 4.0 auch nur noch als unternehmensübergreifende, die gesamte Wertschöpfungskette beschreibende Funktion denkbar, da autarke singuläre Konzepte in der einzelnen Fabrik ggfs. nicht kompatibel zu seiner Umwelt sind.

[118] Vgl. BMBF, 2012a, S. 15f.
[119] Vgl. ten Hompel, 2008, S. 105ff.

3. Forschungsfeld Industrie 4.0 und Logistik

3.1. Akteure und Forschungsfelder

3.1.1. Politik und Interessenverbände

Seitens der Politik wurde die Bedeutung der Industrie 4.0 früh erkannt und von Beginn an aktiv unterstützt (vgl. Abschnitt 2.1). In einer Reihe von unterschiedlichen Fördermaßnahmen im Rahmen der Hightech-Strategie der Bundesregierung (IKT2020[120]), werden Forschungsvorhaben im Bereich der Industrie 4.0 unterstützt[121]. Der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Arbeitskreis Industrie 4.0 hat Anfang 2013 seinen Abschlussbericht mit Handlungsempfehlungen dazu vorgelegt[122]. Aus den in den Arbeitsgruppen versammelten Verbänden ist darüber hinaus die gemeinsame Arbeitsplattform Industrie 4.0 initiiert worden[123], welcher der ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA) und der Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM) angehören. Die Plattform verfolgt dabei das Ziel, disziplin- und verbandsübergreifend die Voraussetzungen und Modelle für die Umsetzung der im Abschlussbericht formulierten Ziele zu gestalten[124]. Der Arbeitskreis hat in einem Whitepaper insgesamt 17 Thesen für die Erschließung und Definition des Themenfeldes Industrie 4.0 aufgestellt, und will anhand dieser Thesen in mehreren Arbeitsgruppen die inhaltliche Ausarbeitung betreiben[125]. Ähnliche Arbeitsgruppen finden sich derzeit auch in den anderen Industrie- und Interessenverbänden wie bspw. dem VDI[126], zusammen. Die genannten Themenfelder weisen dabei viele Überschneidungen auf.

3.1.2. Privatwirtschaft

Das Themengebiet der Industrie 4.0 ist auch Gegenstand vieler Studien und Veröffentlichungen im privatwirtschaftlichen Umfeld. Hier liegen zum Thema u.a. Studien der Unternehmensberatungen McKinsey[127], Roland Berger[128] und des Mischkonzerns General Electric[129] vor. Dies deutet darauf hin, dass auch die Privatwirtschaft die Bedeutung des Themas erkannt hat, es sich also nicht um eine rein akademische Diskussion handelt.

3.1.3. Forschung

Neben den Forschungseinrichtungen an den Universitäten sind in Deutschland insbesondere die Fraunhofer-Institute als bedeutende Akteure in der Logistikforschung bzw. der Forschung zur Industrie 4.0 zu nennen. Insbesondere am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML), wird im Themenspektrum Industrie 4.0 geforscht und projektbezogen auch unmittelbar die Zusammenarbeit mit der Wirtschaft gesucht. Neben dem aktuellen Kernprojekt, der Logistics Mall[130] (siehe Abschnitt 3.4.6), wird in Teilprojekten, den sogenannten „Querschnittsarbeitspaketen“ zu einzelnen Disziplinen, im Bereich der Industrie 4.0 geforscht. Aktuelle Beispiele sind das Projekt „SMART FACE“[131] zur Erarbeitung der Möglichkeiten von Cloud Technologien sowie die Unternehmenskooperation „SICK“[132] zur Entwicklung von Sensortechnik zusammen mit Unternehmen aus der Branche. Darüber hinaus sind auch das Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) zum Themenfeld der Arbeitssoziologie, das Fraunhofer-Institut für Software- und Systemtechnik (ISST) als Forschungspartner bei

120 Vgl. BMBF, 2007
121 Vgl. BMBF, 2012b
122 Vgl. Kagermann et al, 2013
123 Vgl. Plattform Industrie 4.0, 2014
124 Vgl. Plattform Industrie 4.0, 2013b
125 Dabei ist das Whitepaper eher als eine Agendaplanung für die kommende Arbeit der Plattform Industrie 4.0 zu sehen. Vgl. BITKOM, 2014
126 Vgl. VDI, 2013
127 Vgl. Manyika et al., 2013
128 Vgl. Dujin et al., 2014
129 Vgl. Annunziata et al., 2013
130 Vgl. Logistics Mall, 2014; Vorstellung des Projektes in: Meinhardt et al., 2011, S. 21ff.
131 Projektbeschreibung des Forschungsprojektes „SMART-FACE“ auf den Internetseiten des Fraunhofer-Instituts: Vgl. Fraunhofer Smart Face, 2014;
132 Projektbeschreibung des Forschungsprojektes „SICK“ auf den Internetseiten des Fraunhofer-Institutes unter: Vgl. Fraunhofer SICK, 2014

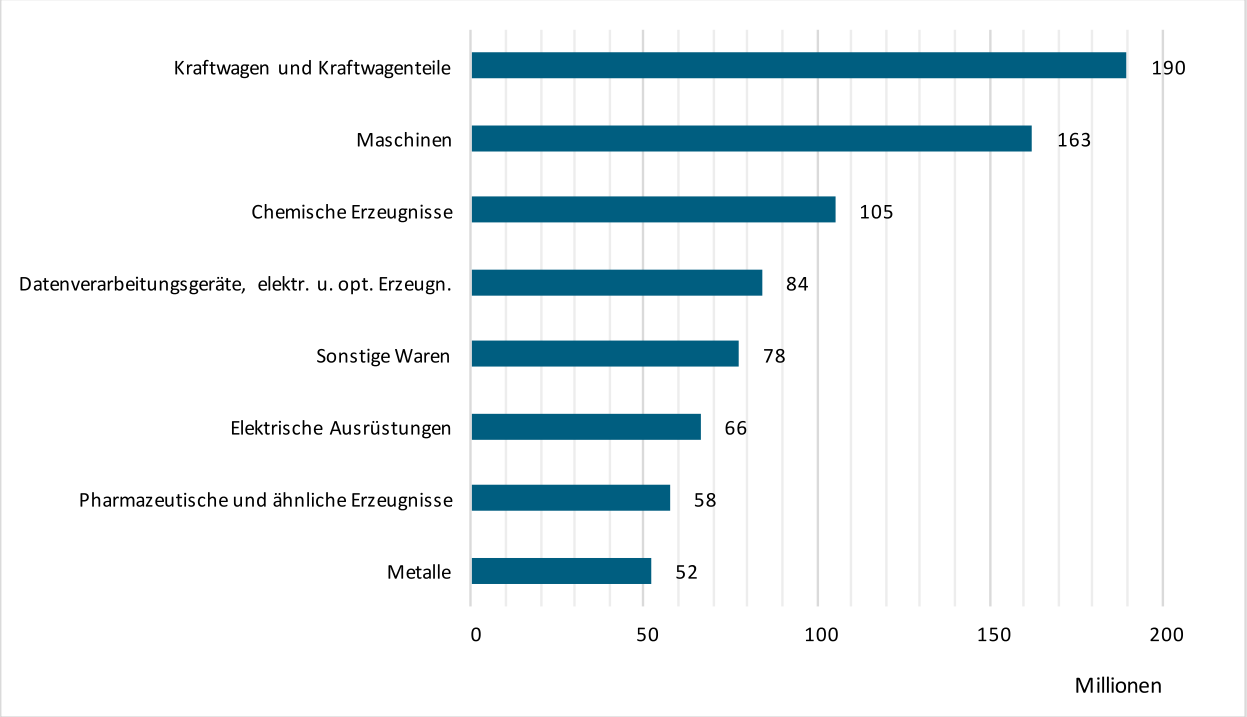


Abbildung 4: Wichtigste deutsche Exporte 2013[141]

der Logistics Mall sowie das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) im Bereich des Data Mining, einem weiteren Querschnittsthema der Industrie 4.0, aktiv. Im Weiteren wird an zahlreichen Universitäten und Hochschulen im Themenspektrum der Industrie 4.0 geforscht. Dazu sind noch die Forschungsunion[133], das Deutsche Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI)[134] und die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech)[135] zu nennen.

3.2. Wirtschaftliches und gesellschaftliches Umfeld

3.2.1. Vorbemerkung zur Studienbetrachtung

Um die vierte industrielle Revolution bzw. die Industrie 4.0 in die allgemeine wirtschaftliche Situation in Deutschland sowie in die aktuellen Entwicklungen im Bereich der Logistik einordnen zu können, wurden unterschiedliche Studien herangezogen, deren Kernaussagen im Folgenden wiedergegeben und besprochen werden. Die Betrachtungen dienen ebenso zur Abgrenzung und Einordnung der Industrie 4.0 mit ihren Wirkungen auf die Logistik neben weiteren Einflüssen und Veränderungstreibern, welche zur gleichen Zeit auf sie einwirken. Die Betrachtungen beziehen sich vorwiegend auf Deutschland und die dort vorzufindenden Strukturen in der Logistikwirtschaft.

Die vorangestellte allgemeinwirtschaftliche Betrachtung dient dabei lediglich der Einordnung der logistikspezifischen Aussagen in den wirtschaftlichen Gesamtkontext.

3.2.2. Deutsche Wirtschaft im globalen Wettbewerb

Deutschland ist verhältnismäßig gut durch die aktuelle Wirtschafts- und Finanzkrise gekommen. Dass dies so ist, wird häufig mit dem starken Anteil industrieller Wertschöpfung begründet[136]. Während andere Industrienationen mit einem höher ausgeprägten Dienstleistungssektor schwerer und länger von der Krise getroffen wurden bzw. nach wie vor betroffen sind (bspw. Frankreich und die USA) setzte in Deutschland bereits 2010 ein wirtschaftlicher Aufschwung ein, welcher sich zuletzt nochmals verstärkt hat[137].

Vor allem in den Schlüsselindustrien Chemie, Automobil- und Maschinenbau sind deutsche Unternehmen auf den Weltmärkten erfolgreich (siehe Abbildung 4) und damit die derzeitigen Wirtschaftstreiber neben dem inländischen Konsum[138]. Die Beschäftigtenzahl wuchs in diesen drei exportstärksten Branchen zuletzt um 3,5% im Vergleich

133 Vgl. Forschungsunion, 2014
134 Vgl. DFKI, 2014
135 Vgl. acatech, 2014
136 Vgl. Dujin et al., 2014, S. 3ff.
137 Vgl. DESTATIS, 2014a
138 ebenda

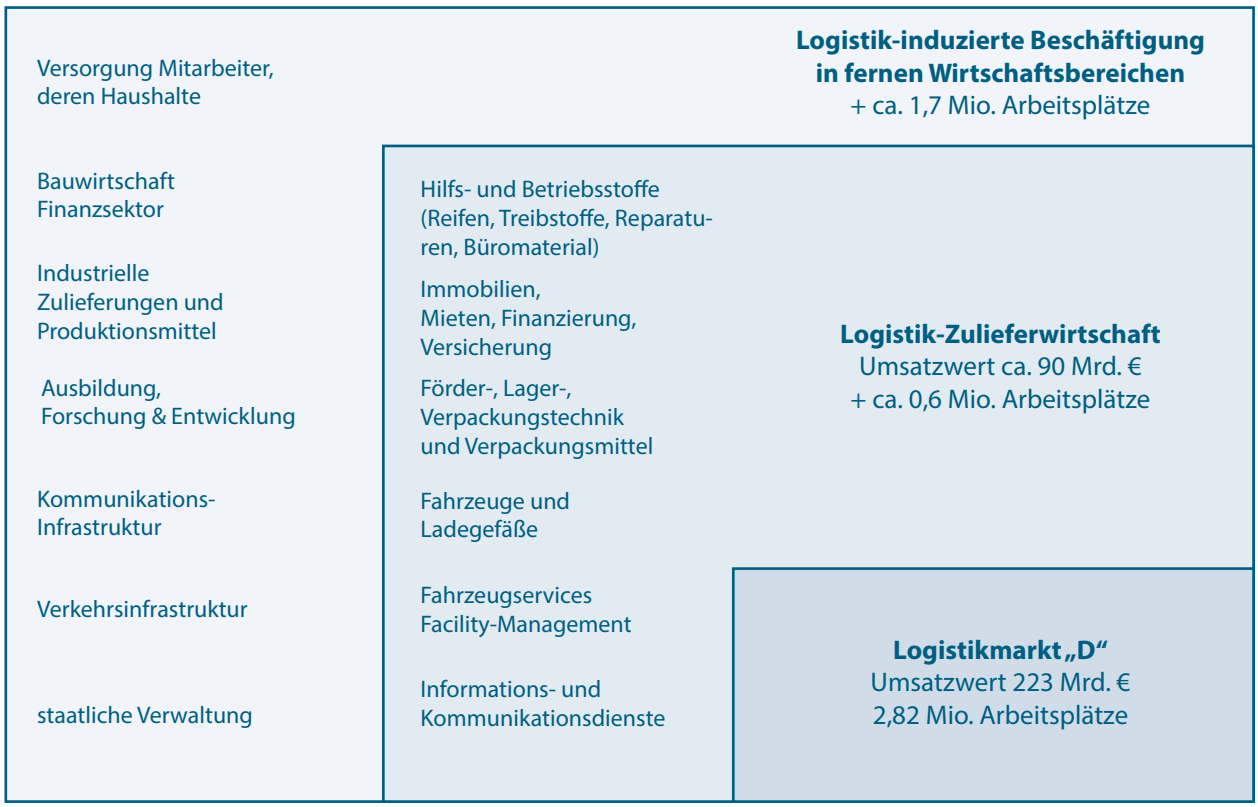


Abbildung 5: Gesamtwirtschaftliche Bedeutung der Logistik[164]

zu 2011 und liegt bei ca. 2,1 Mio. Erwerbstätigen[139]. Bedenkt man darüber hinaus, dass diesen Branchen auch große Bedeutung für vorgelagerte Zulieferindustrien und damit weiterer Beschäftigung zukommt, so erklärt dies auch das starke politische Interesse am Erhalt und Ausbau dieser Industrien mit dem Ziel der Schaffung weiterer Arbeitsplätze und der Sicherung des Wirtschaftsstandortes Deutschland insgesamt. Vor diesem Hintergrund sind auch die umfangreichen Förder- und Forschungsbemühungen (siehe Abschnitt 3.1.1) der Politik zu sehen, welche sich aus den Entwicklungen der Industrie 4.0 eine Stärkung der Innnovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit des Wirtschaftsstandortes Deutschland verspricht[140].

Gerade die Schlüsselindustrien sind gleichzeitig auch „logistikintensive“ Industrien (vgl. Abschnitt 3.3.2), sodass positive wie negative Entwicklungen maßgeblich auf die Logistikbranche ausstrahlen.

Zugleich sehen einige Studien die derzeitige Stärke der deutschen Industrie im globalisierten Wettbewerb bedroht[142]. Vor allem die Schwellenländer holen hier auf, in dem sie nach wie vor günstiger produzieren, aber zugleich auch in der Qualität der Produkte zu den führenden Industrienationen aufschließen[143]. Die Produktivität der deutschen Industrie fällt demnach hinter die von Schwellenländen wie bspw. China zurück[144].

Die deutsche Exportwirtschaft ist daher einem besonderen Wettbewerbsdruck ausgesetzt, da die Lohnkosten nach wie vor deutlich über denen der aufstrebenden Märkte liegen[145]. Ein Wettbewerb über die Lohnkosten zu führen erscheint daher aussichtslos, vielmehr könnte dies nur über qualitativ hochwertige Produkte und Dienstleistungen geschehen[146]. Das Deutschland bislang vor allem mit derartigen Premiumprodukten führt, die sich vorwiegend nicht über den Preis am Markt behaupten müssen[147] ist ein aktueller Vorteil, der aber durch das Aufschließen der aufstrebenden Industrieländer langsam nivelliert wird[148]. Wachstumschancen und die Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit werden daher vor allem auch in Produktivitätssteige-

139 Zahlen nach: DESTATIS, 2014c
140 Vgl. BMBF, 2012b, S. 52ff.
141 Zahlen nach: DESTATIS, 2014b
142 Vgl. McKinsey Deutschland, 2013, S. 50f.
143 ebenda, 2013, S. 50f.
144 ebenda, 2013, S. 19
145 Im verarbeitenden Gewerbe liegt der Stundenlohn danach in Deutschland bei 35,66 EUR gegenüber bspw. China mit 3,17 EUR oder der Tschechischen Republik mit 9,99 EUR. Vgl. Schröder, 2012, S. 6
146 Vgl. McKinsey Deutschland, 2013, S. 55f.
147 ebenda, 2013, S.49
148 Vgl. Dujin et al., 2014, S. 4f.

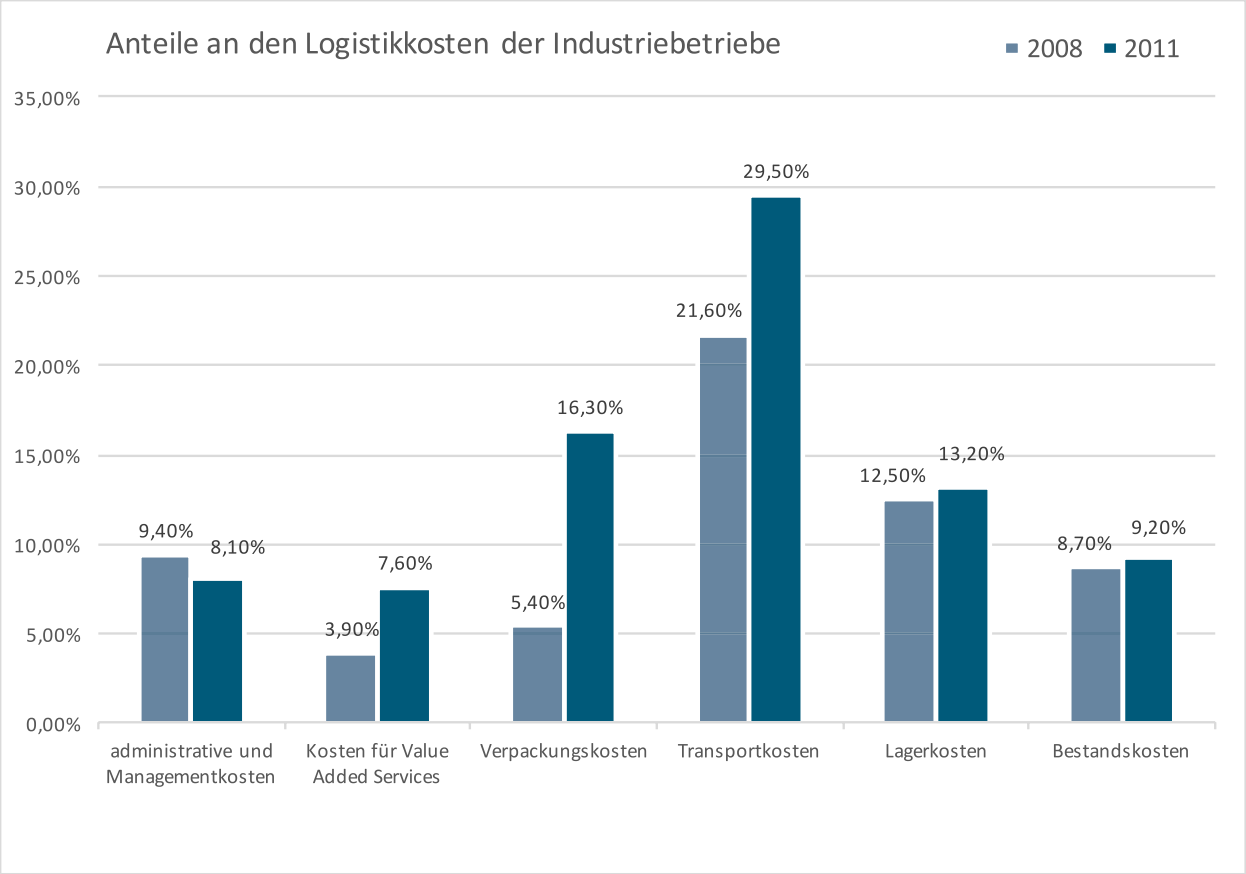


Abbildung 6: Zusammensetzung der Logistikkosten der Industriebetriebe[179]

rungen gesehen[149]. Der Produktivitätsgewinn lässt sich dabei vor allem aus einer noch stärkeren Vernetzung der Industrien in der Wertschöpfungskette erreichen, insbesondere durch eine weitere Digitalisierung und Verbesserung der Systemproduktivität[150]. Damit sind bereits die logistischen Fragestellungen angesprochen, die sich auf die Optimierung der Wertschöpfung und Minimierung der Lagerung (Bestände) der verketteten Unternehmen beziehen.

3.3. Logistikwirtschaft

3.3.1. Abgrenzungsschwierigkeiten der Logistik

Dass es nicht die eine Logistik gibt, die per definitionem erfass- und damit messbar ist, wurde bereits im Abschnitt 2.2.1 zur Logistiktheorie deutlich. Auf die Schwierigkeiten der Einschätzung und Bemessung der Logistikbranche sei an dieser Stelle für die Bewertung der im Folgenden genannten Statistiken hingewiesen. Bislang werden von den offiziellen Statistikbehörden, wie dem Statistischen Bundesamt (DESTATIS[151]) keine eigenen Zahlen für die Logistikbranche erhoben. So werden bspw. detaillierte Zahlen zum Güterverkehr und den Verkehrsträgern sowie den zugehörigen Dienstleistungen erhoben und unter der Bezeichnung „Verkehr und Lagerei“ zusammengefasst[152]. Auf die Problematik der Abgrenzung zwischen reinen Transportleistungen und den zugehörigen Dienstleistungen weist das DESTATIS ebenfalls hin[153].

Es ist daher erforderlich, wie bspw. von *Kille* vorgenommen, zunächst Zurechnungen von Teilbranchen und Abgrenzungen vorzunehmen[154]. Andere Studien werden daher ggfs. zu anderen absoluten Ergebnissen kommen. Die Ursachen liegen aber auch in den Unternehmen selbst. So ist das Verständnis, was dem Bereich der Logistik zuzu-

149 Vgl. McKinsey Deutschland, 2013, S. 13f.
150 Vgl. McKinsey Deutschland, 2013, S.54
151 Das Statistische Bundesamt ist mit einem umfangreichen Internetangebot mit dem freien Zugang zu statistischem Zahlenmaterial im Internet zu erreichen: Vgl. DESTATIS, 2014e
152 Details zur Klassifikation lassen sich der aktuell gültigen Fassung der Wirtschaftsklassifikation der DESTATIS entnehmen. Vgl. Statistisches Bundesamt, 2008, S. 404
153 Vgl. Statistisches Bundesamt, 2013, S. 593
154 Zur Vorgehensweise der Bildung von Teilmärkten, Abgrenzungen und der Messbarkeit der Logistik: Vgl. Kille et al., 2012, S. 3ff., S. 49ff.

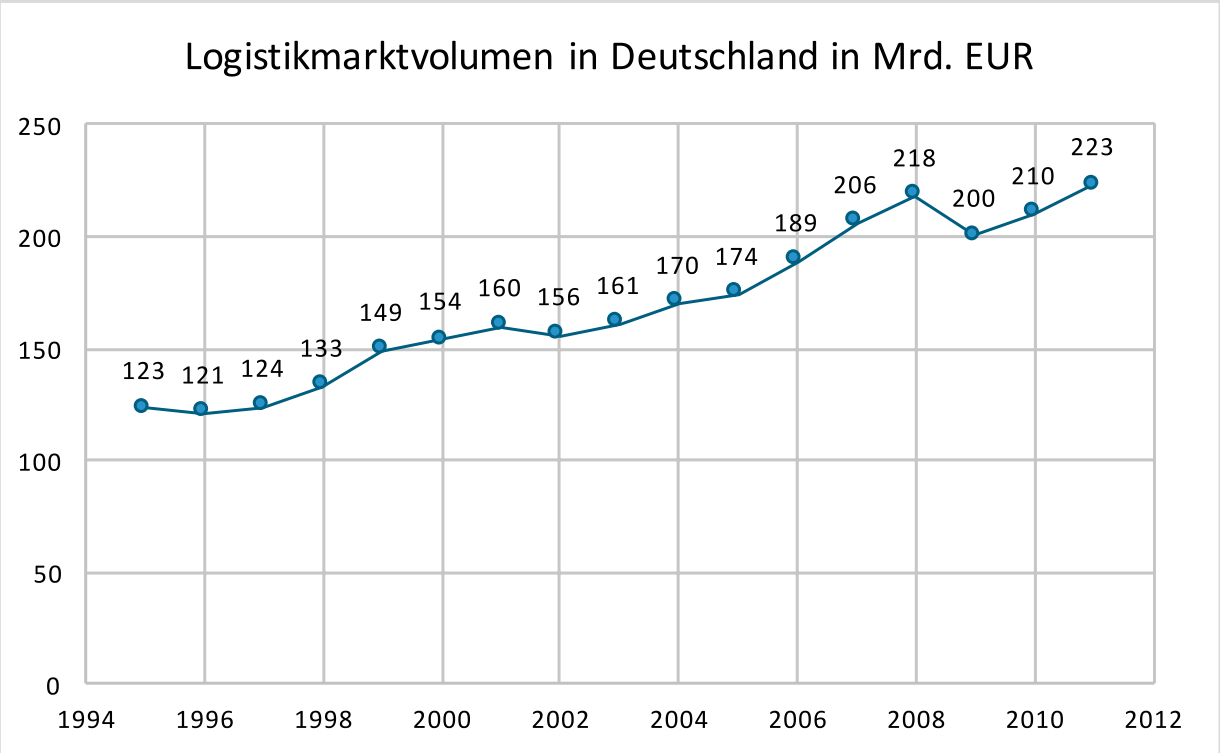


Abbildung 7: Logistikmarktschätzungen seit 1995[158]

schreiben und ggfs. in der Kosten- und Leistungsrechnung (Logistikkostencontrolling) auszuweisen ist, in den Unternehmen durchaus unterschiedlich ausgeprägt[155]. Mitunter werden hier nur die reinen Transportleistungen (ggfs. nur externe Transporte ohne Werksverkehre) verstanden[156]. Diese sehr heterogene Einschätzung der Logistik zeigt beispielhaft die in der Praxis als auch in akademischen Kreisen sehr unterschiedliche Bedeutung von Logistik und macht das Fehlen eines einheitlichen Logistikbegriffes (vgl. Abschnitt 2.2.1) deutlich.

3.3.2. Wirtschaftliche Gesamtsituation der Logistikbranche

Der Logistikbereich wird, gemessen an den Umsätzen (223 Mrd. EUR, 2011), in Deutschland lediglich vom Automobilbau (355 Mrd. EUR, 2011) übertroffen und liegt damit noch vor dem Maschinen- und Anlagenbau (215 Mrd. EUR, 2011), dem Ernährungsgewerbe (168 Mrd. EUR, 2011) sowie der Chemieindustrie (144 Mrd. EUR, 2011)[157]. Der Rückgang des Logistikvolumens mit Ausbruch der Wirtschafts- und Finanzkrise im Jahr 2008 ist für die Logistikwirtschaft bereits überwunden. Das Volumen liegt im Jahr 2011 bereits 2,2% über dem Vorkrisenniveau und hat sich damit um gut 10% zum Krisenjahr 2009 erholt (siehe Abbildung 7).

In Bezug auf die Beschäftigtenzahlen (sozialversicherungspflichtige Angestelltenverhältnisse) führt die die Logistikbranche an erster Stelle mit 2,82 Mio. direkt zugerechneten Beschäftigten mit weitem Abstand vor dem deutschen Maschinenbau mit rund 1 Mio. Beschäftigten[159]. Darüber hinaus werden der Logistikbranche noch weitere Beschäftigungsbereiche der „Logistik-Zulieferer-Wirtschaft“ und der „Logistik-induzierten Wirtschaft“ zugerechnet, sodass sich eine Gesamtzahl von rund 5 Mio. Beschäftigen ergibt[160] (siehe Abbildung 5).

Die Logistikbranche hat sich dabei in Deutschland durch die immer weiter steigenden Ansprüche ihrer Kunden zu einem Dienstleister entwickelt, wobei hier bereits ein Großteil der Logistikunternehmen die vierte Entwicklungsphase der Logistik (siehe Abschnitt 2.2.1) erreicht haben. Deutlich wird dies am Beispiel des Maschinen- und Automobilbaus. Hier sind neben den reinen (individuellen) Transportleistungen für den Export bzw. den inländischen Transport auch Mehrwertdienstleistungen wie der Zusammenbau von Komponenten oder die Durchführung der Qualitätskontrolle gefragt[161]. Ge-

155 Vgl. Gudehus, 2012, S. 137ff.
156 Vgl. Weber, 2012, S. 133ff.
157 Vgl. Kille et al., 2012, S. 47f.
158 ebenda, S. 46
159 ebenda, S. 47f.
160 ebenda, S. 47f.
161 Vgl. Kille et al., 2012, S. 130ff.

rade der Maschinenbau stellt mit seiner Vielzahl an Unternehmen mit jeweils individuellen Logistikansprüchen hohe Flexibilitätsanforderungen an die Logistikdienstleister. Vorherrschend sind deshalb vor allem Kontraktdienstleistungen, insbesondere für die kontinuierliche Produktversorgung[162]. Unter Kontraktdienstleistungen werden hierbei Leistungsbündel von unterschiedlichen Logistikdienstleistungen verstanden, welche kundenindividuell zu einem Gesamtangebot zusammengefasst werden und mit mehrjähriger Laufzeit angelegt sind[163].

3.3.3. Veränderungstreiber in der Logistik

Die am Beispiel der Maschinen- und Automobilbau angesprochen Anforderungen (siehe Abschnitt 3.2.2), mehr als den reinen Standardtransport zu leisten, stehen dabei exemplarisch für die gestiegenen Ansprüche, denen sich die Logistik auch in anderen Branchen gegenüber sieht. Damit begründet sich sogleich ein bereits langanhaltender Trend zur Flexibilisierung der Logistiksysteme. Viele Unternehmen sehen flexible Systeme am ehesten geeignet, auf die wachsenden Kundenansprüche zu reagieren[165]. Dieser Trend sowie die zunehmende Dienstleistungsorientierung und kundenindividuelle Leistungserbringung zählen zu den branchenübergreifenden sogenannten „Megatrends", welche bei den Logistikunternehmen zur Bildung von 3PL bzw. 4PL-Logistikdienstleistern[166] geführt hat[167].

In der aktuellen deutschsprachigen Studie „Die Top 100 der Logistik" (2012/13)[168] beschreibt *Kille* acht Megatrends, welche derzeit die Logistik beeinflussen. Dabei differenziert er zwischen den Trends, welche die Nachfrage bzw. welche das Angebot von Logistikleistungen betreffen.

Nachfrageseite[169]:

1. Globalisierung der Produktion
2. Wandel zur Dienstleistungsökonomie
3. Produktindividualisierung und „On-Demand"-Wirtschaft
4. Bedeutungszuwachs nicht-wirtschaftlicher Umfelder

Angebotsseite[170]:

5. „Pull"-Strukturen und Prozessorganisation
6. Neue Logistik-Gestaltungsoptionen durch technologischen Fortschritt
7. Auftreten neuer Logistikanbieter und Dienstleistungskombinationen
8. Konzentration auf Kernkompetenzen (Outsourcing)

Kille benennt darüber hinaus die folgend aufgelisteten „10 Treiber", welche maßgeblich auf die Logistik einwirken[171], wobei hierbei vor allem die deutsche Logistikwirtschaft gemeint ist:

- Dynamik der Weltwirtschaft und die treibende Kraft der Globalisierung
- Demografischer Wandel
- Klimawandel und daraus resultierende Anforderungen auf die Logistikabwicklung
- Staatliche Einflüsse
- Neue Risiken entlang globaler Versorgungsketten
- Professionalisierung der Logistik
- Konzentration auf Kernkompetenzen nicht nur bei Leistungen und Ressourcen
- Neue Dienstleistungsorientierung mit Fokus auf den Nutzen von Produkten
- Neue Technologien in der Logistik
- Die schneller tickende Uhr und abgeleitete Herausforderungen

Diese Trends decken sich weitestgehend mit bereits

162 ebenda, S. 130ff.
163 ebenda, S. 82
164 ebenda, S. 47ff.
165 Vgl. Straube et al., 2008, S. 45
166 Third Party (3PL) bzw. Fourth Party Logistics Provider (4PL) bezeichnen Logistikanbieter, deren Leistungen über die klassischen Transporttätigkeiten (TUL) hinausgehen und um weitreichende Dienstleistungen zur Koordination und Organisation von Logistiktätigkeiten ergänzt sind. Vgl. ten Hompel et al., 2011, S. 104
167 Vgl. Kille et al., 2012, S. 82
168 ebenda
169 Vgl. Kille et al., 2012, S. 4ff.
170 ebenda, S. 4ff.
171 Aufzählung entnommen aus: Kille et al., 2012, S. 6ff.

in Studien der BVL von 2008 festgestellten und in Folgestudien bestätigten Veränderungstreibern, die auf die Logistik wirken. In Übereinstimmung mit *Kille* werden von der BVL ebenfalls folgende Megatrends identifiziert[172]:

- Globalisierung
- gestiegenen Risiken entlang der Versorgungsketten
- Umwelt- und Ressourcenschutz (Klimawandel), nachhaltiges Wirtschaften
- Veränderungen durch neue Technologien
- steigender Kostendruck
- demographischer Wandel und sich abzeichnender Fachkräftemangel
- Erweiterung der Anforderungen auch auf soziale Belange
- steigende staatliche Regulierung

Zu früheren Studien sind mit der aktuellen BVL-Studie (2013) noch weitere Trends hinzugekommen[173]:

- Volatilität der Supply Chains[174] und in der Nachfrage[175]
- Herausforderungen der Netzwerkökonomie[176]
- Fragmentierung der Distributionskanäle[177]

Eine Umkehr von einem ursprünglichen Megatrend scheint sich dagegen bei Outsourcing-Konzepten abzuzeichnen. Angesichts der Gesamtkosten sehen sich viele Unternehmen veranlasst, ihre Outsourcingstrategien zu überdenken und gehen teilweise zu „near-shoring"-Konzepten über[178].

Somit scheint sich ein Wandel zu früheren Studien abzuzeichnen. Gaben in der BVL-Studie von 2008 noch 75% der Unternehmen die Globalisierung und die Ausrichtung auf globale Beschaffung (global Sourcing), Produktion (globale Produktionsverbünde) und Distribution[180] als eines der wichtigsten Themen an und hatten diese Ausrichtung bereits begonnen bzw. vollzogen[181], so wird in der aktuellen Studie (2013) eine Abkehr von dieser Strategie festgestellt[182]. Zwar wird weiterhin global beschafft, aber mitunter dann lokal für den dortigen Markt bzw. die lokale Produktion bestellt[183]. Als Hauptgrund für den wachsenden Trend zum Local-Sourcing werden die steigenden Logistikkosten und die Komplexität globaler Versorgungsketten angeführt[184]. Den Transportkosten kommt dabei mit 29,5% der Hauptanteil an den Logistikkosten zu und weist zugleich auch einen starken Anstieg zur vorherigen Studie auf (Abbildung 6).

3.3.4. Konsequenzen für die Logistikwirtschaft

Die Volatilität in den Märkten und Versorgungsketten hat in den vergangenen Jahren zugenommen[185] und stellt eine der Hauptherausforderungen an die Logistik dar. Die Schwankungen in den Systemen haben verschiedene Gründe (Nachfrageschwankungen, Produktivitäts- und Qualitätsprobleme bei den Zulieferern etc.), wirken sich aber durch die starke Vernetzung der globalen Produktionsverbünde immer stärker auf die gesamte Versorgungskette aus[186]. Verstärkt wird dies noch durch die sich stetig verkürzenden Produktlebenszyklen und die bestandsarme Fertigung der Lean Production. Für die Logistik stellt dies eine hohe Unsicherheit in Bezug auf die Planbarkeit von Beständen dar und findet Ausdruck in immer schnelleren Taktraten in der gesamten Supply Chain[187]. Da sich der Trend zu immer geringeren Beständen (Lager- wie Umlaufbeständen) allein durch den anhaltenden Kostendruck fortsetzen wird, ist davon auszugehen,

172 Vgl. Straube et al., 2008, S. 12ff.
173 Vgl. Handfield, 2013, S. 8ff.
174 ebenda, S. 29
175 ebenda, S. 15
176 Damit wird sowohl die Herausforderung an die vertikale und horizontale Integration der Unternehmen in den Wertschöpfungsketten angesprochen (end-to-end integration), welche künftig in viel engeren Netzwerkstrukturen arbeiten müssen, als auch die Herausforderungen, die sich auf Kundenseite durch neue Absatzstrukturen, v.a. den E-Commerce ergeben. Vgl. Handfield, 2013, S. 14
177 ebenda, S. 14f.
178 ebenda, S. 46
179 ebenda, S. 29
180 Vgl. Straube et al., 2008, S. 94f.
181 ebenda, S. 92
182 Vgl. Handfield, 2013, S. 11
183 Vgl. Kille et al., 2012, S. 6ff.
184 Vgl. Handfield, 2013, S. 46
185 ebenda, S. 8
186 ebenda, S. 29
187 Vgl. Kille et al., 2012, S. 4f.

dass sich die Logistiksysteme der produzierenden Unternehmen in Richtung hochflexibler und adaptiver Systeme weiterentwickeln werden[188]. Diese Entwicklung wird unterstützt durch den gleichzeitigen parallelen Trend zur kundenindividuellen Fertigung (Mass Customization) sowie allgemein immer kürzeren Produktlebenszyklen und die immer feingliedrigere Variantenfertigung[189]. Dies erfordert auf Produktionsseite die Ausrichtung auf die Losgröße 1 und schnelle Varianten- und Modellwechsel. Durch den hohen Marktdruck, der zu Investitionen in neue, flexiblere Technologien zwingt, wird Mass Customization in immer mehr Bereichen möglich und gleichzeitig vom Handel als Option zur Differenzierung zu konkurrierenden Anbietern erkannt und eingesetzt[190]. Die Einbindung des Kunden in die Fertigung[191] ist logische Konsequenz aus seinen Individualisierungsansprüchen und einer immer kurzfristigeren Bedarfsentscheidung. Für Produzenten stellt die Anreicherung ihrer Produkte mit ergänzenden Dienstleistungen darüber hinaus eine Möglichkeit der Wettbewerbsdifferenzierung in gesättigten Gütermärkten dar[192]. Unter dem Stichwort des Kundenintegrierten Engineering[193] findet dieses Konzept Eingang in die Produktion.

Mit dem Megatrend Globalisierung steigt die zu transportierende Gütermenge trotz ebenso stetig steigender Energiekosten derzeit weiter an[194]. Die Zunahme im Seefrachtverkehr wird durch gestiegene Kapazitäten der Containerschiffe zwar kompensiert, dennoch wird angenommen, dass die großen Seehäfen an ihre Kapazitätsgrenzen stoßen werden[195]. Damit würden folglich weitere Kostensteigerungen und Störungen (z.B. durch Engpässe) in der globalen Versorgungskette einhergehen[196]. Zugleich wird das Wachstum der Gütermenge immer wieder von Krisen unterbrochen, und die Schwankungen in der internationalen Wirtschaft, sowie im Transportvolumen nehmen weiter zu[197]. Stark vernetzte Prozesse bedingen zudem Fragilität im Gesamtsystem: *„Der Eintritt von Schadensereignissen ist nicht unbedingt wahrscheinlicher, nur die Auswirkungen sind größer“*[198]. So kann der Ausfall eines Zulieferers bzw. des Zulieferers eines Zulieferers (2-tier supplier) Auswirkungen auf das Gesamtsystem haben und sogar zum Stillstand des Systems führen[199]. Die Ursachen hierfür können technischer (Störung der IT oder Inkompatibilitäten), politischer (Konflikte, Sanktionen, Kriege) oder natürlicher Art (z.B. Naturkatastrophen) sein. Auf mögliche Störungen dieser Art werden die Unternehmen ebenfalls mit flexibleren Systemen in der Logistik reagieren müssen, gleichzeitig wird hierdurch der Trend zur regionalen Fertigung verstärkt („Re-Regionalisierung“[200], „near-shoring“[201]) und mitunter das Lean Management (v.a. im Hinblick auf die bestandsarme Fertigung) hinterfragt[202].

Die internationalen, stark verzweigten Wertschöpfungsketten unterliegen zunehmenden staatlichen Regulierungsmaßnahmen. Diese erfolgen vor allem vor dem Hintergrund gestiegener gesetzlicher, aber auch gesellschaftlicher[203] Anforderungen an Nachhaltigkeit, Ressourcenschonung und CO_2-ärmere Prozesse, um den Folgen des Klimawandels zu begegnen. Darüber hinaus steigen die zu erfüllenden Sicherheitsanforderungen (Richtlinien und Gesetze) zum Schutz der Gesellschaft[204]. Beides führt zu Kostensteigerungen.

Die Anzahl der strategischen Ziele, mit denen sich LogistikmanagerInnen heute konfrontiert sehen, ist im Vergleich zu vorherigen Studien gestiegen[205], wobei das Ziel niedriger Kosten bislang noch das wichtigste ist[206]. Dabei stehen aber auch einige Ziele in Konflikt miteinander, so bspw. das Ziel niedrigerer CO_2-Emissionen und die gleichzeitige Forderung des Kunden nach schnellerer individuellerer Belieferung[207], während die Kunden gleichzeitig nicht bereit sind, für „grüne Logistik“ zu bezahlen[208]. Obwohl die Kostenfrage nach wie vor eine

188 Vgl. Handfield, 2013, S. 22
189 Vgl. Spath, et al, 2013, S. 90ff
190 Vgl. Kille et al., 2012, S. 6ff.
191 Einen Ausweg aus der Variantenvielfalt und der damit verbundenen Komplexität stellt der Ansatz der Mass Customization dar. Vgl. Piller, 2006, S. 150f.
192 Vgl. Kille et al., 2012, S. 4
193 Vgl. Kagermann et al., 2013, S. 110
194 Vgl. Handfield, 2013, S. 29
195 Vgl. Kille et al., 2012, S. 6ff.
196 Zu anderen Einschätzungen kommt die Seeverkehrsprognose 2030: Vgl. MWP et al., 2014, S. 153
197 Vgl. Handfield, 2013, S. 15
198 Vgl. Kille et al., 2012, S. 6ff.
199 Beispiele für Supply Chain-Störungen: Vgl. Hartmann et al., 2014, S. 97f.
200 Vgl. Kille et al., 2012, S. 6ff.
201 Vgl. Handfield, 2013, S. 57
202 Vgl. Pieringer, 2011, S. 46f.
203 Vgl. BME, et al., 2012, S. 18
204 Vgl. Straube et al., 2008, S. 64f.
205 Vgl. Handfield, 2013, S. 11
206 ebenda, S. 11
207 ebenda, S. 14
208 ebenda, S. 58

hohe Bedeutung bei den Entscheidungsprozessen einnimmt, rückt sie in den unternehmensstrategischen Entscheidungen zunehmend in den Hintergrund. Als wesentlicher Faktor der Unternehmensstrategie gilt inzwischen der Servicegrad des Logistikunternehmens[209].

Begünstigt werden komplexere Wertschöpfungsketten durch die technologischen Weiterentwicklungen, insbesondere in der globalen Vernetzung über (zunehmend mobile) Internettechnologien. Unternehmen werden damit Teil von verschiedenen Netzwerken, jeweils mit der Ausrichtung auf eine bestimmte Leistungsstruktur. In der Folge werden Wertschöpfungsketten dadurch immer stärker zergliedert[210], was zum Anstieg des logistischen „Handlings" führt. In der Logistik entstehen zugleich immer differenziertere Service-Angebote und Geschäftsmodelle[211], welche die reine Kernleistung (z.B. den Transport) um zusätzliche Dienstleistungen erweitern. Damit differenzieren sich die Angebote zum Wettbewerb weiter aus für führen gleichzeitig zu seiner Beschleunigung. Die Logistikunternehmen versprechen sich aus der Dienstleistungsorientierung u.a. eine Kompensation der steigenden Kosten aus Handling und Transport, welche sie aus Wettbewerbsgründen nicht an ihre Kunden weitergeben können.[212]

Der Wettbewerbsdruck und die zunehmende Geschwindigkeit („schneller tickende Uhr"[213]) sorgen für einen hohen Innovationsdruck bei den Logistikanbietern, welcher die Investitionsbereitschaft in neue Technologien fördert[214], zugleich aber auch ein hohes Risiko von Fehlinvestitionen („Investitionsruinen"[215]) darstellt. Allein schon aus diesem Grund, aber bestärkt durch kurze Innovationszyklen, hohe Investitionssummen und mangelndes Fachwissen (bspw. in der Einführung neuer IT-Systeme) in den Unternehmen werden diese demzufolge eher auf Kooperationen, Outsourcing der IT (z.B. Rechenzentren, Software, etc.) und flexibel „buchbare" Leistungen[216] setzen, wie dies in einigen Bereichen bspw. mit Cloud-basierten Diensten bereits möglich ist[217].

3.3.5. Strategieansätze der Logistikwirtschaft

Die erfolgreichsten und aussichtsreichsten Strategien, den Megatrends (vgl. Abschnitt 3.3.3) zu begegnen, wurden in der BVL-Studie in sogenannten Schlüsselstrategien gesammelt und zum Strategiemodell: PEOPLE – PROCESS –TECHNOLOGY-NETWORK zusammengefasst[218]. Hinter jeder der Schlüsselstrategien verbergen sich Leitstrategien für die Unternehmensausrichtung.

Aus dem demografischen Wandel und dem sich daraus ergebenen Fachkräftemangel zum einen und den gestiegenen Flexibilitätsanforderungen an die Unternehmen zum anderen leitet sich die Strategie PEOPLE ab. Firmen investieren in ihr Personal, in fortlaufende Fortbildung am Arbeitsplatz, sowie in gute Arbeitsbedingungen. Arbeitskräfte werden als die Schlüsselressource im Wettbewerb eingestuft und es gilt, diese dauerhaft ans Unternehmen zu binden und zu hoher und schneller Entscheidungskompetenz unter Unsicherheit zu befähigen[220]. Darüber hinaus suchen Firmen den direkten Kontakt zu den Hochschulen, um sich auch hier den unmittelbaren Zugang zu Nachwuchstalenten zu sichern[221].

Globale Prozessstandards und agile Logistik[222] werden als eine mögliche Strategie für die Begegnung volatiler und komplexer Geschäftsumgebungen angesehen. Darüber hinaus stehen hinter der Leitstrategie PROCESS die Herausforderungen, Unternehmensprozesse zu entwickeln, die flexibel und international, d.h. in unterschiedlichen Kulturkreisen anwendbar sind. Auch hier steigen die Anforderungen an gut ausgebildete Fachkräfte, die sich sicher in den verschiedenen Kulturkreisen bewegen, Logistikprozesse auf veränderte Kulturen adaptieren und diese Prozesse weiterentwickeln können[223].

In weit verzweigten, tief gegliederten Versorgungsketten, ist eine genaue Betrachtung der Kapazitäten, der Stärken und Schwächen aller Netzwerkpartner notwendig, um die Stabilität des gesamten Netzwerkes zu erhalten. Der Ausfall eines Zulieferers kann im Extremfall das gesamte Netz zum

209 Vgl. Straube et al., 2008, S. 16
210 Vgl. Kille et al., 2012, S. 4
211 Vgl. Dujin et al., 2014, S. 12
212 Die Aussicht auf bessere Margen wird u.a. als Begründung für das Entstehen von Logistikdienstleistern (3PL, 4PL) am Markt gesehen. Vgl. Kille et al., 2012, S. 82
213 Vgl. Kille et al., 2012, S. 6ff.
214 Vgl. Meinhardt et al., 2011, S. 122ff.; S. 128f.
215 Vgl. Kille et al., 2012, S. 6ff.
216 Vgl. Wildemann, 2008, S. 34ff.
217 Vgl. Wolf et al., 2013, S. 18ff.
218 Vgl. Handfield, 2013, S. 34ff.
219 ebenda, S. 34
220 ebenda, S. 39f.
221 Vgl. Handfield, 2013, S. 39
222 ebenda, S. 41f.
223 ebenda, S. 41f.

Stillstand bringen[224] (vgl. Abschnitt 3.3.4). In der Leitstrategie NETWORK wird daher der gemeinsame Informationsaustausch über die Unternehmensgrenzen hinweg über alle Ebenen (auch 2-tier supplier) als besonders wichtig formuliert. Ferner gibt es bei kritischen Versorgungsbereichen bereits Ansätze, diese zu internalisieren (z.B. durch Firmenübernahmen), um eine bessere Kontrolle über die Fertigung kritischer Güter und deren Prozesse zu erlangen[225].

Die Nachverfolgung und Steuerung globaler Warenflüsse wird durch immer bessere Technik verfeinert und die hieraus gewonnenen Daten werden für weitere Optimierungen genutzt[226]. Nach der Leitstrategie TECHNOLOGY werden Logistikunternehmen fortwährend in neue Technik investieren, um näher an die Kundin und ihre Bedürfnisse heranzukommen[227]. Für die Abstimmung und Optimierung der Netzwerkpartner in der Supply Chain sind diese Techniken ebenfalls unverzichtbar, um einen konsistenten, jederzeit aktuellen Datenbestand zu erhalten[228].

Ansätze die Unternehmen untereinander enger zu vernetzten, d.h. auf gemeinsame Datenbestände zuzugreifen und eine gemeinsame Berechnungsbasis für die Produktionsplanung zu treffen, werden mit dem Strategieansatz der „end-to-end integration“ beschrieben[229]. Die informatorische Kopplung der Unternehmen in einer Supply Chain geht dabei über die einfache Verknüpfung der Systeme (wie bspw. über EDI[230] bereits praktiziert wird) hinaus und arbeitet auf einem gemeinsamen Datenbestand, der in Echtzeit gepflegt wird. Die Produktionsplanung geht dann von einer prognoseorientierten Planung zu einer nachfragegesteuerten Produktion über. Auf diese Weise lassen sich starke Nachfrageschwankungen in der Versorgungskette ausgleichen[231]. Der gemeinsame Zugriff auf die hochsensiblen, wettbewerbsrelevanten Daten des Verkaufs durch alle Partner in der Versorgungskette setzt dabei allerdings ein hohes Maß an Vertrauen der Geschäftspartner untereinander voraus.

Die eigenständige Leitstrategie COMMUNITY vervollständigt das Set an vorgeschlagenen Strategiebündeln. Den gestiegenen Anforderungen von Gesellschaft und Politik an die Unternehmen trägt diese Strategie Rechnung. Hierin werden Maßnahmen versammelt, welche zur Reduzierung von CO_2-Emissionen, sowie zum nachhaltigen Umgang mit jeglichen Ressourcen führen. Ebenso finden die globalen Arbeitsbedingungen, explizit also auch jene bei den Partnerunternehmen (1-tier, 2-tier Supplier) immer mehr öffentliche Beachtung, sodass sich auch die Logistikunternehmen veranlasst sehen, ihre Corporate Social Responsibility (CSR)-Richtlinien auszubauen und weiterzuentwickeln[232]. Auf selbem Wege wird der staatlichen Einflussnahme durch zunehmende Regulierung durch die aktive Einbeziehung in die Logistikstrategien begegnet. Regierungen bzw. Regierungsbehörden werden dabei letztlich selbst zum Bestandteil der Supply Chain[233].

3.4. Veränderungen mit Industrie 4.0

3.4.1. Technologie- und Veränderungstreiber im industriellen Umfeld

Vergleichbar zu den für die Logistikwirtschaft beschriebenen Megatrends werden auch für die Gesamtwirtschaft und die Gesellschaft Veränderungstreiber ausgemacht, die jedoch nicht getrennt sondern in Wechselwirkung bzw. Übereinstimmung mit den bereits darstellten Megatrends der Logistik betrachtet werden müssen. Wie schon eingangs dargestellt wurde (siehe Abschnitt 3.2.2), stellt die industrielle Fertigung, insbesondere mit den Schlüsselindustrien des Automobil- und Maschinenbaus[234] die Keimzelle industrieller Veränderungen dar[235]. Die in diesem Abschnitt untersuchten Studien haben daher die Veränderungstreiber im industriellen Umfeld im Fokus, die mit dem Begriff der Industrie 4.0 umschrieben werden. Abschließend soll untersucht werden, welche Implikationen die Veränderungen auf die Logistikwirtschaft haben.

[224] ebenda, S. 10
[225] ebenda, S. 11
[226] ebenda, S. 51
[227] ebenda, S. 51
[228] ebenda, S. 54ff.
[229] Vgl. Handfield, 2013, S. 54ff.
[230] electronic data interchange
[231] Vgl. Handfield, 2013, S. 54
[232] Vgl. Kille et al., 2012, S. 4f.
[233] Vgl. Handfield, 2013, S. 58, S. 60
[234] Zum Logistikprofil des Maschinenbaus siehe: Kille et al., 2012, S. 130ff.
[235] In den USA ist es umgekehrt, hier wird die Software-/IT-Industrie als Treiber des Advanced Manufacturing 2.0 gesehen, welche mit ihren Lösungen zur Datenaufbereitung, -übermittlung und -speicherung an die Produktion herantritt. Dies lässt sich vor dem Hintergrund des geringeren Industrialisierungsgrades bzw. dessen Rückgangs und Fokussierung auf die Dienstleistungssektoren erklären. Vgl. Weiss, H., 2014, S. 2

Abbildung 8: Technologiefelder der Industrie 4.0[244]

3.4.2. Konvergenz von Entwicklungen

Aus der seit den 1970er Jahren anhaltenden Computerisierung der Fertigungstechnik haben sich bis in die heutige Zeit hochintelligente Fertigungssysteme entwickelt[236]. Zunehmend wird diese Intelligenz durch Vernetzung untereinander zu Cyber-Physikalischen Systemen weiterentwickelt. Aus der Verbindung der CPS untereinander entstehen in den Fabriken vernetzte Produktionssysteme, die als Cyber-Physikalische Produktionssysteme (CPPS) beschrieben werden[237]. Parallel haben sich in anderen Bereichen aus der Entwicklung der Computer- und Kommunikationstechnik heraus neue Technologien mit sogenannten Smart Devices[238] und dezentralen Software-Services, den sogenannten Cloud-Diensten, entwickelt[239].

Diese Konvergenz[241] (Abbildung 9) setzt sich fort und ist ein maßgeblicher Veränderungstreiber für die Produktionstechnik und schließlich auch für die daran gebundenen Logistikkonzepte. In der von dem Verband BITKOM[242] zusammen mit dem Fraunhofer Institut IAO erstellten Studie zur Industrie 4.0[243] werden fünf Technologiefelder identifiziert, welche die aktuellen Entwicklungen, die mit dem Begriff der Industrie 4.0 beschrieben werden, identifizieren und gliedern. Im Einzelnen sind dies „Embedded Systems CPS“, „Smart Factory“, „Robuste Netze“, „Cloud Computing“ und „IT-Security“ (Abbildung 8).

Auch eine Studie von General Electric (GE)[245] macht als wesentliche Treibertechnologien die Möglichkeiten von Cloud-Technologien, mobilen Internettechniken sowie intelligenten Maschinen (im Sinne von CPS) aus, die hierbei als sogenannte Enabler-Technologien beschrieben werden[246]. Andere Studien kommen zu ähnlichen Aufteilungen[247], wobei

236 Vgl. Kief et al., 2013, S. 19f.
237 Vgl. Bauer et al., 2014, S. 9
238 Vgl. Kagermann et al., 2013, S. 17; Gausemeier, 2014, S. 8
239 Vgl. Gausemeier, 2014, S. 7
240 ebenda, S. 7
241 Vgl. Gausemeier, 2014, S. 7f.
242 Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V.
243 Vgl. Bauer et al., 2014
244 Vgl. Bauer et al., 2014, S. 22
245 Vgl. Annunziata et al., 2013
246 ebenda, 26ff.
247 Vgl. Dujin et al., 2014, S. 10; Gausemeier, 2014, S. 8;

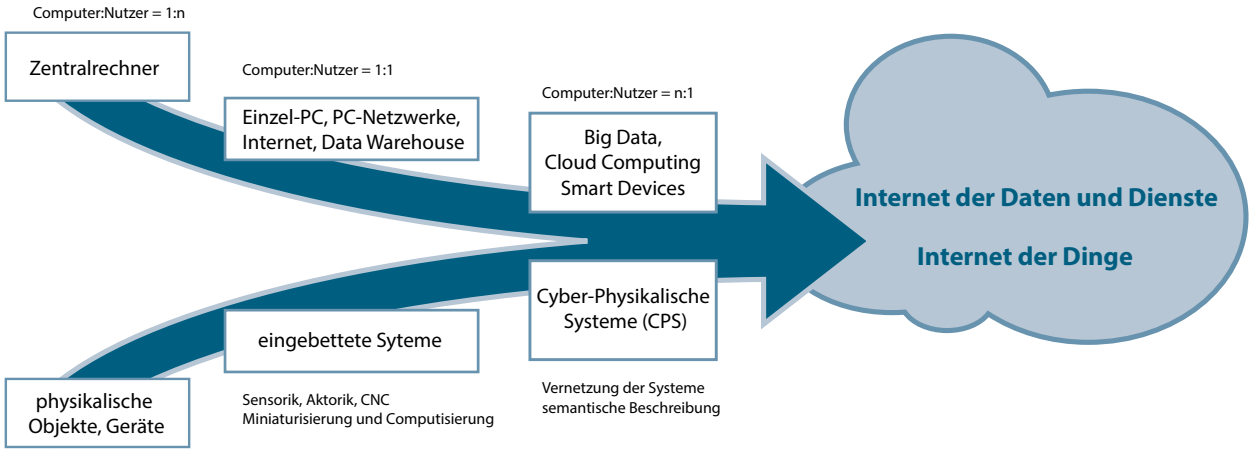


Abbildung 9: Konvergenz der Technologien[240]

diese mitunter deutlicher auf den Trend der Robotik (Leichtbauroboter) und neuer Fertigungsverfahren (z.B. additive Fertigung, 3D-Druck[248]) eingehen, welche im Modell des BITKOM u.a. hinter dem Begriff „low cost automation“ verborgen sind. Darüber hinaus werden die sozialen Aspekte der Industrie 4.0 in den meisten Studien nicht behandelt bzw. nur erwähnt. Im Detail hat sich diesem Thema eine aktuelle Studie des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO angenommen, auf das an dieser Stelle verwiesen sei[249].

Die fünf dargestellten Technologiefelder werden in der BITKOM-Studie auch in ihren Auswirkungen auf verschiedene Branchen (Automobilbau, Landwirtschaft und Maschinenbau) untersucht, wobei als Referenzmodell hierbei die Wertkette nach Porter[250] herangezogen wird[251]. Vor dem Hintergrund der in dieser Arbeit hergestellten Bezüge zu den Schlüsselindustrien Deutschlands und den Verbindungen zur Logistikwirtschaft erscheint die BITKOM-Studie damit als Ausgangsbasis für die Betrachtungen innerhalb dieser Arbeit gut geeignet und soll im Folgenden den Rahmen für die nähere Betrachtung der unter Industrie 4.0 zu untersuchenden Veränderungen geben. Ergebnisse aus den übrigen genannten Studien fließen in diese Gliederung mit ein.

3.4.3. Embedded Systems CPS

Die fortschreitende Miniaturisierung, die gleichzeitige Leistungssteigerung und der fortwährende Preisverfall in der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) machen den Einsatz von Computertechnik in immer mehr Bereichen des Alltagslebens und in der industriellen Fertigung möglich. Dort wird Rechnertechnik bereits seit den 1970er Jahren eingesetzt und führte von einfachen NC-Programmierungen über die Weiterentwicklung zu CNC-Systemen und speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS), zu Systemen mit eingebetteter Software[252]. Wesentliches Kriterium der aktuellen Veränderungen ist auf der einen Seite die Vernetzung dieser Systeme mittels Internettechnologien untereinander (z.B. mit Profinet[253]) und auf der anderen Seite auch mit Menschen und Gütern, die sich im Umfeld dieser Systeme bewegen[254]. CPS sind das Ergebnis der Konvergenz von Systemen mit eingebetteter Software (intelligente eingebettete Systeme) und global verfügbaren Datennetzen wie dem Internet[255]. Diese Konvergenz (vgl. Abbildung 9) begründet den Wandel von mechatronischen Systemen mit starrer Kopplung hin zu intelligenten Systemen[256] mit modifizierbaren Kopplungen von Sensorik und Aktorik[257].

Damit werden vormals statische, passive Objekte wie Motoren und Sensoren zu „intelligenten“ Bestandteilen eines vernetzten Systems, die unterein-

248 Vgl. Dujin et al., 2014, S. 12, 18
249 Vgl. Spath et al., 2013)
250 Zur Wertkette nach Porter: Vgl. Porter, 2014, S. 75
251 Vgl. Bauer et al., 2014, 25ff.
252 Vgl. Kief et al., 2013, S. 139ff., S. 157
253 Profinet ist ein auf dem Ethernetstandard basierendes Netzwerkprotokoll, über das die Maschinen bzw. Maschinenteile vernetzt werden. Hiermit lassen sich über IP-Adressen einzelne Bestandteile eines Fertigungssystems adressieren. Vgl. SIEMENS AG, 2013e, S. 7
254 Vgl. Geisberger, 2012, S. 22
255 Vgl. Geisberger, 2012, S. 20f.
256 Vgl. Gausemeier et al., 2013b, S. 13
257 ebenda, S. 15

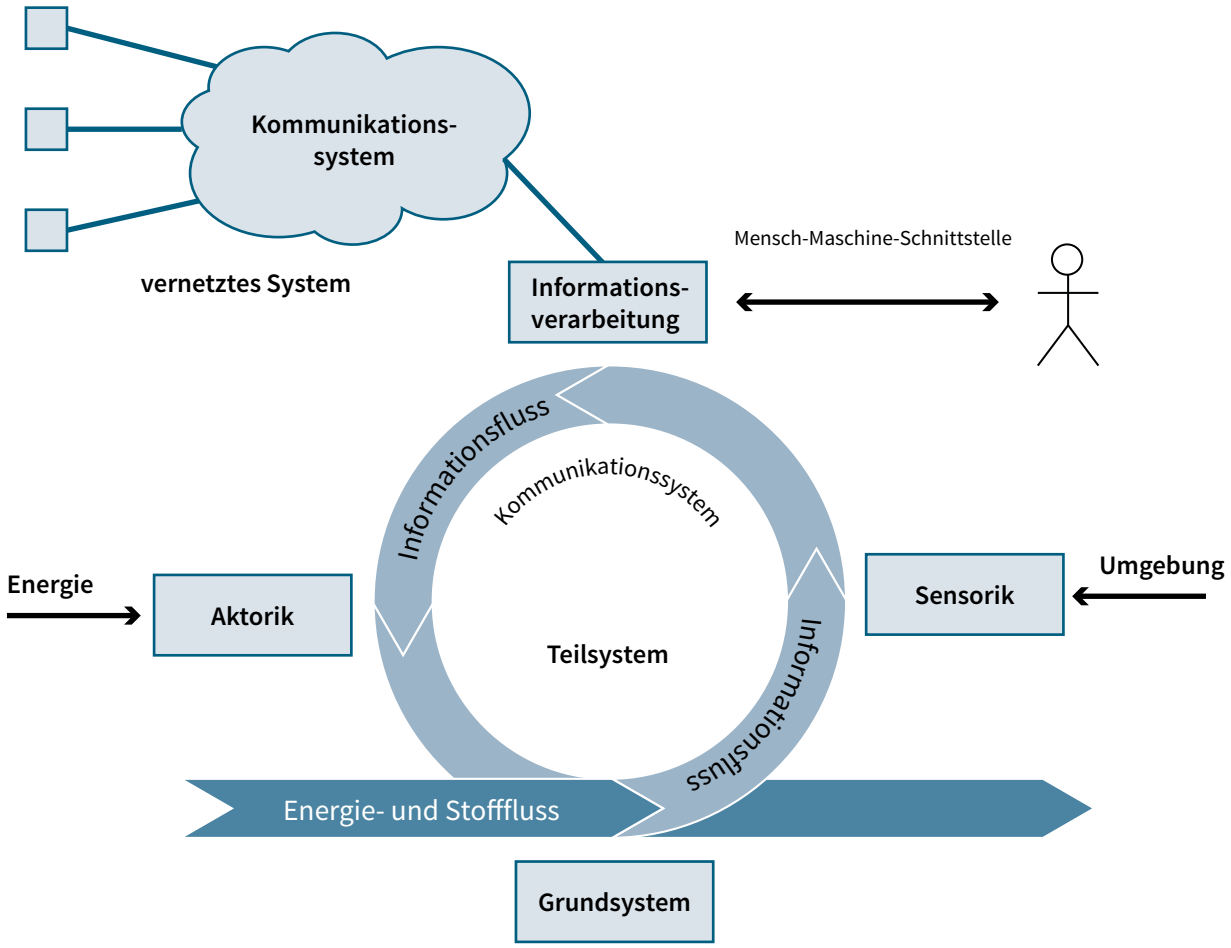


Abbildung 10: Schema eines CPS[258]

ander Informationen austauschen, Informationen über die Umgebung sammeln und weitergeben können[259]. In einem vollständig integrierten Wertschöpfungsprozess geschieht dies ohne Unterbrechung über die Grenzen der an der Entwicklung, Herstellung und dem Vertrieb der Produkte beteiligten Unternehmen hinweg[260]. Die „Intelligenz" der CPS entsteht durch die Vernetzung und die Möglichkeit, das Systemverhalten in den in der Entwicklung vorweggedachten Spielräumen zu beeinflussen[261]. Dabei können die Fähigkeiten der CPS in Form von Diensten über Internetplattformen abgebildet werden, gleichzeitig sind die CPS über diese Dienste ansprech- und steuerbar. Die Möglichkeiten vormals geschlossene autarke Systeme über Internettechnologien zu verbinden wird im Konzeptansatz des „Internet der Dinge"[262] beschrieben. Die Nutzung der Fähigkeiten, also der jeweiligen Intelligenz dieser Systeme über Internetplattformen als sogenannte Dienste wird im Konzeptansatz des „Internet der Dienste" beschrieben[263]. Zusammengefasst wird daher häufig vom „Internet der Dinge und Dienste gesprochen"[264]. Für die Automation ergibt sich daraus ein neues „Kommunikationsparadigma"[265]. CPS stellen damit den Kern der (fertigungs)technischen Veränderungen in der Industrie 4.0 dar.

Für den Automobil- und Maschinenbau stellen CPS eine herausragende Rolle dar. Durch den Einsatz intelligenter Systeme werden komplexe Fertigungssteuerungen und ein hoher Automatisierungsgrad möglich[266]. Gleiches gilt für die Intralogistik, in der CPS die Steuerung von Materialflüssen und die Identifikation und Nachverfolgung von Gütern übernimmt (Tracking und Tracing)[267]. Branchen-

258 Vgl. Gausemeier, 2014, S. 6
259 Vgl. Bauer et al., 2014, S. 19
260 ebenda, S. 19
261 Vgl. Gausemeier et al., 2013a, S. 49f.
262 Vgl. Strietzel, 2013, S. 20
263 Zur Beschreibung des Internet der Dienste und der Weiterentwicklung zur Vision der Dienste Cloud Vgl. Weiner et al., 2010, S. 72ff.
264 Vgl. Kagermann et al., 2013, S. 17ff.
265 Vgl. VDI/VDE, 2013, S. 4f.
266 ebenda, S. 9
267 Vgl. acatech, 2011, S. 15

übergreifend gilt, dass von der Realisierung von CPS-fähigen Systemen eine kostengünstigere, effizientere Produktion erwartet wird, die sich durch geringere Rüstzeiten sowie einen optimierten Energie- und Ressourceneinsatz auszeichnet[268].

Da es noch kein allgemeingültiges Verständnis über die Definition von CPS gibt, soll für die weitere Verwendung in dieser Arbeit der Begriff der Cyber-Physikalische Systeme (CPS) in Anlehnung an *Geisberger*[269] wie folgt definiert werden:

Cyber-Physikalische Systeme (CPS) stellen Systeme mit eingebetteter Software dar, die mittels Sensoren Daten über den Zustand ihrer Umgebung erfassen und mittels Aktoren auf physikalische Vorgänge einwirken. Die erfassten Daten können von diesen Systemen gespeichert und verarbeitet werden. Das System kann aktiv oder reaktiv im Rahmen seiner vorweg programmtechnisch und physikalisch/motorisch definierten Möglichkeiten mit seiner Umwelt physisch als auch über Vernetzung digital interagieren. Für die Interaktion werden über das Internet erreichbare Daten und Dienste sowie die im System vorhandenen Schnittstellen zur Umgebung (interaktive Bedienoberflächen, Eingabegeräte, etc.) genutzt.

3.4.4. Smart Factory

Die mit CPS erreichte Intelligenz der einzelnen Maschine bildet in der Aggregation aller vernetzten Maschinen in der Fabrik das Ausgangsszenario für das Konzept der „Smart Factory“[270]. Mit CPS wird eine schnelle Austauschbarkeit von Maschinen erreicht, welche sich dank ihrer Intelligenz selbst konfigurieren und in vorhandene CPS-Strukturen einfügen können (Plug & Produce)[271]. Hierdurch steigt die Verfügbarkeit und Kapazitätsflexibilität des Unternehmens bzw. des Verbundes. CPS-fähige Maschinen können sich danach adaptiv auf die jeweiligen Fertigungsanforderungen einstellen und untereinander Informationen (z.B. Produktionsparameter) austauschen. Gleichartige Maschinen können somit auch „voneinander lernen“[272] und sich anhand des Informationsaustausches über Maschinenzustände und Auftragsdaten auf ein gemeinsames Ziel hin ausrichten[273]. Als Zielvorgaben gelten dabei nach wie vor Durchlaufzeit, Qualität und Auslastung der Fertigung. Ein solches Netzwerk an CPS-fähigen Anlagen stellt ein Cyber-Physikalische Produktionssystem (CPPS) dar[274] und bildet damit das Zielsystem der Industrie 4.0. Es ist gleichzeitig eine Weiterentwicklung der Lean Production, da es auf den bereits vorhandenen Automatisierungsansätzen und flussorientierten Produktionssystemen aufsetzt[275]. Das Konzept der Smart Factory fügt sich damit an die bereits weit entwickelten flexiblen Fertigungssysteme (FFS[276]) der Industrie an und erweitert es um die Möglichkeiten, die sich aus der Vernetzung und dezentralen Steuerungsmöglichkeiten ergeben. FFS sind dabei je nach Automatisierungsgrad des Betriebes bereits zu Fertigungszellen oder -inseln kombiniert. Das Prinzip der Verkettung folgt hierbei in den meisten Fällen dem Prinzip sich ersetzender Maschinen[277], welches angelehnt ist an das Flussprinzip nach Lean.

Nicht immer ist der Einsatz von flexiblen Fertigungssystemen jedoch auch wirtschaftlich sinnvoll. Die Kosten für die Automatisierung können erheblich steigen und über dem Einsatz einfacherer Maschinen liegen[278]. Der Faktor Mensch ist und bleibt hier von Bedeutung, die Flexibilität des Menschen kompensiert alle, technisch nur aufwändig zu realisierende Techniken und ist bei allen Automatisierungs- und Flexibilisierungsstrategien der Industrie 4.0 stets zu berücksichtigen[279]. Anhand des Erfolgs des Toyota Produktionssystems (TPS), welches das weit verbreitete Lean Management begründete[280], lässt sich dies gut nachvollziehen. Das TPS war und ist gerade deshalb erfolgreich, weil es die menschlichen Fähigkeiten (körperlich wie geistig) in die Prozessgestaltung mit einbezieht[281].

Die weitere Automatisierung in den Fabriken wird durch Entwicklungen in der Robotik unterstützt. Sogenannte Leichtbauroboter (LBR) werden derzeit in hohen Stückzahlen von den Automobilherstellern und dem Maschinenbau nachgefragt[282]. Ihr Vorteil liegt in den flexiblen Einsatzmöglichkeiten[283]. So lässt sich

[268] Vgl. VDI/VDE, 2013, S. 5
[269] Vgl. Geisberger, 2012, S. 22
[270] Vgl. Kagermann, 2013, S. 122
[271] Vgl. Bauer et al., 2014, S. 20
[272] Vgl. Spath et al., 2013, S. 57, Vgl. Bauer et al., 2014, S. 29
[273] Vgl. Bauer et al., 2014, S. 20
[274] Vgl. BMBF, 2012a, S. 14ff.; Vgl. Kagermann et al., 2013, S. 89ff.
[275] Vgl. Sendler, 2013, S. 75f.
[276] Zur Definition von Flexiblen Fertigungssystemen: Vgl. Kief et al., 2013, S. 311
[277] Vgl. Kief et al., 2013, S. 320ff.
[278] ebenda, S. 338
[279] Vgl. Spath et al., 2013, S. 46ff.
[280] Heute wenden ca. 57% der Unternehmen in Europa Lean Management an. Vgl. abbeglen, 2009, S. 8
[281] Vgl. Ohno et al., 2009, S. 81ff.
[282] Vgl. IFR Statistical Department, 2014, S. 2
[283] Vgl. Bauer et al., 2014, S. 28

dieser Robotertyp an unterschiedlichen Stellen in der Produktion verwenden, je nachdem wo dieser gerade benötigt wird. Durch ihre CPS-Fähigkeit ist die Konfiguration (Aufspielen der entsprechenden Programme, Parametrisierung) für die jeweilige Anwendung innerhalb kurzer Zeit möglich. Der weltweite Verkauf an Industrierobotern stieg z.B. im Jahr 2011 im Vergleich zum Vorjahr um über 40%. Ein Großteil des Anstiegs ist auf die starke Nachfrage aus China zurückzuführen. Prognostiziert ist ein weiterer jährlicher Anstieg der Verkaufszahlen um 25% bis 30%[284]. Der Einsatz von immer mehr Robotern in der Fertigung führt auch zu Veränderungen der Fertigungsorganisation. Robotertechnik kommt dabei immer häufiger eine Assistenzfunktion zu, d.h. sie unterstützen den Menschen (kooperierende Roboter[285]) bei der Fertigung und nehmen ihm im Idealfall jegliche schweren körperlichen und gesundheitsgefährden Tätigkeiten ab[286]. Mit der Robotertechnik wird die Flexibilität der Unternehmen weiter ausgebaut.

Neben den intelligenten Maschinen spielen auch die von ihnen verarbeiteten Güter eine neue Rolle im Konzept der Smart Factory. Über Identifikationstechniken wie bspw. radio-frequency identification (RFID) tragen die Güter selbst Informationen über sich und ihren Auftrag und können am Beispiel von RFID auch Informationen aus der Umgebung aufnehmen[287]. Auf diese Weise werden Szenarien entwickelt, in denen das Rohmaterial die Maschine instruiert, welche Bearbeitungsschritte an ihm durchzuführen sind[288]. Eine übergeordnete Instanz wie beim klassischen Produktionsplanungs- und Steuerungskonzept ist dazu nicht erforderlich und wegen der Komplexität der treffenden Entscheidungen auch nicht sinnvoll[289]. Damit ist die Ausgangsbasis für das Konzept der Selbststeuerung angesprochen, nach dem sich Aufträge in der modernen Fabrik selbst durch die Fertigung steuern[290] und vormals übergeordnete Planungs- und Steuerungsfunktionen (klassische PPS-Systeme) auf die Ebene des Materialflusses verlagert werden[291].

Ebenso wie die der Begriff CPS oder CPPS ist auch die Definition der „Smart Factory“ in der Literatur noch unterschiedlich umfangreich definiert[292]. Im Rahmen dieser Arbeit soll daher folgende Definition gefunden werden:

Die Smart Factory ist in erster Linie ein Konzeptansatz, unter dem sich die Technologien der Cyber-Physikalischen Systeme (CPS) und deren Verbund zu Cyber-Physikalischen Produktionssystemen (CPPS) mit Konzepten der Produktionsplanung und -steuerung, sowie darauf angepassten Organisationskonzepten vereinen. Die Smart Factory entwirft als Zielsystem die hochflexible, adaptive Fertigung mit dem Grenzwert der Losgröße 1, welche sich anhand der Zielgrößen Kosten, Qualität und Durchlaufzeit weitestgehend selbst steuert. Die Smart Factory nutzt hierzu die Konzepte des Internets der Dinge und Dienste und ist dabei selbst wiederum Teil eines übergeordneten Netzwerkkonzeptes.

3.4.5. Robuste Netze, mobile Kommunikation und Sicherheit

Die Möglichkeiten der Vernetzung und gerade der mobilen Kommunikationstechniken und -netze bringen vor allem bei großen bzw. geographisch weit verteilten Industrieanlagen einen wesentlichen Produktivitätsschub in allen Bereichen, in denen bislang viele Leerfahrten, geplante und ungeplante Wartungszeiten vorgesehen waren[293]. So besteht ein enormer Vorteil vernetzter Systeme darin, dass sich diese zum Teil selbst warten können[294]. Dies geschieht über die Auswertung aktueller Messwerte der Maschine durch die Maschine selbst. Darüber hinaus haben ServicetechnikerInnen mit aktueller Kommunikationstechnik online Zugriff auf alle notwendigen Datenblätter und Handbücher, die bislang nur gedruckt oder auf CD-ROM vorliegen. Diese Unterlagen werden zudem multimodal[295] aufbereitet (z.B. in Form von Videos), sodass die zur Reparatur oder Wartung notwendigen Informationen leichter und schneller zugänglich sind[296]. Dies trägt dazu bei, teure Arbeitszeiten der ServicetechnikerInnen zu reduzieren und zugleich unproduktive Stillstands- und Ausfallzeiten zu verringern. Die industrielle Nutzung der Internettechnologien bezieht neben den jederzeitigen, überall zugänglichen Informationen auch die jederzeit und -orts mögliche Kommunikation mit Kollegen und Fachkräften mit ein. Die Servicetechnikerin vor Ort soll sich danach direkt

[284] Vgl. Manyika et al., 2013, 74f.
[285] Vgl. Abele et al., 2011, S. 103f.
[286] Vgl. Ciupek, 2014c, S. 10
[287] Vgl. Scholz-Reiter, 2014, S. 64ff.
[288] Ein Beispielszenario anhand eines Farbenherstellers findet sich in: BMBF, 2012a, S. 15
[289] Vgl. ten Hompel., 2008, S. 106
[290] Vgl. Spath et al., 2013, S. 44
[291] Vgl. Abele et al., 2011, S. 140f.
[292] Vgl. Kagermann et al, 2013, S. 112; Schließmann, 2014, S. 460ff.
[293] Vgl. Annunziata et al., 2013, S 16
[294] ebenda, S. 9
[295] Vgl. Spath et al., 2013, S. 58
[296] Vgl. Annunziata et al., 2013, S. 13

mit ihren Fachkollegen (auch in anderen Teilen der Welt) verbinden können, um ein Problem vor Ort zu lösen[297].

Was für räumlich stark verteilte Anlagen bzw. Anlagenteile gilt, hat ebenso Vorteile in der räumlich konzentrierten Produktion (wie einer Fabrikhalle). Auch hier spielen die Vernetzung und Selbstwartungskonzepte eine bedeutende Rolle, da die Komponenten, bzw. einzelne Bauteile direkt vom Rechner z.B. durch eine Servicetechnikerin über Internetzugriff angesprochen und geprüft werden können (vgl. Abschnitt 5.3.1). Ferner lassen sich die gleichen Technologien auch für die Vernetzung mehrerer Produktionsstätten bzw. Produktionspartner in einem Produktionsverbund anwenden[298]. Die Anforderungen an derartige Netze sind insbesondere bei echtzeitfähigen Anwendungen sehr hoch. Die Vernetzung von Cyber-Physikalischen Systemen erfordert daher schnelle, hochzuverlässige und mit ausreichender Bandbreite verfügbare Kommunikationsstrukturen[299]. Diese sind in Gestalt von Breitbandnetzen- und Mobilfunktechnologien im Entstehen.

Gerade wenn die Daten die Firma verlassen, stellt sich unmittelbar die Frage des Schutzes vor unbefugtem Zugriff und Manipulation[300]. In den bisherigen Fertigungssystemen der Industrie war dieses Thema nachrangig, solange die Vernetzung innerhalb eines geschlossenen Systems, wie einer Fabrik, erfolgte[301]. Mit der Einführung von CPS werden geschlossene Systeme aufgebrochen und durch Standardisierung und Vernetzung auch mit Fremdsystemen kompatibel und lesbar. Risiken bestehen vor allem im Schutz der Daten vor unbefugter Einsicht und durch Manipulation. Alle in dieser Arbeit herangezogenen Studien zählen daher IT-Sicherheit („IT-Security“) zu den Hauptaufgabenfeldern, die es zusammen mit Industrie 4.0-Konzepten zu behandeln gilt[302]. Das Thema ist für sich allein bereits sehr umfänglich und kann im Rahmen dieser Arbeit nicht dargestellt werden[303].

3.4.6. Cloud-Technologien

Cloud-Technologien werden in den Studien als eine weitere disruptive Entwicklung eingestuft. Der Begriff ist im Bereich der Internetwirtschaft derzeit sehr präsent und dabei durchaus unterschiedlich besetzt. Ähnlich wie beim Begriff der Industrie 4.0 sind auch hier viele Marketingwortschöpfungen im Umlauf. Im Rahmen dieser Arbeit soll daher der Begriff des Cloud Computing auf der Definition des National Institute of Standards and Technology (NIST)[304] beruhen. Weitergehende Beschreibungen von Cloud-Technologien werden hierbei stets in Bezug zu den Definitionen der NIST gesetzt.

Mittels Cloud-Technologien ist die Speicherung großer Datenmengen und die Bereitstellung von Softwareanwendungen für alle mit der Cloud verbundenen Geräte möglich. Die einfachste Ausprägung eines Cloud-Dienstes ist die des „Software as a Service (SaaS)“, bei der in einem Rechenzentrum Speicherkapazitäten und ggfs. auch einfache Funktionen (Datenverwaltung) bereitgestellt werden[305]. Die Anwenderin ist dabei über eine geeignete Software (Browser, Zugangsclient) auf dem Nutzergerät (Client) mit dem Rechenzentrum (Cloud) verbunden und kann auf den dort gespeicherten Daten arbeiten. Weitergehende Konzepte gehen über die reine Datenspeicherung hinaus und bieten ganze Softwareanwendungen in der Cloud an, so dass diese ohne Installation auf dem Clientrechner genutzt werden können.

Durch Cloud-Technologien wird es Unternehmen deutlich vereinfacht, trotz kurzer Innovationszyklen in der Informationstechnologie mit der Entwicklung Schritt zu halten[306]. IT-Kapazitäten müssen dabei nicht mehr zwingend im eigenen Unternehmen vorgehalten werden (z.B. eigene Rechenzentren, Infrastructure as a Service[307]), sondern können nach Bedarf am Markt beschafft, bzw. gebucht werden. Dabei werden vorwiegend payper-use-Modelle eingesetzt[308], d.h. es wird nach den tatsächlich benötigten und beanspruchten Kapazitäten durch den Provider der Cloud-Technologie verrechnet. Unternehmen können damit höchst flexibel auf volatile Umgebungen reagieren und jederzeit flexibel skalieren.

297 Vgl. Annunziata et al., 2013. S. 25
298 Vgl. Bauer et al, 2014, S. 24
299 ebenda, S. 21
300 ebenda, S. 22
301 Vgl. Spath et al., 2013, S. 55f., 119
302 Vgl. Kagermann et al., 2013, S. 50ff.; Manyika, J., 2013, S. 18f.; Geisberger, 2012, S. 146ff.
303 Einen Einstieg ins Thema, sowie eine Übersicht der Themenfelder ist beim Fraunhofer-Institut SIT abrufbar: Vgl. Fraunhofer SIT, 2014
304 Die grundlegenden Eigenschaften einer Cloud sind mit den „Essential Characteristics” beschrieben: Vgl. Mell et al., 2012, S. 2
305 Vgl. Mell et al., 2012, S. 2
306 Vgl. Wolf et al., 2013, S. 18ff.; BMWi, 2010, S. 10f.
307 Vgl. Mell et al., 2012, S. 2
308 Bei pay-as-use oder auch pay-on-production (PoP) handelt es ich um sogenannte Betreibermodelle bei denen nutzungsbezogen abgerechnet wird. Zu den Betreibermodellen: Vgl. Abele et al., 2011, S. 44ff., Vgl. Wolf et al., 2013, S. 132 sowie Wildemann, 2008, S. 34ff.

Die BITKOM-Studie und weitere Studien der Fraunhofer-Institute fassen den Begriff des Cloud-Computing bereits etwas weiter als die NIST[309]. So werden hierunter auch Vernetzungen von Maschinen, Produkten und verschiedenen IKT-Systemen verstanden[310]. Das Cloud-Konzept wird inzwischen von vielen Unternehmen vor allem im Bereich der IT angewandt bzw. erhält bei der Planung von IT-Investitionen eine hohe Priorität[311]. Die Popularität der Cloud-Konzepte ist auch eine Reaktion auf die stetige Zunahme der Datenmengen aus den einzelnen Bereichen der intelligenten Produktion. Auf CPS basierende Fertigungssysteme liefern eine Vielzahl an Daten und müssen fortlaufend Daten untereinander austauschen[312]. Hinzu kommen die mit der Digitalisierung der vertikalen Ebenen verbundenen Datenmengen aus der Entwicklung, Konstruktion, und Produktionsplanung. Diese Daten zentral und jederzeit über einfache Internettechnologien verfügbar zu halten, ist ein maßgeblicher Treiber für die beschriebenen Cloud-Konzepte. Neben der Speicherung und Bereitstellung der für den Betrieb erforderlichen Daten erlangt auch die analysierende Arbeit mit den Daten eine wachsende Bedeutung[313]. So wird versucht, mit Werkzeugen des „Data Mining“ aus den Prozessdaten (Sensorwerte, Maschinenkennlinien, etc.) Probleme im Fertigungsablauf zu identifizieren und Optimierungsmöglichkeiten festzustellen[314]. Hierauf bauen auch die Konzepte der „Selbstwartung“ und „Selbstheilung“ auf, welche aus der Analyse der Prozessdaten proaktiv Maßnahmen veranlassen, um dem Ausfall einer Maschine vorzubeugen[315].

Darüber hinaus kann das Modell des Cloud Computing Ansatz und Anregung für die Bereitstellung von Logistikleistungen aus der Cloud sein. Die BVL[316] diskutiert dies z.B. in einem Positionspapier zu den Möglichkeiten von „Cloud Logistics“[317].

Das in Zusammenarbeit der TU Dortmund mit dem Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik (IML) entwickelte Konzept der „Logistics Mall“ greift ebenfalls auf Cloudansätze zurück. Mit der Logistics Mall ist eine Webplattform[318] entstanden, auf der Anbieter von Logistikleistungen unterschiedlichster Ausprägungsstufen (2PL bis 4PL) ihre Leistungen einstellen und anbieten können. Die Logistics Mall fungiert als Shopping-Plattform für die Zusammenstellung individueller Logistikprodukte, die sowohl Software als auch Logistikleistungen beinhalten können[319]. Die Plattform ist bereits seit Oktober 2010 im Internet erreichbar[320]. Begleitet wird dieses Praxis-Forschungs-Projekt von mehreren Studien zum Einsatz von cloudbasierten Diensten und Systemen, die vom Fraunhofer-Institut IML durchgeführt werden[321]. Dabei werden in cloudbasierten Logistikkonzepten die wesentlichsten Anforderungen in den Punkten

- hohe Kundenindividualität bei gleichzeitig geringen Kosten
- kurze Antwortzeiten der Software
- Datensicherheit und -transparenz

gesehen[322]. Zugleich sollen sich gerade kleinen und mittelständischen Unternehmen somit die Möglichkeiten eröffnen, ohne erheblichen Eigenaufwand für Investitionen komplexe Leistungen am Markt anbieten bzw. beziehen zu können[323].

Neben den Geschäftsmodellen der Logistikanbieter werden sich auch die Lösungen der Softwareanbieter verändern müssen. Monolithische Softwarelösungen mit Bindung an lokale Systeme weichen dann zunehmend cloudbasierten Einzelservices[324]. Branchenübergreifend als auch für die Logistik gilt, dass durch die Zunahme an cloudfähigen Diensten und Technologien gerade die softwareintensiven Bereiche[325] (ERP, Datenspeicherung, Archivierung, DataMining) für Cloudtechniken sehr empfänglich sind. Die bislang unternehmensweit, teils mit erheblichem Aufwand betriebenen Softwareupdates oder gar Migrationen zu anderen Systemen können nach Einschätzung vieler Studien[326] künftig durch den Einsatz von Cloud-Software-Diensten

309 So bspw. das Konzept der „Logistics Mall“ (weiter unten).
310 Vgl. Bauer et al., 2014, 21
311 Vgl. Wolf et al., 2013, S. 28f.
312 Vgl. ten Hompel et al., 2013, S. 54f.
313 ebenda, S. 54f.
314 Vgl. Weskamp et al., 2014, S. 25ff.
315 Zum Verfahren der „präventiven Qualitätssicherung“: Vgl. Kief et al., 2013, S. 430ff.
316 Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.
317 Vgl. Delfmann et al., 2012
318 Vgl. Logistics Mall, 2014
319 Vgl. Wolf et al., 2013, S. 170
320 Vgl. Logistics Mall, 2014
321 Vgl. Meinhardt et al., 2011; sowie Nachfolgestudie Vgl. Wolf et al., 2013
322 Vgl. ten Hompel et al., 2012, S. 127ff.
323 Vgl. Wolf et al., 2013, S. 156ff.
324 Vgl. Meinhardt et al., 2011, S. 128ff.
325 Vgl. ten Hompel et al., 2013, S. 54f.
326 Vgl. Manyika et al., 2013, S. 6; Bauer et al., 2014, S. 21; Annunziata et al., 2013, S. 26

deutlich vereinfacht werden. ERP-Software etc. könnten dann in der benötigten Menge und den jeweils erforderlichen Umfang als Dienste aus der Cloud bezogen werden. Aufwändige Installationen, mitunter teure Lizensierungen etc. entfallen dann zu Gunsten einer nutzungsbezogenen Abrechnung[327]. Vorteile werden v.a. in einer flexiblen und schnellen Skalierbarkeit solcher Systeme gesehen. Zudem wird weniger Fachpersonal innerhalb der Firma benötigt, dieses wird lediglich auf der Seite des Diensteanbieters vorgehalten – in der Regel sogar mit deutlich höherer Professionalität und Qualifikation[328]. Gerade im Bereich der unter BigData genannten Datenaufkommen bieten sich Cloud-Lösungen für die Produktionslogistik an[329]. Die Kapazitäten für das benötigte Speichervolumen wachsen dynamisch mit, ebenso sind keine hohen Investitionskosten für eigene Rechenzentren und teure, hochverfügbare Hardware erforderlich. Die Fraunhofer Studie „Cloud Computing für Logistik 2“ hat hierzu festgestellt, dass es gerade für solche Investitionsvorhaben immer schwieriger wird, diese wirtschaftlich innerbetrieblich abzuwickeln, Cloudlösungen werden hierbei als wirtschaftliche Alternative angesehen[330].

Das Projekt der Logistics Mall zeigt neben den Möglichkeiten durch Cloud-Technologien auch einen möglichen Zukunftsweg für die Organisation der Logistik der nächsten Generation auf. Das Bereitstellen und Anbieten von Diensten und immer komplexeren Leistungen entwickelt den Grundgedanken des Cloud-Computing zur Cloud-Logistik weiter[331]. Es entspricht damit den bereits angesprochenen Kernforderungen an die Logistik, jederzeit verfügbar (on demand), flexibel nutzbar und von den Kosten her kalkulierbar zu sein. Der Ansatz, jegliche Leistungen nach Bedarf abzurufen und nach individuellen Kundenwünschen zu kombinieren (orchestrieren[332]) folgt damit den Megatrends Individualisierung, Flexibilisierung sowie der Dienstleistungsorientierung (vgl. Abschnitt 3.3.3). Im Kontext der Industrie 4.0 werden Logistikplattformen und Produktionsplattformen miteinander verschmelzen bzw. über Schnittstellen miteinander verbunden sein. Der konzeptionelle Ansatz eines dezentralen Produktions- und Logistiknetzwerkes erscheint mit den Ansätzen der Cloud-Technologien machbar und beherrschbar.

3.5. Die Industrie 4.0 braucht eine neue Logistik

3.5.1. Logistik der nächsten Generation

Die im vorherigen Abschnitt dargestellten Veränderungen weisen in vielen Bereichen Schnittmengen zu logistischen Kerndisziplinen auf. Neben die in Abschnitt 3.3.3 erläuterten Veränderungstreiber, welche im Feld der Logistik selbst auftreten (bspw. die zunehmende Dienstleistungsorientierung, die Beschleunigung von Unternehmensprozessen und deren Vernetzung), treten die gesellschaftlichen Veränderungen (Demografischer Wandel und Fachkräftemangel) und die unter Industrie 4.0 genannten Megatrends (Abschnitt 3.4). Diese wirken zusammen auf die Disziplinen der Logistik ein. Die Spezialisierung der Logistikunternehmen und die Flexibilisierungstrends als unmittelbare Folge werden dabei durch technologische Entwicklungen unterstützt und gleichzeitig von ihnen getrieben. Dabei kommt der Veränderungsdruck aus mehreren Richtungen. Erstens von Seiten des Marktes in Form steigender Nachfrage nach kundenindividuellen Produkten und Dienstleistungen, sowie durch konkurrierende und neu in den Markt eintretende Logistikdienstleister. Zum Zweiten kommt der Druck von innen, also aus der eigenen Supply Chain, genauer aus der Produktion selbst. Die technologischen Innovationen, welche die Basis der Industrie 4.0 ausmachen, treiben mit mehr Komplexität und Flexibilität die Logistik des Unternehmens und der hinzugezogenen Logistikpartner (Dienstleister) zu neuen Lösungsansätzen. Die Komplexität von außen wie von innen nimmt damit zu[333]. Aus dieser kurzen Betrachtung wird bereits deutlich, dass ein rein produktionsbezogener Konzeptansatz für die Industrie 4.0 und ihre Logistik zu kurz greifen würde. Vielmehr bedarf es eines Ansatzes für die gesamte Wertschöpfungs- und Logistikkette, welcher im Konzept der „Smart Logistics“ (Abschnitt 2.2.4) bereits skizziert wird. Für die Weiterentwicklung einer Logistiktheorie und der Herausbildung neuer strategischer Ansätze spielen die Entwicklungen der Industrie 4.0 sicherlich eine herausragende Rolle, dennoch muss der Fokus bei der Neuausrichtung weiter gefasst sein und auch die gesamtgesell-

[327] Vgl. Wolf et al., 2013, S. 132ff.
[328] ebenda, S. 51f.
[329] Vgl. Handfield, 2013, S. 51
[330] Vgl. Wolf et al., 2013, S. 28f.
[331] Vgl. Delfmann et al., 2012; Meinhardt et al., 2011, S. 122ff.
[332] Im Zusammenhang mit der Kombination von unterschiedlichen Diensten und Angeboten, die häufig in Form von Modulen verfügbar und kombinierbar sind wird häufig von „Orchestrierung“ gesprochen.
[333] Vgl. Sendler, 2013, S.44f.

schaftlichen sowie die spezifischen Veränderungen des Logistikmarktes berücksichtigen. Es gibt also keine reine auf die Industrie 4.0 bezogene Logistik, sondern mehr eine Logistik der nächsten Generation, welche die Herausforderungen aus der Industrie 4.0, den Trends in der Logistikwirtschaft als auch den gesellschaftlichen Herausforderungen gerecht werden muss.

3.5.2. Paradigmenwechsel Selbststeuerung und Integration

Das in der Praxis häufig angewendete Modell der deterministischen Produktionsplanung und -steuerung[334], sowie Teile der Lean-Production werden sich zu Gunsten von flexibleren Prozessen verändern müssen[335]. Für die Logistik bedeutet dies konkret die Abkehr von monolithischen Konzepten, sei es in der Unternehmensorganisation, in der eingesetzten Software und in Steuerungskonzepten[336]. In der Vision der Industrie 4.0 steuern sich die Aufträge selbst durch die Fertigung. Der Materialfluss – bislang zentral und vorgeplant organisiert – organisiert sich nun selbst. Aus dieser fundamentalen Änderung in der Fertigung und in der Art, wie Maschinen in einem Arbeitsfluss (Wertstrom) organisiert sind, leiten sich konzeptionelle Änderungen in vor- und nachgelagerten Bereichen ab. Verdeutlicht am SCOR-Modell (siehe Abbildung 3, S. 19) bedeutet dies, dass sich Materialien, Hilfs- und Betriebsstoffe „selbst beschaffen“[337], auf der Distributionsseite bedeutet dies, dass sich fertige Güter selbst einen Lagerplatz buchen oder gleich eine Auslieferung mitsamt der Buchung auf einem Transportmittel anstoßen[338].

Grundsätzlich bedeutet eine hochflexible, automatisierte Fertigung, dass make-to-stock-Konzepte den make-to-order-Konzepten[339] weichen. Im Idealfall wird nur das Produkt gefertigt, das bereits bestellt ist, für welches also der Absatz organisiert ist. Schlanker kann die Fertigung dann kaum noch werden. Dass dann eine zunehmend individualisierte, ggfs. vereinzelte Fertigung mit Losgröße 1 erfolgt, hat natürlich auch erhebliche Einflüsse auf die Distributionslogistik – insbesondere die Zunahme an kleinteiligeren, individualisierten Transporten[340], mit ebenfalls erheblichen Folgen auf die Umwelt und Belastung der Infrastrukturen[341].

Eine der Fraunhofer Studien[342] zeigt die Problemfelder zum weit verbreiteten Modell des Lean Managements auf. Nicht alle Strategien der schlanken Fertigung lassen sich danach mit den Ansätzen der Industrie 4.0 in Übereinstimmung bringen[343]. Vor allem die starren Verkettungen, aus dem Gedanken der Fließfertigung und der bestandsarmen Produktion erdacht, funktionieren nicht in agentenbasierten Modellen[344], in denen sich Materialien, Aufträge und Maschinen untereinander einigen, in welcher Reihenfolge die Bearbeitung erfolgt. Fertigungsprozesse sind danach nicht mehr zentral vorzuplanen und bis ins Detail determiniert. Allerdings ist der Gedanke der Selbststeuerung und -organisation dem Lean Management nicht völlig fremd und wird dort vor allem in Form von Kanban-Steuerungen bereits erfolgreich angewendet[345]. Hierin sieht die Studie auch gemeinsame Schnittmengen mit dezentralen Steuerungsansätzen der Industrie 4.0[346].

Keine der im Rahmen dieser Arbeit herangezogenen Studien postuliert eine vollständige vollautomatisierte, sich selbststeuernde Produktion für die Zukunft. Einigkeit besteht vielmehr darüber, dass es zu einem stetig wachsenden Automatisierungsgrad durch CPS und einer „gleitenden Automatisierung“[347] kommen wird, welche den Menschen in der Produktion allerdings nicht ersetzten wird[348]. Die zunehmende Komplexität durch eine stetige Zunahme der Variantenvielfalt und immer mehr implementierter echter Kundenindividualisierung (Mass Customization) fordern demnach gerade dort den Menschen in der Produktion, wo Automatisierung nicht möglich oder aus technischen bzw.

---

334 Umsetzung der Produktionsplanung und -steuerung orientieren sich meist am Aachener PPS-Modell, das hier nicht ausführlich dargestellt werden kann. Vgl. Schuh et al., 2012, S. 11ff.
335 Vgl. Bauernhansl et al, 2014, S. 300f.
336 Vgl. Meinhardt et al., 2011, S. 128ff.
337 Einen Ansatz hierzu stellt die Firma Würth mit dem System „iBin“ vor, bei dem sich Lagerbehälter bzgl. ihres Füllstandes selbst überwachen und ggfs. automatisiert Nachbestellungen auslösen können. Vgl. Hoffmann, F.-J., 2014, S. 207ff.
338 Vgl. Günthner et al., 2011, S. 28; ten Hompel, 2014, S. 615f.
339 Zur Erläuterung der Fertigungsprinzipien: Vgl. Schuh et al., 2012, S. 88ff.
340 Vgl. Abele, 2008, S. 289ff.
341 Vgl. Handfield, 2013, S. 14
342 Studie zur Produktionsarbeit 4.0: Vgl. Spath et al., 2013
343 Vgl. Spath et al., 2013, S. 103f.
344 Zur Einführung und Definition von Agentensystemen in der Intralogistik: vgl. Roidl., 2010, S. 65ff.
345 Vgl. Spath et al., 2013, S. 103f.
346 ebenda, S. 103f.
347 Hierunter werden teilautomatisierte Tätigkeiten verstanden, in den der Mensch durch „Arbeitsteilung“ mit Robotertechnik in der Fertigung entlastet wird. Vgl. Kief et al., 2013, S. 358f.
348 Vgl. Spath et al., 2013, S. 52ff., S. 47

wirtschaftlichen Gründen zu aufwändig ist[349]. Die Zukunft menschlicher Arbeit in der Industrie 4.0 wird daher vor allem in anspruchsvollen, organisierenden, leitenden und gestaltenden Positionen gesehen[350]. Der Mensch ist dabei durchaus flexibler als es Maschinen und Algorithmen bislang sind und wird es nach Ansicht der in den Studien befragten Experten auch längerfristig bleiben[351].

Der Ansatz der Industrie 4.0 zieht damit auch die Lehren aus den CIM-Modellen der 1990er Jahre. Hier wurde versucht, durch vollständige Computerisierung den Mensch in der Fertigung zu ersetzen und damit eine vollautomatisierte autarke Fertigung zu erreichen[352]. Zum einen war jedoch die Computertechnik noch nicht leistungsfähig genug, zum anderen benötigten diese Systeme eine vollständig determinierte Planung, in der Störungen nicht vorgesehen waren. Abläufe gerieten damit starr unflexibel und reagierten äußerst sensibel auf jegliche Störungen im Produktionsprozess[353]. Gerade aus letzterem Grund werden heutzutage mit dem Industrie-4.0-Ansatz Modelle gesucht, bei denen der Mensch an allen Stellen eingreift, in denen Flexibilität gefordert ist, die sich mittels Technik nur schwer oder gar nicht abbilden lässt[354]. Gerade hochflexible Prozesse sind nur schwer zu automatisieren[355]. Gleichzeitig hat die zunehmende Automatisierung zwar zu deutlichen Produktivitätssteigerungen[356], aber nicht unbedingt zu einer Reduzierung der Arbeitszeit geführt. Vielmehr führt die Zeiteinsparung bislang zu einer Leistungsverdichtung für die einzelnen ArbeiternehmerInnen[357], deren Verringerung ebenfalls in konzeptionelle Ansätze mit einbezogen werden sollte.

Der Ausbau der individualisierten Fertigung erfordert dabei zunächst Anlageninvestitionen, welche die notwendige Flexibilität, Automatisierbarkeit und Vernetzung der Systeme ermöglichen, sowie die Standardisierung einzelner Prozessschritte, ihre Modularisierung und die rechnergestützte Modellierung[358]. Bewältigt wird die hierdurch entstehende Komplexität durch dezentrale Prozesssteuerung in vertikaler und horizontaler Integration[359].

Die end-to-end-Integration[360] stellt dabei die größte Herausforderung dar, da sie letztlich nur über die Unternehmensgrenzen hinweg sinnvoll durchgeführt werden kann. Das bedeutet, dass auf allen horizontalen Ebenen der Unternehmensprozesse von der Quelle bis zur Senke über die gesamte Wertschöpfungskette auf einer gemeinsamen Datenbasis gearbeitet wird und Geschäftsprozesse nahtlos ineinandergreifen. Dies ist sowohl eine Herausforderung an die eingesetzte Software als auch an Datenschutz und IT-Security. Für die Zusammenarbeit mehrerer verschiedener Unternehmen in der horizontalen Integration stellen sich hiermit erhebliche Herausforderungen, Kompatibilitäten zwischen den verschiedenen Systemen herzustellen. Als Zweites kommt die vertikale Integration hinzu, welche die vertikale nahtlose Verknüpfung der Unternehmensebenen beschreibt, d.h. die vollständige Digitalisierung der Unternehmensprozesse (Planung, Entwicklung, Produktion), um auf einer einheitlichen Datenbasis arbeiten zu können.

Im Bereich der vertikalen Integration haben die Unternehmen bereits begonnen, eine bereichsübergreifende Verwendung der gleichen Softwarebasis zu implementieren[361]. Brüche und Konvertierungen zwischen den Abteilungen entfallen damit zunehmend. Alle Schritte von der Produktentwicklung über die Planung und Fertigung bis hin zum Service erfolgen dabei komplett digital durch den Einsatz sogenannter PLM-Systeme (Product Lifecycle Management)[362]. Dies stellt zugleich auch neue Anforderungen an die Qualifikation des Personals. In integriert arbeitenden Umgebungen braucht es Generalisten, welche die unterschiedlichen Fachdisziplinen zielgerichtet zusammenführen können. Hier muss das klassische Abteilungsdenken zu Gunsten einer interdisziplinären Projektzusammenarbeit weichen[363].

---

349 So können die Kosten für die Steigerung des Automatisierungsgrades einer CNC-Drehmaschine auf bis zu 261% der ursprünglichen Investitionssumme ansteigen. Vgl. Kief et al., 2013, S. 338

350 Vgl. Spath et al., 2013, S. 46

351 ebenda, S. 130

352 Vgl. Bracht et al., 2011, S. 5ff.

353 ebenda, S. 7

354 *„[...] nach über 35 Jahren Forschung im Bereich künstliche Intelligenz bin ich überzeugt, dass jeder Grundschüler selbst den besten intelligenten Computersystemen bezüglich seiner Alltagsintelligenz überlegen ist. Bei Entscheidungen unter Unsicherheit, die nicht einem klaren Muster folgen, und im sensor-motorischen Bereich haben Menschen daher einen klaren Vorteil selbst gegenüber den leistungsfähigsten Maschinen aus dem KI-Bereich."* Prof. Whalster in: Vgl. Spath et al., 2013, S. 130

355 Vgl. Spath et al., 2013, S. 91f.

356 Vgl. Bauer, 2014, S. 23

357 Vgl. Kornwachs, 2007, S. 181

358 Die 5 Kernelemente der individualisierten Produktion: Vgl. BMBF, 2012a, S. 13.

359 Vgl. BMBF, 2012a, S. 6, S. 17f.

360 Vgl. Handfield, 2013, S. 54

361 Vgl. Sendler, 2013, S. 107ff.

362 ebenda, S. 24f.

363 Vgl. Sendler, 2013, S. 13f

3.6. These

Die smarte Logistik und die smarte Fabrik sind ganzheitlich zu betrachten. Mittels digitaler Werkzeuge (z.B. Konfiguratoren über Webplattformen) greifen Nachfrager direkt in die hochflexibilisierte Fertigung ein. Die Unternehmensgrenze ist nur noch als logische und rechtliche Grenze zu begreifen, im virtuellen Raum lösen sich die Unternehmensgrenzen zunehmend auf. Gleiches gilt für die Wertschöpfungsketten (Supply Chains). Im heutigen Wettbewerb konkurrierender Supply Chains werden nur diese erfolgreich sein, welche sich kurzfristig auf die gewandelten Kundenanforderungen einstellen bzw. rekonfigurieren können. Supply Chains sind dabei nicht mehr als starre Verkettungen, sondern als flexible Vernetzungen zu verstehen. Die dabei zunehmende Komplexität macht eine vollkommende Planung aller Abläufe entlang der Wertschöpfungskette unmöglich. Es bedarf eines neuen Logistikmodells, um diesen Herausforderungen planerisch, strategisch und technisch zu begegnen.

Kurz: Die Industrie 4.0 braucht eine Logistik 4.0.

4. Lastenheft für die Logistik 4.0

4.1. Migrationsstrategie für die Logistik 4.0

Dass sich die Logistikunternehmen unter dem Einfluss von Industrie 4.0 verändern müssen, wurde weiter oben anhand der Megatrends dargestellt. Da sich die Entwicklungen eher evolutionär vollziehen[364], haben die Unternehmen die Möglichkeit, rechtzeitig und ausgerichtet an ihrer Unternehmensstrategie die Anpassungsprozesse einzuleiten. Die Vorteile einer frühen Auseinandersetzung mit den Herausforderungen der Industrie 4.0 liegen in der Lernkurve und der Möglichkeit des lokalen Scheiterns. So können neue Verfahren und Techniken ggfs. zunächst nur in bestimmten Teilbereichen eingeführt, Erfahrungen gesammelt und später auf die gesamte Struktur adaptiert werden. Gerade die Erfahrungen aus dem Scheitern und dem sukzessiven Kompetenz- und Wissensaufbau im eigenen Unternehmen stellen dann einen wesentlichen Wettbewerbsvorteil gegenüber später einsteigenden Wettbewerbern dar.

Eine universelle Unternehmensstrategie zur Umsetzung der Industrie 4.0 kann es dabei für den Logistikbereich und sicher auch für andere Branchen nicht geben. Zu unterschiedlich stellen sich die jeweiligen Strukturen und branchenspezifischen Herausforderungen dar. Dennoch lässt sich mittels globaler Modelle eine Grobstruktur finden, die dann von dem jeweiligen Unternehmen im Detail ausgefüllt und mit eigenen Schwerpunkten versehen werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit soll dies für unternehmensübergreifende Prozesse anhand des SCOR-Modells, und für unternehmensinterne Prozesse anhand des Modells der Wertkette von Porter[365] dargestellt werden. Das wettbewerbsorientierte Modell nach Porter und ein Prozessmodell wie das vorgestellte nach SCOR bilden die Grundlage für die Verortung des Unternehmens im Wettbewerb sowie die Erlangung umfassender Kenntnisse über die unternehmenseigenen Prozesse. Diese umfassende Beschreibung des Unternehmens stellt ein stabiles Fundament für eine erfolgreiche Migration zur Industrie 4.0 dar.

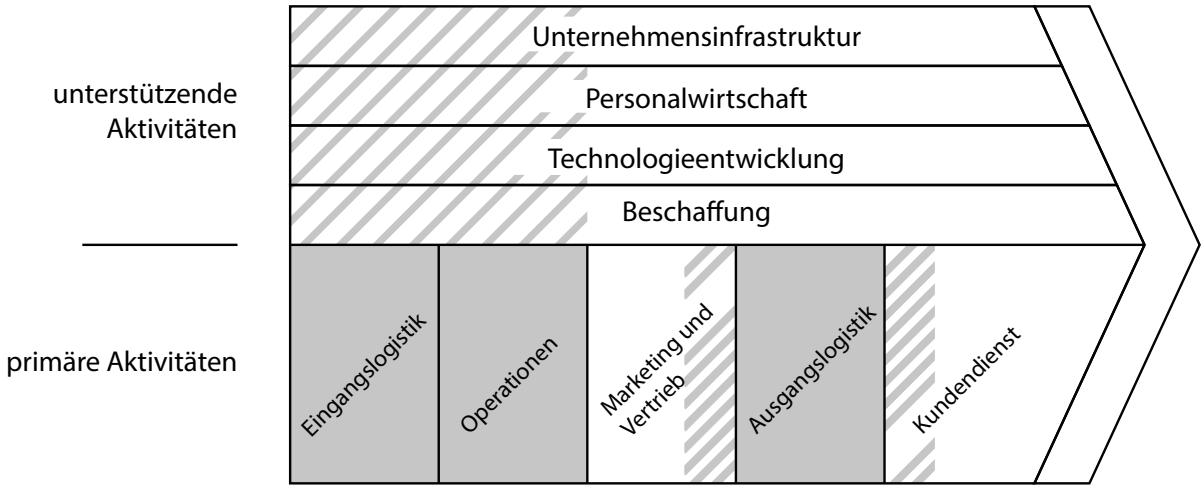


Abbildung 11: Darstellung der Wertkette nach Porter[369]. Die wettbewerbsrelevanten Unternehmensbereiche, in denen die Industrie 4.0 am stärksten wirkt sind hervorgehoben bzw. schraffiert.

Die Wertkette von Porter bietet den Vorteil einer strukturierten Betrachtung des Unternehmens bzw. seiner Funktionsbereiche (primäre und unterstützende Aktivitäten[366]) und ermöglicht als strategisches Modell die Entwicklung von Unternehmensstrategien für den Umgang mit der Industrie 4.0. Die Technologien und die Möglichkeiten der Vernetzung stellen für sich allein betrachtet zunächst keinen Mehrwert für ein Unternehmen dar, wenn sich hieraus nicht die Wettbewerbssituation – gerade im Hinblick auf die als Megatrends genannten Herausforderungen Flexibilität, Kostenminimierung und Serviceorientierung (vgl. Abschnitt 3.3.3) – des Un-

[364] Vgl. VDI/VDE, 2013, S. 9
[365] Die Wertkette von Porter dient auch in der Studie des BITKOM als Referenz zur Betrachtung von Veränderungen durch Industrie 4.0 und war damit Ideengeber für die weitere Verwendung und Vertiefung im Rahmen dieser Arbeit. Vgl. Bauer et al., 2014, S. 25ff.
[366] Vgl. Porter, 2014, S. 68ff.

ternehmens bzw. der gesamten Supply Chain verbessert. Die Weiterentwicklung von Unternehmensprozessen sollte daher immer an der Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit ausgerichtet sein[367] und alle Unternehmensbereiche mit einbeziehen. Darüber hinaus lassen sich die Betrachtungen von Porters „Wertketten“ bzw. der Aktivitäten[368] im Unternehmen mit gängigen Prozessmodellen (z.B. dem Prozesskettenmanagement, vgl. Abschnitt 2.2.2) der Logistik in Übereinstimmung bringen.

Letztlich können alle Unternehmensbereiche anhand dieses Modells einer Betrachtung bzgl. ihrer Aktivitäten und Verknüpfungen untereinander[370] unterzogen werden. In den folgenden Betrachtungen hinsichtlich der Logistik sind dabei insbesondere die Bereiche der „Eingangslogistik“, „Operationen“ und „Ausgangslogistik“ von Bedeutung, welche sich zum Großteil mit dem vom VDMA[371] definierten Begriff der Intralogistik[372] decken, und denen noch der distributive Bereich von „Marketing und Vertrieb“ hinzugerechnet werden kann. Gleiches gilt für die Aktivitäten, welche der Wartung und Reparatur hergestellter Güter zukommen. Aus der Gesamtbetrachtung (Abbildung 11) wird deutlich, dass letztlich in allen Unternehmensbereichen wettbewerbsrelevante Veränderungen durch Industrie 4.0 zu erwarten sind. Ziel einer „Inventur der Unternehmensaktivitäten“ ist es dann, gezielt diejenigen Aktivitäten zu identifizieren, denen eine maßgebliche Bedeutung für die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens mit der Ausrichtung auf Industrie 4.0 zukommen, um hieraus Unternehmensstrategien (z.B. Investitionsentscheidungen) abzuleiten[373]. Die Unterteilung nach primären und unterstützenden Aktivitäten hilft zur Umsetzung einer besseren Verknüpfung der Aktivitäten und zeigt zugleich die Bereiche auf, an denen eine Integration der eingesetzten Systeme und Informationsflüsse am meisten Vorteile bringt (vertikale Integration). Hier setzen bspw. neue Werkzeuge der PLM[374] an.

Parallel hierzu sollte eine flussbezogene Betrachtung der Prozesse im Unternehmen sowie in der Versorgungskette bspw. anhand des SCOR-Modells vorgenommen werden. Ist das Modell im Unternehmen bzw. Unternehmensverbund bereits implementiert, lassen sich die für die Industrie 4.0 relevanten Prozesse leichter identifizieren, da SCOR alle Unternehmensprozesse fraktal und bis auf drei Ebenen fein aufgliedert[375].

Dabei sollten zunächst die Prozesse innerhalb des Unternehmens betrachtet werden, anschließend deren Zusammenhang mit der gesamten Supply Chain. Bezogen auf die logistischen Betrachtungen zur Industrie 4.0 sind dies alle Tätigkeiten des Unternehmens, die der Intralogistik zugerechnet werden können.

4.2. Intralogistik

4.2.1. Organisation der innerbetrieblichen Logistik

Unter dem Begriff der Intralogistik sollen in dieser Arbeit diejenigen Disziplinen verstanden werden, welche der Organisation von Güter- und Informationsflüssen innerhalb des Verantwortungsbereiches eines Unternehmens dienen[376]. Orientiert am SCOR-Modell umfasst die Intralogistik damit die Bereiche SOURCE, MAKE und DELIVER. Auf der Eingangsseite grenzt die eigene Beschaffung (SOURCE) an die Distributionsprozesse des Zulieferunternehmens. Auf der anderen Seite stellt die Distributionslogistik (DELIVER) die Schnittstelle zum folgenden Unternehmen (Abnehmer) in der Versorgungskette dar. In den meisten Fällen wird dies bereits die Transportlogistik sein, wenn das Unternehmen über keine eigene Flotte verfügt bzw. diese Leistungen ausgelagert hat. Kern der Intralogistik ist die Produktionslogistik (MAKE), welcher die Aufgaben der innerbetrieblichen Fluss- und Prozessorganisation zukommen[377]. Gesteuert werden diese drei Kernprozesse durch eine übergeordnete Instanz (PLAN), welche die Planungs- und Steuerungsfunktionen organisiert.

367 Vgl. Porter, 2014, S. 68f.
368 Porter definiert das Unternehmen als Bestandteil einer Verkettung mit weiteren Unternehmen, die zum einen aus den Zuliefern und zum anderen aus den Abnehmern der eigenen Produkte bestehen. Gemeinsam bilden sie entlang der Wertschöpfung ein Wertsystem, die Wertaktivitäten innerhalb eines Unternehmens bilden die Wertkette. Vgl. Porter, 2014, S. 61ff.
369 Abbildung in Anlehnung an Porter: ebenda, S. 76ff.
370 ebenda, S. 75ff.
371 Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.
372 Vgl. VDMA, 2014
373 Auf die Vorgehensweise zur Strategiebildung soll hier nicht vertiefend eingegangen werden. Es wird auf die weiterführende Literatur verwiesen. Vgl. Porter, 2013 bzw. Porter, 2014
374 Product Lifecycle Management
375 Vgl. Supply Chain Council, 2010, S. 11ff.
376 Vgl. VDMA, 2014
377 Definition der Produktionslogistik: Vgl. Logipedia, 2014

In der Praxis stellt sich der klassische Workflow für die Intralogistik wie folgt dar[378]: Über den Vertrieb werden Aufträge angenommen und an den Innendienst weitergegeben, welcher den Auftrag im System (meist ein ERP) anlegt. Der Auftrag bestimmt die Mengen des zu produzierenden bzw. zu liefernden Gutes zu vereinbarten Konditionen und Terminen. Ähnlich verläuft es bei längerfristigen und sich wiederholenden Bestellungen im Rahmen von Kontrakten. Hier sind Lieferzeiten und Mengen bereits im Rahmenvertrag definiert. Alle eingehende Aufträge und die meist noch zusätzlich angestellte Prognose über den künftigen Auftragsverlauf dienen als Ausgangsbasis für die Erstellung eines Produktionsprogramms. Fehlende Teile bzw. benötigte Teil- und Fertigprodukte werden durch Stücklistenauflösung (Primär- und Sekundärbedarfsermittlung) als Bedarf identifiziert und müssen von der Beschaffung rechtzeitig für die Produktion bereitgestellt werden. Mit der Bereitstellung von Zulieferteilen ist auch die Bereitstellung von bereits beschafften Vorratsgütern aus dem eigenen Lager (Kleinteilelager, Halbzeuglager, Warenlager), sowie die Einlagerung fertiggestellter, aber noch nicht auslieferbarer Erzeugnisse im Fertigwarenlager angesprochen und definiert damit die umfangreichen Lagerfunktionen der Intralogistik.

Inklusive der benötigten Kommissionierung der Güter zur Bereitstellung für den Versand kommen der Intralogistik damit weitreichende Aufgaben für den Materialfluss innerhalb des Unternehmens zu. Verbunden mit dem Materialfluss sind gleichzeitig auch Informationsflüsse (Rückmeldungen aus der Fertigung, Wareneingangs- und Ausgangsmeldungen etc.), die gelenkt und verarbeitet werden müssen. Unterstützt werden die Abläufe der Intralogistik von Software-Werkzeugen, am häufigsten ausgeprägt in Form von ERP-Systemen (Enterprise Resource Planning), in denen die Funktionen Beschaffung, Lagerung, Produktion und Distribution neben den Fakturierungs- und weiteren buchhalterischen Prozessen abgebildet sind[379]. Die Abläufe können hier nicht allesamt im Detail dargestellt werden, dennoch wird deutlich, dass Mechanismen der Selbststeuerung diesen klassischen Workflow verändern werden. Anhand der Beschaffung und Distribution wird dies weiter unten noch beschrieben. Im Allgemeinen bedeuten die Möglichkeiten der Selbststeuerung auch die Verlagerung der bislang zentral vorgeplanten Tätigen im ERP-System auf die darunter liegenden Ebenen. Zugleich erhält die Planungsebene im Idealfall die Möglichkeit, auf Basis der Echtzeitdaten aus dem CPPS zu arbeiten. Das bedeutet, mit den aktuellen Kapazitäten und Zykluszeiten in der Kalkulation und Produktionsplanung zu arbeiten. Hierbei können dann Softwarewerkzeuge zum Einsatz kommen, welche eine simulationsgestützte Vorwegnahme der Auftragsdurchführung ermöglichen. Die Kalkulation von Aufträgen erfolgt dann auf Basis der realen Produktion der aktuellen Kennzahlen.

Die Ziele der innerbetrieblichen Logistik sind dabei mehrdimensional und nicht gleichzeitig zu erreichen. Danach gilt es, die Liefertermine einzuhalten, mit möglichst kurzer Durchlaufzeit zu produzieren, die Qualität konstant zu halten und gleichzeitig die Kapazitäten der Maschinen optimal auszulasten um zu günstigeren Stückkosten zu gelangen. Eine optimale Auslastung der Kapazitäten wird dabei meist mit einer längeren Durchlaufzeit und höheren Beständen erkauft. In der Literatur wird dieser Zielkonflikt häufig als das Dilemma der Ablaufplanung beschrieben[380].

Aus dieser Problemstellung haben sich eine Reihe von Produktionskonzepten entwickelt, von denen das Toyota Produktionssystem (TPS) mit dem Ansatz des Lean Managements seit den 1990er Jahren den stärksten Einfluss hinterlassen hat[280]. Lean Management setzt vor allem die bestandsarme Fertigung und verfolgt die Optimierung der gesamten Supply Chain. Es soll also möglichst wenig vor und nach der Produktion gelagert werden (Bestände) und wenig im Prozess gepuffert werden (Umlaufbestände). Die sogenannte „schlanke“ Fertigung ist direkt am Bedarf des Kunden ausgerichtet, welcher den Takt der Fertigung (Kundentakt) vorgibt[381].

Aus dem Lean Management hat sich die Methode des Wertstromdesigns entwickelt, nach der auf recht einfache Weise Fertigungsprozesse analysiert und verbessert werden können[382]. Die Kenntnis der eigenen Wertströme die gewonnenen Erkenntnisse hieraus, insbesondere der Zykluszeiten, Rüstzeiten und Durchlaufzeiten liefern eine wertvolle Datenbasis für Betrachtungen und Bewertungen (Soll-Ist-Vergleiche) mit Veränderungen nach Industrie 4.0.

Für die Intralogistik ergeben sich aus den Möglichkeiten CPS-fähiger Produktionsanlagen Potenziale für die Verbesserung des innerbetrieblichen Transports und der Materialbereitstellung an den Maschinen. Intelligenten Maschinen ist es möglich, selbstständig Materialien zu ordern bzw. die Güter organisieren sich den Transportweg zur Maschine

[378] Vgl. ten Hompel, 2013, S. 25
[379] ebenda, S. 31ff.
[380] Vgl. Pfohl, 2010, S. 184f.; Erlach, 2007, S. 17f.
[381] Vgl. Erlach, 2007, S. 47f.
[382] Vgl. Rother et al., 2004, S. 4; Erlach, 2007, S. 31ff.

selbst. Dies erfordert Veränderungen in der Organisation des Materialflusses und technische Aufrüstungen der Fördertechnik. Aktuell findet dies u.a. seinen Ausdruck im fortwährenden Trend hin zu fahrerlosen Transportsystemen (FTS)[383], sowie Automatisierungen in der Lagertechnik[384]. Hierbei spielen insbesondere automatische Ein- und Auslagerungen sowie der automatische Transport in die Kommissionierzone eine besondere Rolle. Automatische Werkstücktransporte sind dagegen in flexiblen Fertigungssystemen bereits vielfach nach unterschiedlichen Strategien implementiert[385], sodass die Stückgutbeförderung hier bereits automatisiert ist. Im Zuge der Umstellung auf Industrie 4.0 müssen starre, gebundene bzw. lineare Werkstücktransportsysteme flexibilisiert werden, d.h. der Weg durch die Fertigung muss durch das Werkstück organisierbar und darf nicht durch Fördertechnik vorbestimmt sein. Ferner gilt es dann, den jeweiligen Werkstücktransport für den Umgang mit „intelligenten" Werkstücken anhand der Prinzipien flexibler Fertigungstechnik[386] weiterzuentwickeln[387]:

- Einsatz von sich ersetzenden Maschinen
- Planung flexibler Maschinenanordnungen und Transportwege im Layout der Fabrik
- Schaffung von technischen Möglichkeiten zur Identifikation des Transportgutes

Mit dem Selbststeuerungsansatz der Industrie 4.0 ist ein grundlegender Wandel in der Steuerung solcher Materialflusssysteme verbunden. Das bislang zentralisierte System (gesteuert über einen Materialflussrechner) wird zu Gunsten eines Agenten-basierten Systems abgelöst. Erste Ansätze sind mit dem Konzept der zellularen Materialflusssysteme[388] zu erkennen. Intelligente Behälter und Fördersysteme nutzen Softwaredienste (in Form von Agenten), um sich den Weg zum Lagerplatz etc. zu organisieren. Der agentenbasierte Ansatz wird dabei durchgängig vom Eintritt in das System (Fabrik) bis zum Austritt (Abholung an der Rampe) verfolgt. Agentensysteme sind in der Agententheorie[389] beschrieben und letztlich als kleine Softwareprogramme zu verstehen, die jeweils zu einem ausschließlichen Zweck erzeugt werden. Agenten stellen das virtuelle Objekt dar, welches gewissermaßen „die Interessen" des physischen Gutes in der digitalen Systemumgebung (Agentensystem) repräsentiert und diese mit anderen Agenten verhandelt. Agenten reagieren auf ihre Umwelt (z.B. auf Informationen aus CPS) und können autonom Entscheidungen treffen sowie Einfluss auf ihre Umgebung ausüben (z.B. eine Maschine instruieren). Agenten agieren dabei unabhängig von einer zentralen Steuerung (Server, Leitsystem)[390].

Agentensysteme als Ausprägung einer dezentralen Selbststeuerung heben damit die klassische deterministische Planung durch ein zentrales Leitsystem auf. Klassische Planungskonzepte müssen sowohl in der Modellstruktur (Bereich PLAN im SCOR-Modell) als auch in der Software hierauf angepasst werden.

4.2.2. Produktionslogistik

Bei Betrachtung der Fertigungstechnik fällt schnell auf, dass diese bereits durch die Automatisierungsbestrebungen der vergangenen Jahrzehnte mit zahlreichen eingebetteten Systemen ausgestattet ist, sodass die Kernvoraussetzung für CPS (vgl. Abschnitt 3.4.3) bereits gegeben sind. Kurze Innovationszyklen führen mit jeder Anschaffung von Maschinen quasi automatisch zu Leistungs- und Technologiesprüngen. Die Maschinen „werden also ohne großes Zutun schlauer". Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass kaum ein Unternehmen allein schon aus finanziellen Gründen in der Lage sein dürfte, seine gesamte Fertigungstechnik auf einen Schlag umzustellen bzw. auf einen gleichen Technikstand zu bringen. Lange Amortisationszeiten der Fertigungsanlagen, lange Abschreibungsdauern[391] sowie lange Abkündigungszeiten[392] seitens der Hersteller ermöglichen lange (10-20 Jahre) Übergänge zur nächsten Maschinengeneration in den Fabriken. Veränderungsdruck zu schnelleren Wechseln könnte hierbei jedoch vom Wettbewerb ausgehen, welcher ggfs. mittels neuerer Technik schneller, flexibler und günstiger produzieren und damit seinen Servicegrad steigern kann. Dennoch stellen sich die Szenarien für die Umstellung auf Industrie 4.0 eher evolutionär dar. Wahrscheinlicher

[383] Vgl. Kief et al., 2013, S. 323ff.
[384] Vgl. Barck, 2014, S. 61f.
[385] Vgl. Kief et al., 2013, 321f.
[386] ebenda, S. 320ff.
[387] ebenda, S. 325
[388] Vgl. ten Hompel, 2006, S. 1ff.
[389] Die Agententheorie soll an dieser Stelle nicht vertieft werden. Eine umfangreiche Einführung gibt: Russel et al., 2012, S. 59ff.
[390] Zur Autonomie von Agenten allgemein: vgl. Russel, 2012, S. 65f.
Zur Definition von Agenten in Logistikumgebungen (Materialflusssysteme): vgl. Roidl, 2010, S. 66ff.
[391] Für einige Anlagen laut AfA-Tabellen „Maschinenbau" bzw. „Automobilindustrie" sind Nutzungsdauern von bis zu 10 Jahren angesetzt. Vgl. AfA, 2014
[392] SIEMENS bietet bspw. für einige seiner Controller eine garantierte Ersatzteilvorhaltung von bis zu 10 Jahren. Vgl. SIEMENS AG, 2013a, Tabelle S. 6f.

ist, dass bereits im Betrieb befindliche Maschinen nachträglich aufgerüstet und damit für Industrie 4.0 „ertüchtigt“ werden[393]. Auf der Feldebene und in großen Teilen auch auf der Ebene der Steuerungen sind dabei keine grundlegenden Veränderungen zu erwarten, da die verwendete Infrastruktur bereits heute die Voraussetzungen für Industrie 4.0 erfüllt (siehe Abschnitt 5.3.1).

Vielmehr gilt es, aus dem Strom an Daten, welchen jedes einzelne intelligente Bauteil liefern kann, mit analytischen Methoden Aussagen zur Fehlererkennung und Prozessverbesserung abzuleiten. Jeder Sensor liefert dabei in dichter Taktfolge fortlaufend Daten, was bezogen auf die Vielzahl an verbauten Elementen ein immenses Datenvolumen ausmacht, das es zu speichern, zu verarbeiten und auszuwerten gilt. Die Speicherung und die Auslegung der Netzstrukturen für diese Datenvolumina ist eine technische Aufgabe. Aus den Daten neue Erkenntnisse zu gewinnen, stellt eine strategisch-technische Herausforderung dar, welche mit Data Mining-Methoden bewältigt werden sollen[394].

Dabei wird schnell deutlich, dass der eigentliche Fertigungsprozess, also die Zykluszeit (Arbeitszeit) an einem Werkstück nicht zwingend durch CPS beschleunigt wird. Als wesentlichste Veränderungen sind dabei zu erkennen: Verbesserung der OEE[395] (durch vorbeugende Wartung, Selbstheilung), Verkürzung der Rüstzeiten durch Flexibilisierung der Maschinen (schneller bzw. automatischer Werkzeugwechsel und Zeiteinsparung im Aufspannen des Werkzeugs). Zudem unterstützen CPS die Fehlererkennung[396] und verbessern damit die bereits mit dem Toyota Produktionssystem (TPS) angewandte Strategie der Autonomation[397] zur Vermeidung von Ausschussproduktion.

Der Megatrend zur Flexibilisierung der Unternehmen findet in der Fertigung seinen Ausdruck in der Weiterentwicklung der flexiblen Fertigungssysteme. Die Trendentwicklung zur Zunahme der CNC-Achsen wird sich dabei ebenfalls fortsetzen[398], so wie die Erweiterung des automatischen Werkzeugwechsels und Werkstücktransportes. Der Automatisierungsgrad wird weiter steigen, auch wenn er in einigen Bereichen bereits ein sehr hohes Level erreicht hat[399]. Die Art der Veränderungen wird hierbei aber eher evolutionär verlaufen, große Technologiesprünge werden in der Hardware derzeit nicht erwartet. Vielmehr stellt die Anforderung, die Leistungsfähigkeit der Maschinen und ihre Möglichkeiten in Software abzubilden und damit höheren Unternehmensebenen zugänglich und nutzbar zu machen, die derzeit größte Herausforderung dar[400]. Dabei geht es zum einen um die durchgreifende Nutzung der gleichen Datenbasis in Planung, Entwicklung, Produktion und Nutzung von Maschinen, zum anderen ergeben sich hieraus auch Möglichkeiten, den Kunden in die Produktentwicklung und Produktion einzubinden. Sind Maschinen mit ihren Möglichkeiten und die Fertigungsprozesse vollständig digital beschrieben, lassen sich hierauf Konfiguratoren[401] aufsetzen, mit denen der Kunde das Produkt im Rahmen der Fertigungsmöglichkeiten nach seinen Wünschen gestaltet, und diese Daten unmittelbar in die Fertigung einfließen können. Damit könnte die Fertigung den gestiegenen Individualisierungsansprüchen und den Wünschen nach „on-demand“-Produkten nachkommen (vgl. Megatrends, Abschnitt 3.3.3).

4.2.3. Beschaffung (Procurement)

Auf die Beschaffungsprozesse (SOURCE) des Unternehmens wirkt sich im Wesentlichen der Paradigmenwechsel der Selbststeuerung aus. Aus der Selbststeuerung in der Produktionslogistik folgert konsequenterweise auch die Selbstbeschaffung der für die Fertigung benötigen Rohstoffe, Halbzeuge und Handelswaren. Beschaffungsprozesse werden heute in den meisten KMU und großen Betrieben IT-gestützt bzw. vollständig über Software abgewickelt[402]. Je nach Integrationsgrad der Unternehmen existieren meist Inselsysteme, d.h. die jeweils in den einzelnen Unternehmen vorhandenen ERP- und Procurementsysteme sind bestenfalls über Schnittstellen miteinander gekoppelt[403].

---

393 Vgl. Kagermann, 2013, S. 40
394 Vgl. Kagermann, 2013, S. 94; Schöning, 2014, S. 543ff.
395 Overall Equipment Effectiveness (OEE): Kennzahl zur Beurteilung der Gesamteffizenz einer Anlage. Die Kennzahl wird gebildet als Produkt aus den Faktoren Verfügbarkeit, Leistung und Qualität der Ressource. Details zur Ermittlung: Vgl. Erlach, 2011, S. 57f.
396 Vgl. Schöning, 2014, S. 545
397 Vgl. Ohno et al., 2009, S. 38f.
398 Die Anzahl der CNC-Achsen ist auch ein Maß der „Beweglichkeit“ der Maschine, also der erreichbaren Flexibilität verschiedenste Arbeitsgänge mit der Maschine auszuführen, ohne dass diese hierfür umgerüstet werden muss. Vgl. Kief, 2011, S. 339ff.
399 Vgl. VDI/VDE, 2013, S. 9; Spath, 2013, S. 32
400 Vgl. Kagermann et al., 2013, S. 89f.; Geisberger, 2012, S. 55ff.
401 Vgl. Piller, 2006, S. 198ff.
402 Vgl. BME et al., 2014, S. 2ff.; Appelfeller et al., 2011, S. 15ff.
403 Vgl. BME et al., 2014, S. 17; Appelfeller et al., 2011, S. 45ff.

Wird das Selbststeuerungsparadigma konsequent auf den Bereich der Beschaffung angewandt, müssen die Systeme vollständig vernetzt und ohne Medienbrüche nutzbar sein. Das bedeutet, dass sich mit Eingang einer Bestellung eine automatische Bedarfsermittlung (Bestandsabfrage im Lager und bei Lieferanten) durchführen lässt und fehlende Teile vom System automatisch in den Systemen der Zulieferer bestellt werden können. Neben der softwaretechnischen Integration der eigenen Systeme und derer der Zulieferer stellt dies zugleich hohe Anforderungen an die Qualität der hinterlegten Daten. Artikel müssen für die Behandlung in automatisierten Prozessen detailliert und strukturiert beschrieben sein, damit Verwechslungen, Fehlbestellungen etc. vermieden werden. Lösungsansätze werden hier bereits in Gestalt des EDI-Verfahrens seit den 1980er Jahren angewendet[404], jedoch hat sich hier bislang kein Standard durchsetzen können, sodass von einer heterogenen Formatumgebung ausgegangen werden muss[405]. Dies macht die individuelle Abstimmung des Austauschformates mit jedem Zulieferer erforderlich[406]. Als Ausgangsbasis für die Bereitstellung der Artikel zur Selbstbeschaffung könnten die bereits am Markt eingesetzten Katalogsysteme[407] genutzt werden.

Die Vorteile der Selbstbeschaffung liegen vor allem im Gewinn an Schnelligkeit und Genauigkeit, wenn manuelle Schnittstellen (Eingabe von Bestelldaten in ein System) und Medienbrüche entfallen. Die Umsetzung sollte angesichts der Komplexität, welche durch die Anzahl an Lieferanten und Artikeln entstehen kann, zunächst mit Stammlieferanten entwickelt werden. Als Artikelgruppe eignen sich CX-Teile[408], die einen niedrigen Materialwert und einen regelmäßigen Bedarf haben. Die gefundenen Lösungen sollten dann sukzessive auf weitere Teilegruppen ausgeweitet werden.

Dabei ist zu beachten, dass mit der Zunahme an selbst beschaffenden Systemen am Markt bestimmte Sourcing-Modelle, wie das Single-Sourcing[409], nicht mehr funktionieren, bzw. diesem widersprechen. Ein agentenbasiertes Selbstbeschaffungssystem wird hierbei auf multiple-Sourcing-Strategien zurückgreifen, d.h. der gewählte Lieferant ist nicht vorweg bestimmt, sondern wird im Beschaffungsprozess anhand der hinterlegten Auswahlkriterien (Einstandspreis, Lieferzeit etc.) durch einen Softwareagenten ausgewählt. Für sicherheitsrelevante und strategische Beschaffungsgüter erscheint die Selbstbeschaffung daher ungeeignet, zugleich müssen alle in Frage kommenden Zulieferer über das gleiche Qualitätsniveau verfügen.

Der klassische Einkauf wird dabei nicht obsolet. Vielmehr steigen sogar die Anforderungen an das eingesetzte Personal, da freiwerdende Personalkapazitäten auf die strategischen Funktionen des Einkaufs verwendet werden[410]. Die im Supplier Relationship Management (SRM) beschriebenen Sourcing-Methoden und die strategischen Funktionen der Beschaffung werden auch im Kontext der Industrie 4.0 bedeutend sein. So gilt es, die Voraussetzungen zu schaffen, dass automatisierte Systeme später den geeignetsten Zulieferer auswählen können. Dabei kommen unterschiedliche Kriterien zum Tragen, wie die Lieferzeit, der Einstandspreis, Servicegrade etc. Diese Rahmenbedingungen werden auch in einer Umgebung der Industrie 4.0 von Menschen ausgehandelt und gepflegt.

4.2.4. Distribution

Aus Sicht des produzierenden Unternehmens lassen sich für die Tätigkeiten der Distribution Analogien zu den Entwicklungen in der Beschaffung herstellen. Auch hier wird der Disponierende nicht durch Software ersetzt, sondern die Arbeit des Disponierenden wird durch automatisierbare Aktivitäten entlastet und gleichzeitig mit anspruchsvolleren Tätigkeiten angereichert. Letztere entstehen vor allem dadurch, dass auch hier die komplexen Beziehungsgeflechte zu den Logistikpartnern und Transportunternehmen gepflegt und für automatisierte Systeme nutzbar gemacht werden müssen. Nach dem Paradigma der Selbststeuerung können sich die intelligenten Güter selbstständig für den Versand beim entsprechenden Dienstleister anmelden und sich Transportkapazitäten buchen[411]. Die Softwareagenten greifen hierbei auf die Relationen zurück, welche vom Disponierenden im System hinterlegt sind. In diesem Szenario der Industrie 4.0 wären darüber hinaus direkte Verhandlungen

[404] Vgl. Appelfeller et al., 2011, S. 46f.
[405] Appelfeller et al., 2011, S. 46
[406] ebenda, S. 46
[407] Vgl. BME et al., 2014, S. 2, S. 17
[408] Zur Erläuterung der ABC-XYZ-Analyse: Vgl. Wannenwetsch, 2009, S. 95
[409] Zur Erläuterung von Single Sourcing und Multiple Sourcing: vgl. Appelfeller et al., 2011, S. 119f.
[410] Dies wird mit dem Übergang zu e-Procurement-Systemen bereits praktiziert:
Vgl. Weimar, T., 2013, S. 32
[411] Zur Übertragung der Ansätze zur Selbststeuerung aus der Intralogistik auf Bereiche der Extralogistik, die zur Bildung eines „Cyber-Physischen Logistiksystems“ führen: Vgl. Veigt et al., 2013, S. 15ff.
Zum Einsatz von Agentensystemen in der Intralogistik: Vgl. ten Hompel, 2008, S. 108ff.

der Softwareagenten des Produktionsbetriebes mit dem System des Transportunternehmens möglich[412].

Auch für die distributiven Bereiche wird sich eine Umstellung und Vernetzung der Softwaresysteme nur schrittweise vollziehen und es erscheint sinnvoll, die gleiche Vorgehensweise wie auf der Beschaffungsseite zu wählen. So sollten Transportgüter ebenfalls einer Analyse (ABC XYZ) unterzogen und die automatisierbaren Sendungen identifiziert werden. Danach sollte zunächst die Gruppe ausgewählt werden, welche ein regelmäßiges Aufkommen und einen geringeren Waren- bzw. Transportkostenanteil aufweist (je nach Kriterienwahl in der Analyse).

Aus Studien zur IT-Unterstützung und Durchdringung in der Distributionslogistik wird außerdem deutlich, dass die IT-Vernetzung bislang nur innerhalb einzelner Unternehmen als durchgängig angesehen werden kann[413] und in den Versorgungsketten aus Wettbewerbsgründen bewusst intransparent gehalten wird[414]. Selbst dort, wo leistungsfähige Software bereits im Einsatz ist, wird deren Potenzial nur zu geringen Teilen ausgeschöpft[415]. In den übrigen Versorgungsketten herrschen bislang viele Medienbrüche vor, deren Schnittstellenprobleme bislang nicht ausreichend gelöst sind[416].

Neben den softwaretechnischen Herausforderungen aus dem Selbststeuerungsparadigma stellen sich für die Distribution zudem erhebliche Anforderungen an den Bereich der Kommissionierung, welche in einen Lösungsansatz einbezogen werden sollte. Die Kommissionierung ist bislang ein weitestgehend manueller Prozess[417]. Bei fortschreitenden Automatisierungen in der Ein- und Auslagerungstechnik sowie weiter flussaufwärts in der Produktion und flussabwärts an der Rampe des Unternehmens (Senke bzw. Schnittstelle zur Transportlogistik) kann die dazwischenliegende Kommissionierung zum Engpass des gesamten Wertstroms werden. Um den „Mob in der Packerei (Kommissionierung)“ (frei übersetzt nach *Peter Drucker*)[418] zu vermeiden, müssen die Handarbeiten in die Automatisierungs- und Selbststeuerungsstrategien von Beginn an mit einbezogen werden.

4.2.5. Wandel im Handel

Neue Technologien des E-Commerce und die sich hieraus ergebenen Möglichkeiten haben die klassischen Distributionswege (Absatzkanäle) bereits verändert. So erfolgt sowohl die Warenbestellung als auch die Information über die Gütereigenschaften heute auf unterschiedlichen Wegen. Beispielsweise bestellen 66% der Privathaushalte[419] heute bereits online, während der Anteil der E-commerce-Nutzung in Unternehmen 42% ausmacht[420]. Die Distributionslogistik sieht sich bereits heute mit einer Vielzahl von Kanälen konfrontiert, die in der jeweiligen, speziellen Art zu bedienen sind. Treiber sind hierbei die Güterproduzenten, die auf unterschiedlichen Wegen im Sinne eines Multikanal-Marketingsystems[421] den Kontakt zum Kunden suchen. Eine der jüngsten Weiterentwicklungen stellen die sogenannten „omni-channel logistics“[422] dar, bei denen Händler Produkte in großzügigen Ladenflächen ausstellen und diese vor Ort vom Kunden über Internet bestellt werden können und anschließend direkt zum Kunden geliefert werden. Für die Distribution und die Transportlogistik haben sich aus dieser Fragmentierung der Distributionskanäle (vgl. Abschnitt 3.3.3) vor allem Änderungen bei den Sendungsgrößen ergeben. Sendungen werden immer kleinteiliger, was die Komplexität des Logistikaufwands erhöht[423].

Diese Entwicklungen vollziehen sich dabei unabhängig von den Veränderungen, welche durch die Industrie 4.0 erwartet werden. Dabei spielt die Flexibilität und Schnelligkeit von Logistiksystemen eine maßgebliche Rolle. Treiber sind hierbei aber nicht die Technologien und Konzepte der Selbststeuerung, sondern die digitalisierten und individualisierten Märkte, deren Werkzeugen (Online-Shops, mobile Bestellanwendung – Apps) sich die Kunden bedienen. Auch ohne die Veränderungen der Industrie 4.0 wäre hier die Distributionslogistik von Kundenseite aus gefordert. Dabei lassen sich die Flexibilisierungs- und Automatisierungsbemühungen mit dem Ziel der Selbststeuerung aus der Produktionslogistik aber mit den Zielen und Ansprüchen der Distributionslogistik in Einklang bringen. Dabei sollte unabhängig von den Möglichkeiten, die sich durch intelligente Güter ggfs. noch nach der Auslieferung ergeben (digitales Produkt-

412 Vgl. Scholz-Reiter et al., 2014, S. 66f.; Behrens et al., 2006, S. 30f.
413 Vgl. Lenz et al., 2010, S. 3
414 ebenda, S. 44
415 Vgl. Lenz et al., 2010, S. 135
416 Vgl. BME et al., 2014, S. 17
417 Vgl. Pfohl, 2010, S. 118ff.
418 Drucker, 2012, S. 100f. sowie im Anhang
419 DESTATIS, 2014d, S. 23
420 DESTATIS, 2013, S. 20
421 Vgl. Kotler et al., 2011, S. 1017ff.
422 Vgl. Handfield, 2013, S. 30; DVZ, 2013, S. 1
423 Vgl. Lenz et al., 2010, S. 52

gedächtnis[424], Funktionserweiterung durch Softwareupdates etc.), die Intelligenz des individuellen Gutes auch für den Auslieferungsvorgang selbst genutzt werden. Mit RFID oder ähnlichen Identifikationstechniken ausgestattete Transportgüter tragen die Information zu ihrem Zielort bereits in sich. Das Selbststeuerungsparadigma sollte also nicht am Warenausgang der Fabrik mit Verladen in das Auslieferungsfahrzeug enden, sondern auf die Touren- und Routenplanung der spezialisierten Transportlogistiker erweitert werden. Da es sich hierbei aufgrund des hohen Outsourcing-Anteils der Produktionsunternehmen[425] meist um unterschiedliche Unternehmen handelt, sind Technologiebrüche zwischen der Intralogistik der Fabrik und der Transportlogistik des Logistik-Dienstleisters durch Schnittstellendefinitionen zu vermeiden, damit die Identifikationstechniken durchgängig genutzt werden können. Pakete könnten sich somit anhand ihrer Destinationen, Termine, dem Gewicht bzw. Volumen selbstständig zu Versandeinheiten kombinieren[426]. Damit würde sich auch für den Bereich der Extralogistik ein Paradigmenwechsel vollziehen, da fortan nicht mehr zentral und deterministisch Versendungen geplant würde, sondern die Transportgüter ihren Weg zum Lieferort selbst bestimmen[427] und sich dazu der Logistikstruktur des Logistikanbieters bedienen.

4.3. Extralogistik

Für den Bereich der Extralogistik wurde im vorherigen Abschnitt bereits festgestellt, dass dieser ebenfalls durch die Veränderungen der Industrie 4.0 einem Paradigmenwechsel ausgesetzt sein könnte.

Wie sich Güter in den weitverzweigten Logistiknetzen der Third- oder Fourth Party Logistics Provider bewegen, und wie sich die Komplexität dieser Netze beherrschen lässt, ist für sich ein großes Thema neben der Industrie 4.0 und wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht vertiefend untersucht. Wie in den Megatrends aufgezeigt, wirkt die Globalisierung insbesondere auch auf die Transportlogistik, welche die Güter zwischen den unterschiedlichen Stufen der Wertschöpfung bewegt. Die Vereinheitlichung der Transportbehälter hat mit dem Container zu einer deutlichen Reduzierung der Komplexität in der Transportkette beigetragen, sodass geschlossene intermodale Transporte weitestgehend möglich sind[428]. Dazu bietet die ausgereifte Identifikations- und Nachverfolgungstechnik den Logistikdienstleistern bereits heute einen feinaufgelösten Blick auf den Status jedes Paketes in der Transportkette. Dennoch spielen in diesem Bereich die intelligenten Güter eher eine passive Rolle. Sie werden bewegt und geben ggfs. Auskunft über ihre Identität und werden lokalisiert. Selbststeuerungskonzepte aus dem innerbetrieblichen Materialfluss finden in der Extralogistik bislang kaum Beachtung[429]. Dies wird vermutlich in der noch wesentlich höheren Komplexität eines offenen globalen Systems begründet sein. Anders als in intralogistischen Systemen ist die Selbststeuerung von Transportgütern über Unternehmens- und Ländergrenzen durch unterschiedliche Technologiestandards hinweg ein weitaus komplexeres Unterfangen. Lediglich im Bereich der unternehmenseigenen Logistikprozesse scheint diese Komplexität derzeit beherrschbar.

So können internationale Konzerne durch Standardisierung ihrer Versorgungskette auch die Standardisierung der Extralogistik forcieren, wenn sie durch entsprechende Marktmacht und -volumen ihre Logistikpartner zur Einführung bestimmter Technologien zwingen[430]. Für die Anwendung von Selbststeuerungskonzepten mit wechselnden Logistikprovidern erscheint dies jedoch nicht umsetzbar. Gleichwohl sind die in der Intralogistik erzielten Vorteile durch Selbststeuerungskonzepte auch in den extralogistischen Bereich übertragbar: Die Reduktion der Komplexität, wenn sich Transportgüter selbst organisieren und nicht mehr zentral geplant werden müssen, sowie die Optimierung der Transportstrecken und Auslastung (Kapazität) der Transportfahrzeuge sind hier als Beispiele zu nennen[431].

---

424 Hierunter wird die Speicherung einer Art Produkthistorie (Arbeitsschritte, Besitzerwechsel, etc.) verstanden. Die Historie ist dabei direkt am oder im Produkt gespeichert. Vgl. Kagermann et al., 2011, S. 2; BMBF, 2012a, S. 23

425 Vgl. Handfield et al., 2013, S. 57

426 Mit dieser Hypothese wird die Annahme verfolgt, dass sich die intralogistischen Konzepte auf die Extralogistik, explizit die Transportlogistik übertragen lassen. Vgl. Scholz-Reiter et al., 2005, S. 12ff.

427 Vgl. Scholz-Reiter, 2005, S. 15

428 Vgl. Otto, 2007, S. 314ff.

429 Die Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Recherchen brachten zumindest keine Erkenntnisse darüber. Das Hauptaugenmerk der Akteure scheint sich derzeit auf die Produktionslogistik und Intralogistik zu konzentrieren. Gleichwohl wird zur Selbststeuerung im Kontext der Transportlogistik geforscht und publiziert: Vgl. SFB637, 2014

430 Als Beispiel kann die Einführung von RFID in der Metro-Gruppe genannt werden. Vgl. Wolfram, 2008, S. 116ff.

431 Vgl. Rekersbrink et al., 2011, S. 32;

4.4. Unternehmensorganisation

4.4.1. Veränderung der Organisationsstrukturen

Mit Veränderungen der technischen Möglichkeiten gehen meist auch Veränderungen der Möglichkeiten einher, die Arbeit mit diesen Technologien zu organisieren. So wie die Entstehung der Massenproduktion in den früheren industriellen Revolutionen die Arbeitswelt nachhaltig veränderte, so kann auch bei der aktuellen industriellen Revolution davon ausgegangen werden, dass sich die Art und Organisation der (Produktions)Arbeit ändern wird[432].

Die derzeit praktizierte Organisation in Produktionsunternehmen beruht auf einem Top-Down-Ansatz, nach dem von der obersten Entscheidungsebene Vorgaben nach unten durchgegeben werden und mittels Software kontrolliert und ausgeführt werden. Es handelt sich um einen deterministischen Ansatz, nach dem Entscheidungen möglichst exakt vorgeplant werden, um anschließend auf den unteren Ebenen ausgeführt zu werden. ERP-, MES- und PPS-Systeme sind bislang nach diesem Grundprinzip aufgebaut[433]. In der Struktur entspricht dies einem pyramidalen Aufbau der Verantwortungsbereiche im Unternehmen und ihrer Softwarewerkzeuge (siehe Abbildung 12). Auch in der Technikhierarchie der produzierenden Unternehmen findet sich dieser Aufbau in Form der Automatisierungspyramide[434].

Automation und Fertigungstechnik lösen im Zusammenspiel mit dem Konzept des Internet der Dinge die Ebenengrenzen innerhalb des pyramidalen Aufbaus sukzessive auf. Maschinen kommunizieren mit Gütern, beide kommunizieren mit Software (Diensten) eines Produktionssystems[435]. Wenn intelligente Güter die Maschine anweisen können, welche Bearbeitungsschritte an ihnen auszuführen sind und sich Aufträge entsprechend ihrer jeweiligen Ziele über Softwareagenten selbst in der Reihenfolge sortieren und sich Maschinenkapazitäten buchen, dann werden die Mechanismen der Automatisierungspyramide im Hinblick auf die bisherige Entscheidungsrichtung ausgehebelt. Entscheidungen werden nicht mehr Top-Down getroffen, sondern ebenenübergreifend ausgehandelt.

Nach dem Ansatz der Selbststeuerung ist der Materialfluss eines bestimmten Objektes nicht mehr zwangsläufig vorbestimmt, Aufträge können sich überholen (Reihenfolgeänderungen durch Terminprioritäten), Werkstücke können auf eine alternative Maschine ausweichen (bei Störungen etc.). Hieraus resultiert ein Paradigmenwechsel[437] in der Art der Produktionsplanung und Steuerung. Das deterministische Planungskonzept weicht dem Konzept der selbststeuernden Produktion. Der ursprüngliche Ansatz, alles vorweg zu planen und dann auf den unteren Ebenen entsprechend der Planung auszuführen, ist allein aus Gründen der Komplexität vollständig flexibilisierter Fertigungsprozesse nicht mehr praktikabel[438]. Es müsste für jede Änderung ein neuer Planungslauf angestoßen werden, der Zeit- und Rechenkapazitäten benötigt und mitunter länger braucht als die zu planende Tätigkeit selbst[439].

Aus der Auflösung der Automatisierungspyramide folgern dann ebenso Veränderungen in der Struktur der Unternehmensorganisation selbst. Die Selbstorganisation zu organisieren bedeutet, über die ursprünglich in Abteilungen abgrenzten Fachdisziplinen hinaus zu denken und Unternehmensprozesse zu gestalten. Dies stellt hohe Anforderungen an das Personal und Führungskräfte. Entscheidungen müssen dezentralisiert und kurzfristig am Ort des Geschehens getroffen werden[440].

4.4.2. Software und Technik

Der erforderliche Wandel in der Unternehmensorganisation muss sich auch in der Softwarearchitektur widerspiegeln. Gerade im Hinblick auf die vertikale Vernetzung innerhalb der Funktionsbereiche eines Unternehmens stellt die Softwarearchitektur die entscheidende Infrastruktur. Sie darf Unternehmensprozesse nicht be- oder verhindern, sondern muss diese möglichst ideal abbilden und mit geänderten Anforderungen skalieren. Starre Softwarekonstrukte führen zu Parallelstrukturen und hebeln die Konzepte des „digitalen Lebenszyklus“ ggfs. an entscheidenden Stellen aus. Diese Intransparenz kann in innovationsgetriebenen Märkten mit raschen Trend- und Produktwechseln wettbewerbsentscheidend und für das Unterneh-

[432] Vgl. Spath et al., 2013, S. 22ff.
[433] Vgl. ten Hompel et al., 2013, S. 24f.
[434] Vgl. VDI/VDE, 2013, S. 4
[435] Vgl. ten Hompel et al., 2008, S. 108f.
[436] Vgl. VDI/VDE, 2013, S. 4
[437] Vgl. Jörgl, 2014, S. 30
[438] Vgl. ten Hompel et al., 2008, S. 106ff.
[439] ebenda, S. 105f.
[440] Vgl. Handfield, 2013, S. 39

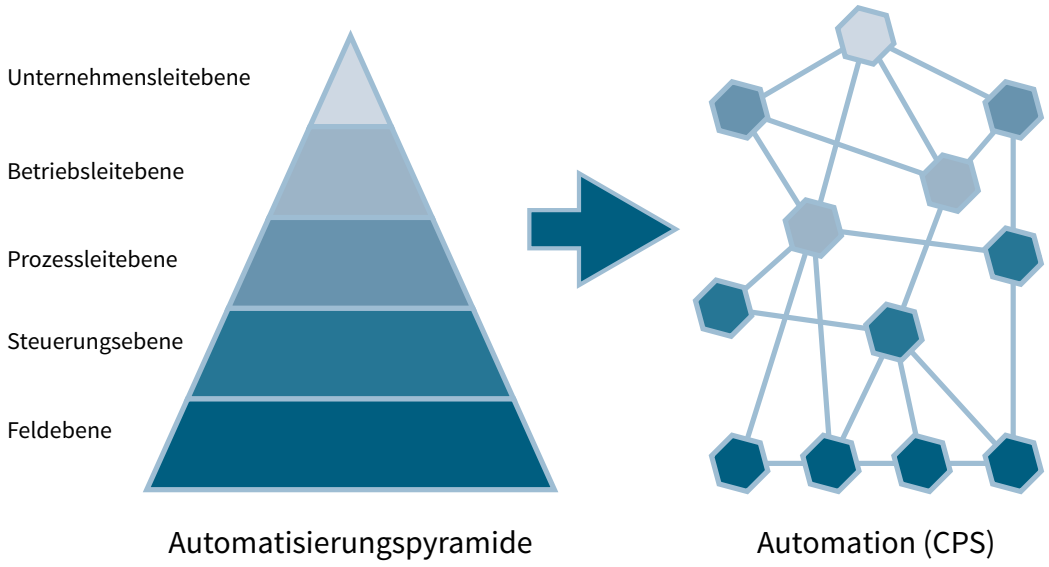


Abbildung 12: Auflösung der Automatisierungspyramide nach VDI[436]

men überlebenswichtig sein. Die Verteilung der Steuerung hin zu dezentralen, selbstgesteuerten Prozessen muss auch in der Software abgebildet werden[441]. Monolithische Softwarekonzepte werden daher durch dezentrale Ansätze abgelöst[442].

Nach dem Idealbild der Industrie 4.0 sind alle Bestandteile der Maschine mit ihren Eigenschaften bereits komplett digital abgebildet, sodass sich auch die unterschiedlichsten Fertigungsarten, die mit der Maschine möglich sind, bereits in der Software vorwegnehmen lassen. Durch den Einsatz von CPS und Softwarewerkzeugen der PLM[443] planen und konstruieren Maschinenhersteller heute bereits in vielen Branchen (z.B. Automobilindustrie) komplett digital[444]. Damit eröffnen sich durch die vorhandenen digitalen Daten und Modelle neue Möglichkeiten der Nutzung neben der deutlichen Verbesserung der Fertigung. Zum einen werden die Datenmodelle (z.B. CAD-Zeichnungen) in Simulationsmodelle, also virtuelle Maschinen überführt, sodass sich die komplette Maschine mit allen ihren komplexen Abläufen vor der ersten Prototypfertigung testen und optimieren lässt. Simulationen dieser Qualität, also auf komplett digitalen Modellen der Maschine mit Echtzeitdaten aus dem täglichen Betrieb ermöglichen Weiterentwicklungen (z.B. Ausbau, Erweiterungen) der Maschine, ohne dass diese hierfür stillstehen muss. Die Erfahrungswerte, Messwerte etc. aus der späteren Anwendungspraxis fließen ebenso wieder nahtlos (und ggfs. in Echtzeit) in die Datenmodelle ein und stehen bei der Weiterentwicklung der Maschinengeneration bzw. neuer Maschinen zur Verfügung[445]. Die bereits angesprochene Optimierung der Wartung durch „Selbstprüfung“ optimiert dabei zugleich die OEE der Einheit. Soll eine baugleiche Maschine neben der bereits in Betrieb befindlichen Maschine hinzugenommen werden, kann die aufwändige Einrichtezeit deutlich verkürzt werden, da sich die Maschinenparameter aus der einen Maschine vollständig auf die neue Maschine übertragen lassen. Im besten Fall ist damit nach dem Konzept des „Plug & Produce“[446] eine sofortige Inbetriebnahme der Maschine im Produktionsprozess möglich. Ebenso können die Maschinen auch an geografisch weit voneinander entfernten Standorten aufgestellt werden und über Vernetzung auch dauerhaft mit gleichen Einstellungen betrieben werden. Maschinen können sich somit auch untereinander auf dem gleichen Stand halten, in dem sie ihre Daten untereinander teilen.

Neben der Simulation einzelner Maschinen besteht darüber hinaus auch die Möglichkeit, mehrere Maschinen in Gruppen oder komplexen Fertigungs-/Fabrikumgebungen zu simulieren und so den Aufbau kompletter Fertigungslinien im virtuellen Raum vorwegzunehmen. Daraus lässt sich

441 Vgl. Westkämper et al., 2014, S. 16ff.
442 Vgl. Wolf et al., 2013, S. 156ff.
443 Product Lifecycle Management. Hierunter wird die Zusammenführung der aus unterschiedlichen Umgebungen stammenden Software-Werkzeugen CAD (Computer Aided Design), CAM (Computer Aided Manufacturing), CAE (Computer Aided Engineering), CAP (Computer Aided Process Planning), PDM (Product Definition Management) verstanden, welche in einer einheitlichen Software-Umgebung zusammengeführt werden. Vgl. Kief et al., 2013, S. 562ff., S. 567.
444 Vgl. Kief et al., 2013, S. 562ff.
445 Vgl. Bauer et al., 2014, S. 29
446 ebenda, S. 20

die Schlussfolgerung ableiten, dass dann auch die Simulation kompletter Wertschöpfungsketten möglich wird. Weitergedacht, wird damit auch die Bereitstellung komplexer Maschinen-, Fabrik- oder Supply-Chain-Charakteristiken durch die Anbieter möglich. Liegt eine eindeutige Beschreibung der Schnittstellen bzw. der Charakteristiken der Fertigung vor, so wird auch die flexible Vernetzung von Maschinen, Fabriken oder ganzen Wertschöpfungsketten möglich. Echtzeitdaten von Maschinen und Daten aus Planungssystemen werden mit den Schnittstellenbeschreibungen dezentral bspw. in der Cloud bereitgestellt und auftragsbezogen durch Software miteinander verknüpft. Unternehmen und Kunden verbinden sich dann zu „virtuellen ad-hoc Organisationen“[447] und Anbieter können ihre freien Kapazitäten auf den Märkten anbieten bzw. spezialisierte Dienste oder Anbieter (z.B. Kapazitätsbroker[448]) hierfür nutzen.

Abgeleitet aus dieser möglichen Entwicklungsperspektive ergeben sich ganz neue Modelle der vernetzten Produktion. Maschinen bzw. Fabriken und ganze Versorgungsketten sind mit ihren virtuellen Abbildern über Konfiguratoren auf Online-Plattformen zugänglich. Aus den Echtzeitdaten dieser Systeme können Termine und Kosten für den individuellen Auftrag kalkuliert und die Produktion unmittelbar angestoßen werden. Auf Basis einer vernetzten Produktionsinfrastruktur kann dezentral und auftragsbezogen produziert werden. Die Versorgungskette bildet sich hierzu unmittelbar durch Selbstorganisation.

4.4.3. Logistikcontrolling

Eine fundierte Beurteilung zur Einführung und Weiterentwicklung von Logistiksystemen und der eingesetzten Software sollte stets auf Basis messbarer (quantitativer) Werte erfolgen. Die rein qualitative Bewertung der Arbeitsweise etc. genügt hierfür nicht.

Daher sollten Unternehmen eine Logistikkostenrechnung implementieren bzw. die vorhandenen Systeme auf den Logistikbereich erweitern. Aus der Analyse der betriebseigenen Logistikprozesse sollte ein Kennzahlensystem entwickelt werden, welches zur Beurteilung und Erfolgsmessung von neuen Technologien und Abläufen herangezogen werden kann. So lässt sich anhand von vorher-/nachher-Vergleichen schnell darstellen, ob Maßnahmen zur Automatisierung von Unternehmensbereichen tatsächlich Einsparungen gegenüber manuellen Tätigkeiten erbracht haben. Das Kennzahlensystem sollte daher in seiner Granularität so aufgebaut sein, dass sich fachbereichsspezifische Aussagen treffen lassen. Die klassischen Kennzahlen aus der Logistik wie die Durchlaufzeit, Auslastung und Produktivität sollten dabei auch um die Erfassung des Energieverbrauchs und der damit verbunden Kosten ergänzt werden, so treten die Investitionskosten einer Förderanlage heutzutage gegenüber den Energiekosten für den laufenden Betrieb zurück[449].

Für die Kalkulation von Selbststeuerungsprozessen im Szenario der Industrie 4.0 sind darüber hinaus detaillierte Kennzahlen zu den Kosten der jeweiligen Maschine, der Kosten der Transportmittel und der Transportwege erforderlich. So lassen sich die Kosten als Entscheidungsgröße für die Auswahlprozesse durch Agentensysteme nutzen.

[447] Vgl. BMBF, 2012a, S. 21
[448] ebenda, S. 27
[449] Vgl. Schmidt et al., 2011, S. 1

4.5. Zusammenfassung

In den vorherigen Abschnitten wurde verdeutlicht, dass die Logistik unmittelbar mit der Produktion verbunden ist. Veränderungen wirken sich jeweils auf den anderen Bereich aus. Daher ist es erforderlich, für die Anforderungen aus der Industrie 4.0 ganzheitliche Lösungen zu entwickeln. Dies gilt insbesondere für Entwicklungen in der Intralogistik. Diese sollten auch die Extralogistik – explizit die Transportlogistik – mit einbeziehen. Dabei sollten zunächst die branchen- und unternehmensspezifischen Anforderungen detailliert analysiert und bewertet werden, wie dies anhand des Ansatzes von *Porter* aufgezeigt werden konnte. Die Technologien sind zwar Treiber der Industrie 4.0, diese erfüllen aber keinen Selbstzweck, sondern dienen der Erreichung konkreter Unternehmensziele, welche sich wiederum in Leitstrategien formulieren lassen. Die Migration zur Industrie 4.0 hat damit eine strategische, eine technische sowie eine organisatorische Komponente.

Die Technik ermöglicht die Beherrschung von Komplexität und die Automatisierung von Abläufen. Gleichzeitig erfordert ihr Einsatz sowohl organisatorische Veränderungen aller Unternehmensbereiche als auch der unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit[450]. Investitionsentscheidungen werden dabei stets einen kompetitiven und einen kollaborativen Anteil aufweisen, da die eigene Wettbewerbsfähigkeit durch gezielte Investitionen in Industrie 4.0-Technologien gesteigert werden soll, aber zugleich auch die Fähigkeit zur unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit in Netzstrukturen verbessert werden muss, um als Verbund (Produktionsnetzwerke[451]) ebenfalls wettbewerbsfähiger zu werden. Unternehmen sind stets Bestandteil von Versorgungsketten, welche mit der Industrie 4.0 zu Versorgungsnetzen übergehen[452]. Sie sind mit abnehmender Fertigungstiefe auf leistungsfähige Partnerunternehmen angewiesen. Lokale Optimierungen wie die Verkürzung der Durchlaufzeit und Verbesserungen der OEE von Cyber Physikalischen Produktionssystemen haben aber nur dann einen marktwirtschaftlichen und wettbewerblichen Wert, wenn sich diese Optimierungen auf die gesamte Versorgungskette des Produktes auswirken. Kunden honorieren die Gesamtleistung des Systems (Wertschöpfungskette) und nicht die Leistung einer einzelnen Fabrik. Lösungsansätze für die Umsetzung der Industrie 4.0 können daher nur als ganzheitliche Konzepte erfolgreich umgesetzt werden. Die Industrie 4.0 bedingt letztlich über die Vernetzung der Dinge eine Vernetzung mit einer Vielzahl unterschiedlicher Unternehmen entlang der Supply Chain. Eine gemeinsame Rahmenarchitektur und gemeinsame Technikstandards sind daher maßgeblich für den Gesamterfolg der Supply Chain.

Die betriebliche und überbetriebliche Organisation der Leistungserbringung folgt dabei den Veränderungen aus der Technik. Wie im Abschnitt 4.4.1 dargestellt, werden sich starre Abteilungs- und Fachbereichsgrenzen zu Gunsten der kollaborativen, projekt- und auftragsbezogenen Arbeit auflösen. Zusammengefasst sind die Anforderungen an die besprochenen Bereiche der Prozesskette durch die Industrie 4.0 in Tabelle 1 dargestellt.

[450] Vgl. Kagermann et al., 2013, S. 18
[451] Vgl. BMBF, 2012a, S. 20f.
[452] Vgl. Handfield, 2013, S. 8, S. 54ff.

Prozesselemente (SCOR)	Strategie	Technik	Organisation
Alle Bereiche	Paradigma der Selbststeuerung	Automatisierungs- und Identifikations-techniken	interdisziplinäre Zusammenarbeit
PLAN	Wettbewerbsvorteile anhand der Wertkette für unterstützende Tätigkeiten	Dezentrale Softwaresteuerung Agentensysteme	vertikale und horizontale Integration
	Subsidiaritätsprinzip auf den Ebenen	Data Mining Software	Bottom up ersetzt Top Down
	Data Mining-Strategien	Speicherung und Zugang zu Prozessdaten	Pull-Strukturen ersetzen Push-Systeme
SOURCE	Wettbewerbsvorteile anhand der Wertkette für die Eingangslogistik	Verwaltung vollständiger Stücklisten, Hilfs- und Betriebsstoffe in einer Daten-bank	vertikale und horizontale Integration
	Sourcing-Strategien für dezentrale Beschaffung	automatische, betriebsinterne Bedarfs-meldungen ins System	
	SRM-Konzepte ausgelegt auf Netzwerkstrukturen	Schnittstellen für automatische Bestellun-gen in Fremdsystemen	
MAKE	Wettbewerbsvorteile anhand der Wertkette für Operationen und Ausgangslogistik	CPS und CPPS Auflösung starrer Verkettungen	
		Ertüchtigung alter Technik durch Aufrüs-tung	
DELIVER	Wettbewerbsvorteile anhand der Wertkette für Ausgangslogistik und Kundendienst	Schnittstellen für automatische Versand-buchung in Fremdsystemen	vertikale und horizontale Integration
	Automatisierung der Kommissionierung		

Tabelle 1: Lastenheft der Logistik für Industrie 4.0

5. Lösungsansatz für die Logistik 4.0

5.1. Konzeptansatz

5.1.1. Vorüberlegungen

Aus der Identifikation der Aktivitäten nach *Porter* leiten sich bereits konkrete Strategieansätze für die Ausrichtung eines Unternehmens ab. Die Aktivitäten helfen insbesondere bei der Ausrichtung auf wertschöpfende Aktivitäten und sollten, wie erläutert, mit dem Fokus auf die Veränderungen durch die Industrie 4.0 entwickelt werden. Derartige wertschöpfende Aktivitäten können dabei zunächst „technikneutral" beschrieben werden, d.h. sie definieren Funktionen und Methoden, welche dann ihre Ausprägung in bestimmten Technologien finden. Methoden überdauern meist die technische Evolution, bis disruptive Veränderungen die Methode grundsätzlich in Frage stellen oder überholt erscheinen lassen, häufig verbunden mit einem Paradigmenwechsel. Ein fundierter Konzept- und Strategieansatz wächst also mit den technischen Möglichkeiten und Veränderungen mit und zeigt sich auch „robust" gegenüber technologischen Weiterentwicklungen.

Die Herausforderungen globaler Produktion wachsen nach den Megatrends (vgl. Abschnitt 3.3.3) auch künftig weiter an. Dabei werden die Unternehmen mit ihren Standorten (Werken) vermehrt global verteilt produzieren und dabei jeweils einen stärkeren regionalen Bezug einnehmen. Darüber hinaus werden sie die Zusammenarbeit mit unterschiedlichsten Partnernetzwerkwerken suchen. Die Komplexität der Vernetzungen und deren Anzahl stellen dabei die maßgebliche Herausforderung dar.

Zur Entwicklung eines Konzeptansatzes soll daher ein Modell herangezogen werden, welches sich gerade in einer komplexen Umwelt durch eine reduzierte und fokussierte Betrachtung auszeichnet.

5.1.2. Konzeptansatz der Fraktalen Fabrik

Warneckes Ansatz der Fraktalen Fabrik beruht auf der Annahme, dass dem sich ständig verändernden Umfeld und den damit stetig erforderlichen Anpassungen und Veränderungen im Unternehmen auch mit Software nicht beizukommen ist, wenn nicht von Grund auf in dezentralen Einheiten möglichst autark gearbeitet werden kann[453]. Eine zentrale Weisungsstruktur hält er für viel zu träge und unflexibel[454]. Er führt den Begriff der Fraktalen Fabrik ein, in dem sich kleine Einheiten selbst im Sinne eines Ganzen (hier dem Unternehmensziel) organisieren und untereinander koordinieren[455]. Der Vorteil im fraktalen Ansatz liegt vor allem darin, dass das einzelne Fraktal nur eine geringe Komplexität und damit eine sehr leichte Beherrschbarkeit aufweist. Erst wenn sich die Fraktale zu einem größeren Fraktal verbinden, werden dessen Strukturen äußerst komplex. Dies spiegelt wiederum sehr gut die heutige Umgebung und die Herausforderungen durch Komplexität an die Unternehmen wider. Die Ansätze zur fraktalen Fabrik wurden von *Warnecke* Anfang der 90er Jahre vorgestellt, einer Zeit, in der die Computertechnik unter dem Schlagwort CIM[456] bereits Eingang in die Produktion gefunden hatte. Der CIM-Ansatz der 1980er Jahre wird heute gerade wegen der starren Verkettung der Prozesse und Inflexibilität als gescheitert angesehen[457]. Auch *Warnecke* zieht aus heutiger Sicht falsche Schlüsse in Bezug auf seine Forderungen nach Reduzierung der Variantenvielfalt zur Reduzierung der Komplexität[458]. Dennoch sind der grundsätzliche Ansatz der Bildung von Fraktalen in der heutigen Technikumgebung durchaus anwendbar und Bestandteil der aktuell diskutierten PLM-Konzepte[459].

Der Ansatz der Fraktalen Fabrik steht dabei neben weiteren Ansätzen für die Gestaltung von Produktionssystemen wie Bionic Manufacturing und Holonic Manufacturing[460], auf die an dieser Stelle aber nicht vertiefend eingegangen werden soll.

Bei einem Fraktal handelt sich um ein Konstrukt, welches durch zwei Eigenschaften charakterisiert ist: Selbstähnlichkeit und Selbstorganisation[461]. Selbstähnlich bedeutet dabei, dass ein Fraktal aus Elementen aufgebaut ist, welche bei ihrer Zerlegung wiederum den gleichen Aufbau zeigen usw. Ein Fraktal bildet zusammen mit anderen Frak-

[453] Vgl. Warnecke, 1992, S. 163f.
[454] ebenda, S. 114, S. 166ff.
[455] Vgl. Warnecke, 1992, S. 142ff.
[456] Computer Integrated Manufacturing
[457] Vgl. Bracht et al., 2011, S. 5ff.
[458] Vgl. Warnecke, 1992, S. 102f.
[459] PLM-Konzepte gehen über die Integration der Software-Werkzeuge hinaus und entwerfen entlang der Produktentstehungszyklen über die Verwendung durch den Anwender bis hin zur Rücknahme/Recycling durch den Hersteller einen Prozesszyklus. Vgl. SIEMENS AG, 2010, S. 9
[460] Vgl. Gronau, 2013, 13ff.
[461] Vgl. Warnecke, 1992, S. 141

talen wiederum ein Fraktal, welches die gleichen Eigenschaften zeigt[462]. Fraktale nutzen Kommunikationssysteme zum Austausch mit ihrer Umwelt. Sie weisen untereinander eine hochgradige Vernetzungsfähigkeit auf und verfügen über Methoden, sich selbstständig auf ihre Umgebung einzustellen bzw. sich dieser durch Umbildung anzupassen[463]. Jedes Fraktal leistet dabei Dienste und verfolgt damit ein bestimmtes Ziel, welches sich mit den Zielen anderer Fraktale in ein gemeinsames Zielsystem, den Unternehmenszielen, einfügt[464].

Das in dieser Arbeit dargestellte SCOR-Modell ist ein Beispiel für einen fraktalen Aufbau. Die Prozesse SOURCE-MAKE-DELIVER lassen sich auf eine Fabrik sowie auf Teile der Fabrik bis hinunter zur einzelnen Maschine aufgliedern. Auch eine Maschine hat danach eine Zufuhr (SOURCE), einen oder mehrere Produktions- oder Veredelungsschritte (MAKE) und liefert ein Produkt höherer Wertschöpfungsstufe an den Folgeprozess aus (DELIVER). Umgekehrt lassen sich Maschinen zu Fabriken aggregieren und Fabriken zu Versorgungsketten, die am Beispiel des SCOR-Modells stets die gleichen Eigenschaften in Bezug auf SOURCE-MAKE-DELIVER aufweisen.

Warnecke überträgt die Betrachtung von Fraktalen auf die industrielle Fertigung und beschreibt ihre Einheiten anhand eines fraktalen Aufbaus. Danach stellt letztlich jeder Arbeitsplatz ein Fraktal dar, welches durch in sich abgeschlossene Tätigkeiten, die in Autonomie (Selbstorganisation) ausgeführt werden können, charakterisiert ist[466]. Die Summe dieser Fraktale bildet letztlich die Fraktale Fabrik, welche wiederum mit anderen eng gekoppelten Unternehmen ein neues Fraktal bilden kann. Mit diesem Ansatz lassen sich komplexe Strukturen wie ein flexibles Fertigungssystem oder eine ganze Fabrik aufbauen, während die Betrachtung einzelner Einheiten oder Tätigkeiten eines Fraktals von dieser Komplexität befreit ist. Tätigkeiten und Abläufe innerhalb des Fraktals können dennoch sehr individuell ausfallen, sie unterliegen keinerlei Einschränkungen solange sie nach außen das Wesensmerkmal der Selbstähnlichkeit erfüllen[467].

Die Schnittmengen der Charaktereigenschaften des Modells der Fraktalen Fabrik mit den festgestellten Anforderungen aus der Industrie 4.0 (vgl. Kapitel 4)

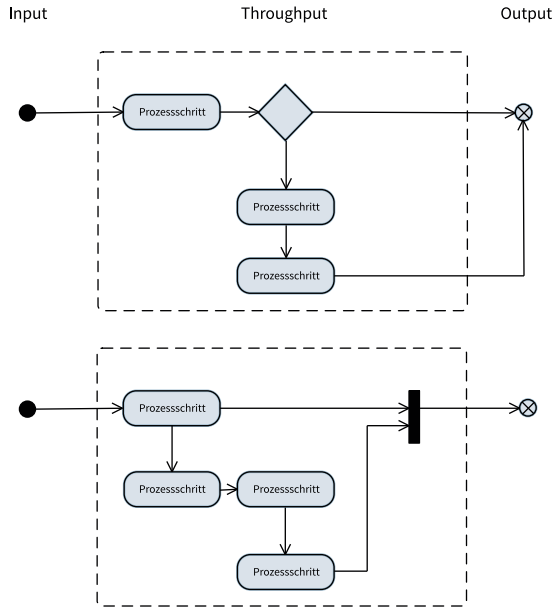


Abbildung 13: Selbstähnliche Fraktale[465]

sind dabei sehr groß. Damit erscheint der fraktale Ansatz als Basismodell für die Industrie 4.0 sehr gut geeignet[468]. So kann ein CPS als Fraktal definiert werden, CPPS wiederum als Fraktal mehrerer CPS usw. Die Zerlegung in Fraktale lässt sich in der vernetzten Fabrik bis auf die Feldebene herunterbrechen. Letztlich bilden die Aktoren einer Maschine ein beschreibbares Fraktal, das aus definierten Inputs (Signale, Steuerungsbefehle, identifizierbare Güter oder Behälter) definierbare Outputs erzeugt.

Im Szenario der Industrie 4.0 sind die Fabriken eines Verbundes nur lose miteinander verbunden und vernetzen sich ad-hoc und auftragsbezogen[469]. Mit dem Konzeptansatz der fraktalen Fabrik wird die Fabrik nun als fraktales System angesehen, in dem sich die einzigen Betriebseinheiten flexibel vernetzen können, um einen Auftrag (Zieldefinition) auszuführen. Basis hierfür ist eine Infrastruktur, welche die informatorische und physische Vernetzung der Systeme möglich macht, wie sie in CPPS bereits gegeben ist. Angewendet auf das Modell der Selbststeuerung (vgl. Abschnitt 3.5.2) organisieren sich dann die Auftragsfraktale ihren Weg durch die Fraktale der Fabrik[470]. Sie nutzen dabei die aus dem System abrufbaren Echtzeitdaten (Kapazitäten, Durchlaufzeiten etc.).

[462] In dieser Arbeit werden die Definitionen von *Warnecke* herangezogen. Vgl. Warnecke, 1992, S. 142.
Warnecke bezieht sich dabei auf die von *Benoît B. Mandelbrot* begründeten Definitionen von Fraktalen, welche sich ohne umfassende mathematische Kenntnisse nicht sofort erschließen. Die Definitionen von *Mandelbrot* sind zu finden in: Mandelbrot, 1987, S. 27f., S. 373f.
[463] Vgl. Warnecke, 1992, S. 142f.
[464] Vgl. Warnecke, 1992, S. 142f.
[465] ebenda, S. 145, Abbildung 56
[466] ebenda, S. 142ff.
[467] Vgl. Warnecke, 1992, S. 145
[468] Vgl. ten Hompel et al., 2014, S. 621f.
[469] Vgl. BMBF, 2012a, S. 21
[470] Vgl. Bauer et al., 2014, S. 9

5.1.3. Ansatz der fraktalen Selbststeuerung

Wenn Maschinen vollständig digital beschrieben sind, hiervon ist bei künftigen Maschinen, die bereits komplett digital konzeptioniert und geplant wurden, auszugehen[471] dann lassen sich diese Maschinen innerhalb der geographischen Gegebenheiten flexibel zu Produktionseinheiten kombinieren. Damit lassen sich Teilfertigungen auf einzelnen Maschinen bereits sehr präzise planen und organisieren. Sind darüber hinaus auch die relevanten Kenngrößen über die Strecken zwischen den Stationen bekannt (Transportzeit, Transportkosten, Ressourcenbelegung), lassen sich flexible Fertigungsstrukturen auch kalkulieren (vgl. Abschnitt 4.4.3). Die Wegstrecken zwischen allen Einheiten lassen sich in einer Transportmatrix abbilden und sind damit für die aus dem Operations Research bekannten Algorithmen nutzbar, um bspw. die schnellstmögliche oder die kostenoptimalste Route durch die Fertigung zu finden[472].

Der selbststeuernde Auftrag enthält dabei alle relevanten Informationen, wie dieser zu realisieren ist. Alle Fertigungsschritte sind dabei „maschinenneutral" beschrieben, d.h. die Art der Herstellung ist nicht explizit auf eine bestimmte Maschine hin beschrieben, sondern die Anforderungen, welche die Maschine erfüllen muss, sind in einer bestimmten Semantik definiert[473]. Anhand dieser Anforderungen kann ein Auftrag aus den zur Verfügung stehenden Maschinen, welche die benötigten Anforderungen erfüllen, auswählen. Neben den Zieleigenschaften des Produkts sind auch die Auftragsrahmendaten erforderlich, anhand derer die Selbststeuerung vorgenommen werden kann: Ecktermine und Budget. Für die Selbststeuerung sind dann die Entscheidungsgrößen Transportkosten und -zeit für die jeweilige Strecke erforderlich sowie die Zykluszeiten und Kosten der Maschine. Die Zeiten können im Idealfall aus der Wertstromanalyse gewonnen werden, die Kosten werden aus der Kosten- und Leistungsrechnung (vgl. Abschnitt 4.4.3) des Unternehmens ermittelt[474].

Die Auftragsrahmendaten werden für die Berechnung des Routings herangezogen, ebenso stellen sie die Alarmwerte da, bei deren Überschreiten (bereits in der Berechnung, nicht erst in der Ausführung) auf eine übergeordnete Instanz eskaliert wird. Ist ein Auftrag mit allen aktuell zur Verfügung stehenden Ressourcen und deren Belegung nicht innerhalb der Termine zu erreichen bzw. werden dabei die festgelegten Kosten (Budget) überschritten, können weitere vordefinierte autonome Entscheidungen vom System getroffen werden, oder die Entscheidung über den Verlauf des Auftrags wird außerhalb des Systems getroffen. Wichtig hierbei ist die Reduzierung der erforderlichen Parameter auf ein Minimum, da jede zusätzliche Kennzahl Rechenzeit und Speicherplatz benötigt und die Komplexität des Systems erhöht. Aus dieser Konstellation wird bereits ein Paradigmenwechsel zur klassischen Logistik ersichtlich. Der Weg des Produktes durch die Fertigung und Distribution ist nicht mehr vorweg bestimmt. Ebenso sind der exakte Fertigstellungstermin[475], sowie die exakten Kosten nicht determiniert. Sie bleiben lediglich unterhalb der kalkulierten Obergrenzen. Fehlerfrei durchlaufende, eingeschwungene Prozesse könnten also eine Dividende abwerfen, wenn sie günstiger produzieren als vorweg kalkuliert, gleiches gilt für Termine, wenn die Durchlaufzeiten unterhalb der vorweg bestimmten Termine liegen. Beide Größen werden im Durchlauf des (identifizierbaren) Auftrags durch das System an beliebigen Positionen erfassbar (sofern die notwendige Infrastruktur an Sensorik und Vernetzung vorliegt), sodass diese Informationen durch stetigen Soll-Ist-Abgleich in einem Regelkreis die Fertigungsprozesse optimieren. Ebenso lassen sich aus den Abweichungen Engpässe bzw. fragile Segmente eines Workflows erkennen und damit zielgerichteter beheben. Je feiner die Granularität eines Systems, desto besser lassen sich einzelne Teile daraus mit Blick auf das Gesamtziel optimieren[476]. Die Gesamtziele leiten sich dabei nach wie vor aus den Grundsätzen des Lean Managements ab: kurze Durchlaufzeiten zu minimalen Kosten bei konstanter Qualität.

5.1.4. Skalierung des Modells der fraktalen Fabrik

Gleichzeitig ist die auf der Fabrikebene angewendete Methodik auch auf übergeordneten Ebenen, z.B. im Zusammenspiel mehrerer Fertigungsstandorte oder im Produktionsverbund mehrerer Fabriken unterschiedlicher Firmen, nutzbar. Verlässt man die Maschinenebene auf die nächst höhere Ebene der Fabriken, so kann die Fabrik wiederum als ein-

[471] CAD-Daten, usw. des Anlagenherstellers werden mit den Betreibern der Maschinen geteilt und umgekehrt greifen die Hersteller auf die Betriebsdaten der Maschine beim Betreiber zurück.
[472] Vgl. Scholz-Reiter, 2005, S. 12f.
[473] Vgl. Abele et al., 2011, S. 132f.
[474] Dabei werden die Ist-Kosten der beanspruchten Infrastruktur als auch die Umlagekosten aus der betriebsinternen Verrechnung (z.B. aus der Kostenstellenrechnung) herangezogen. Damit ermitteln sich unterschiedliche Transportkosten je nach Transportmittel im Unternehmen, als auch unterschiedliche Maschinenstundensätze die bei der Nutzung durch den Auftrag anfallen.
[475] Zu den *„Unschärfen" d*er Determiniertheit von Terminen in der bisherigen Vorgehensweise: Vgl. ten Hompel, 2008, S. 106
[476] Auch hier optimieren wir nicht lokal, sondern mit Blick auf das Gesamtsystem, wenngleich die Gefahren der lokalen Optimierung durch den „Reichtum" an Informationen immer verführerischer wird.

zelnes Fraktal eines Gesamtsystems aus mehreren Fabriken betrachtet werden. Dabei sind auf dieser Ebene die Prozesse innerhalb der Fabrik nicht transparent, lediglich die Input-, Throughput- und Outputinformationen der Fabrik sind hier relevant. Nicht die Durchlaufzeit durch eine Maschine wird hierbei betrachtet, sondern die Durchlaufzeit durch eine Fabrik, welche durch Aufsummierung entlang der Verkettung von mehreren Fabriken zur Gesamtdurchlaufzeit des Auftrags in einer Supply Chain führt.

Eine Fabrik kann demnach auf dieser Ebene auch als Blackbox[477] gesehen werden, deren Schnittstellen klar definiert sind, jedoch nicht der Weg zwischen In- und Output. Erst beim Wechsel auf die darunter liegende Ebene (also in das Fraktal der Fabrik) werden die einzelnen Maschinen, ggfs. Maschinengruppen, wiederum selbst als Fraktale sichtbar (vgl. Abbildung 13). Mit diesem Ansatz lassen sich auch Fabriken in das Modell integrieren, deren Automatisierungsgrad noch nicht den Ansprüchen eines Industrie 4.0 –Modells entspricht. Unschärfen in der Erfassung (z.B. manuelle Rückmeldungen), den Fertigungsprozessen (manuelle Fertigungsabschnitte, ohne CPS), Medienbrüche an den Übergabepunkten zwischen Maschinen, MES und ERP sowie zwischen den einzelnen Softwaresystemen lassen sich dennoch in einem fraktalen Modell abbilden. Hierbei werden diese Fraktale als intransparent (Blackbox) dargestellt, lediglich die Rahmenparameter (z.B. Durchlaufzeiten, etc.) und eine Schnittstellenbeschreibung müssen bekannt sein. Ob der zur Umwandlung erforderliche Prozess (Throughput) ggfs. komplett manuell oder vollautomatisiert erfolgt, ist dabei unerheblich, solange die Prozessschwankungen (Varianz der Fertigungszeit des Fraktals) innerhalb definierter Grenzen verbleiben. Nach außen ist das Fraktal damit innerhalb der definierten Toleranzen berechen- und planbar. Vollautomatisierte Fraktale können damit mit „manuellen“ Fraktalen in einer Prozesskette stehen.

Dieser elementare Vorteil des Systemansatzes ermöglicht es überhaupt erst, einen Übergang in die nächste Evolutionsstufe der Industrialisierung zu gehen. Kein Unternehmen wird mit einem Schlag auf neue Fertigungstechniken nach aktuellstem technischen Stand umrüsten können (vgl. Abschnitt 3.5.2). Die Welt der eingesetzten Techniken und Gerätegenerationen wird also dauerhaft heterogen bleiben und Medienbrüche und unterschiedliche Standards werden sich nicht verhindern lassen. Zudem sind vollständig automatisierbare Strukturen aufwändig in der Realisierung und mitunter nicht zwangsläufig wirtschaftlicher, als manuelle oder halbautomatische Abläufe (vgl. Abschnitt 3.4.4). Teile der Fertigung könnten also auch in der Umgebung einer Industrie 4.0 manuell bleiben. Ein Modellansatz für die Industrie 4.0 sollte dies von Beginn an berücksichtigen. Eine heterogene Landschaft bedingt sogleich eine Vielzahl an unterschiedlichen Implementierungen, sodass der Vereinbarung von Industriestandards eine herausragende Bedeutung zukommt[478]. Einen „Weltstandard für Industrie 4.0“ wird es aber aller Voraussicht nach nie geben, dies wäre schon auf Grund der abzubildenden Vielfalt unterschiedlicher Fertigungsprozesse und der spezifischen Ansprüche mit der jeweiligen Komplexität kaum möglich. Darüber hinaus sind eigene Standards sowie bestimmte technische Implementierungen stets ein Mittel des Wettbewerbs[479], mit denen sich die Komponentenhersteller voneinander differenzieren. Fortwährende Innovationen führen als Drittes zu einem nicht endenden Standardisierungszyklus. Dennoch sind globale (Basis-)Standards erforderlich, um der Komplexität aus der Vernetzung zu begegnen. Analog zur Internettechnik, die auf wenigen globalen Standards basiert (z.B. TCP/IP-Protokoll, HTTP etc.), erfordert auch die Vernetzung der Produktionsverbünde bestimmte Standards zum Austausch von Informationen. Welche Standards dies im Detail sein werden, ist für die Betrachtung des hier darstellten Modells unerheblich.

Ausgehend von der beschriebenen nicht perfekten, heterogenen Systemumwelt ist sogenannte Middleware erforderlich, welche die uneinheitlichen Techniken an ihren Schnittstellen harmonisiert[480]. Bei der Modellbetrachtung kommen derartige Vermittler immer dann in Betracht, wenn Fraktale unterschiedlicher Eigentümer miteinander vernetzt werden sollen. Es wird hierbei unterstellt, dass Fraktale im Einflussbereich desselben Besitzers (z.B. innerhalb einer Fabrik) weitestgehend über abgestimmte Schnittstellen, also über eine durchgängige Integration, verfügen[481].

[477] Zum Begriff der Blackbox: Vgl. Ropohl, 2012, S. 56
[478] Vgl. Kagermann et al., 2013, S. 43
[479] Darüber hinaus besteht das Risiko, über den unternehmensübergreifenden Datenaustausch auch Einblick in sensible Geschäftsbereiche/-modelle zu geben. Ebenda, S. 65
[480] Zum Begriff der Middleware und der Anwendung: Vgl. Geisberger, 2012, S. 70ff., S. 223ff.
[481] Gerade in der Übergangsphase zur Nutzung von Techniken und Methoden der Industrie 4.0 wird dies vermutlich selbst in der einzelnen Fabrik noch nicht der Fall sein. Werden aber die Maschinen als Fraktale, die Fertigungslinien wiederum als übergeordnete Fraktale behandelt, lassen sich Middleware-Konzepte auch innerhalb einer Fabrik anwenden.

Der Konzeptansatz der fraktalen Fabrik bietet mit seiner Adaption auf die Industrie 4.0 die Möglichkeiten, diesen Herausforderungen zu begegnen. Dort, wo bereits eine vollständige, vertikale Integration erfolgt ist, kann dies mit sehr fein ausgebildeten Fraktalen dargestellt werden. Umgekehrt lassen sich Strukturen eingliedern, die noch nicht über CPS verfügen und damit in Bereichen intransparent bleiben. Eine Fabrik bleibt eine intransparentes Fraktal, welches erst mit Umstellung auf Cyber-physikalische Produktionssysteme in feinere Fraktale aufgegliedert werden kann. Der fraktale Ansatz unterstützt damit evolutionäre Anpassungsprozesse der Unternehmen.

Selbst in geschlossenen Systemen sind, auch nicht bei genauester Planung alle Störungen vorhersehbar. Es ist also sinnvoller, Störungen von Beginn an in einem konzeptionellen Ansatz mit einzuplanen und Strategien für den flexiblen Umgang mit Störereignissen vorzusehen. Dabei können Werkzeuge aus dem Qualitätsmanagement herangezogen werden, wie bspw. die FMEA[482], mit der eine umfangreiche, methodische Fehleranalyse durchgeführt werden kann. Aus der Risikoprioritätszahl (RPZ) jeder einzelnen Fehlerbetrachtung leiten sich dann die Fehlerbehandlungsmethoden ab. Für vollständig automatisierte und selbststeuernde Konzepte bedeutet dies für bestimmte RPZ eine automatische Fehlerbehandlung bzw. auch das Hinzuziehen von Hilfe außerhalb des Systems (also menschliches Handeln). Für Fehler mit sehr hoher Prioritätsziffer sollten umfangreiche Sicherheitsvorkehrungen z.B. auch in Form von Redundanzen getroffen werden[483].

5.1.5. Vorgehensweise zur Umstellung

Parallel zur Aufrüstung bzw. sukzessiven Umrüstung auf intelligente Fertigungssysteme sollte auch die Automatisierung und Flexibilisierung betrieben werden. Allein schon aus der Komplexität der Aufgabe für ein Produkt alle Fertigungsschritte zu automatisieren, empfiehlt sich ein schrittweises Vorgehen. Ausgangsbasis stellt auch hier ein schlankes Fertigungssystem dar, deren Prozesse also klar beschrieben und deren Gesamtablauf bereits nach den Grundsätzen des Lean Management organisiert sind. So können aus der Auswahl der Produktfamilien, für die jeweils ein Wertstrom entwickelt wurde, ebenso Produktfamilien für die Fertigung nach Industrie 4.0 abgeleitet werden.

Dabei ist der Technisierungsgrad des Produktionssystems und sein Vernetzungsgrad zunächst unerheblich. Viel bedeutender sind die aus den Wertstromanalysen bzw. dem Wertstromdesign gewonnenen Erkenntnisse über die Eigenschaften und Beschaffenheit der betriebseigenen Prozesse. Sind diese durch mehrere Verbesserungszyklen[484] schon auf einem hohen Optimierungslevel, so kann die Anknüpfung an technische Unterstützung vorgenommen werden. In Abschnitt 4.2.2 wurde bereits beschrieben, dass sich auch ältere Maschinengenerationen mittels Nachrüstung in ein Netzwerk einbringen lassen, um Steuerungseinstellungen nicht am Bedienterminal, sondern zentral an einem Rechner vornehmen zu können. Gleiches gilt für die klassische Auftragstasche, welche gerade in kleinen und mittelständischen Betrieben das Produkt durch die ganze Fertigungskette begleitet und meist alle relevanten Informationen für die jeweiligen Bearbeitungsstufen enthält. Hier könnte der nächste Schritt hin zu einer Digitalisierung dieser Auftragsinformationen liegen, welche dann jeweils an der Arbeitsstation abgerufen werden können, ggfs. erweitert um graphische und animierte Darstellungen etc. Darüber hinaus lassen sich die Werkstücke, Halbzeuge etc. über Identifikationsmethoden (z.B. RFID) automatisch beim Durchlauf durch den Fertigungsprozess identifizieren und mit der jeweils erforderlichen Auftragsinformation aus einer übergeordneten Softwareebene kombinieren. Eine durchgängige Infrastruktur von Messpunkten ist hierfür einzurichten und diese mit den übrigen Systemen (CPS) zu vernetzen. Damit kann sich das Werkstück automatisch beim Eintreffen an der Arbeitsstation identifizieren und die Maschine dazu veranlassen, die für die Bearbeitung erforderlichen Parameter aus dem System abzurufen.

Dabei empfiehlt es sich, an der Stelle der Produktion anzusetzen, die bereits in der Wertstromanalyse als Engpass erkannt wurde. Verbesserungen an dieser Stelle haben sofortige Auswirkungen auf das Gesamtsystem. Erst wenn eine automatisierbare Infrastruktur implementiert ist und beschreibbare Abläufe vorliegen, sollte im nächsten Schritt die Anbindung in Software erfolgen.

---

482 Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse. Vgl. Brunner et al., 2008, S. 125ff.

483 Die FMEA bewertet auch das Risiko, dass ein Fehler nicht erkannt wird. Dies lässt sich auch auf die Selbstdiagnose von CPS übertragen. Fehlern, die nicht erkannt werden können und zugleich enorme Schadensauswirkungen haben können, muss durch redundante Systeme begegnet werden.

484 Bspw. mit Qualitätsverbesserungsstrategien wie PDCA und KVP. Vgl. Brunner et al., 2008, S. 258f., S. 263f.

Zusammengefasst lässt sich fraktale Ansatz für Industrie 4.0 wie folgt beschreiben:

- Die Fabrik ist nach Grundsätzen des Lean Managements organisiert.
- Alle noch nicht automatisierbaren Bereiche werden mit „Intelligenz“ ausgestattet, sodass sie auf höheren Ebenen sichtbar werden (v.a. vernetzte Sensorik und Aktorik).
- Automatisierbare Tätigkeiten und beherrschbare Prozesse[485] werden automatisiert, in Algorithmen beschrieben und kontinuierlich in Regelkreisen[486] weiter optimiert.
- Herstellung einer unterbrechungsfreien vertikalen Integration der Ebenen. Die Maschine wird über SPS[487] gesteuert, die SPS lässt sich aus einer übergeordneten Software erzeugen und ohne Eingriff an der Maschine aus der Ferne einspielen (kommunikationstechnische Integration).
- Derartige intelligente Maschinen werden untereinander vernetzt, die Steuerung und Programmierung dieser Maschinen wiederum in einer Softwareumgebung zusammengefasst (virtuelle Integration).
- Maschinen werden in Simulationsumgebungen abgebildet, diese Modelle werden sukzessive verfeinert. Bei Neuanschaffungen können diese Daten ggfs. bereits vom Hersteller bereitgestellt werden. Die Simulationsmodelle werden mit Echtzeitdaten aus der Fertigung betrieben. Optimierungen werden zunächst vollständig in der Simulationsumgebung entwickelt, ohne dass reale Maschinen hierfür bereitgestellt werden müssen. Aus der Simulation entwickelte Verbesserungen werden nach Fertigstellung in die Maschinen eingespielt.
- Aus den logischen oder physischen Fertigungseinheiten werden die Prozessdaten systematisch erfasst, gespeichert und mittels Data-Mining-Methoden fortlaufend untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden zum einen die Basis für die Automatisierung bislang halbautomatischer oder manueller Prozesse, zum anderen liefern sie die Datenbasis für weitere Optimierungen der bestehenden Prozesse (bspw. in Simulationsmodellen).
- Die fortlaufend anfallenden Daten werden zentral gespeichert und sind auf allen Ebenen des Unternehmens bzw. dem Unternehmensverbund zugänglich[488].

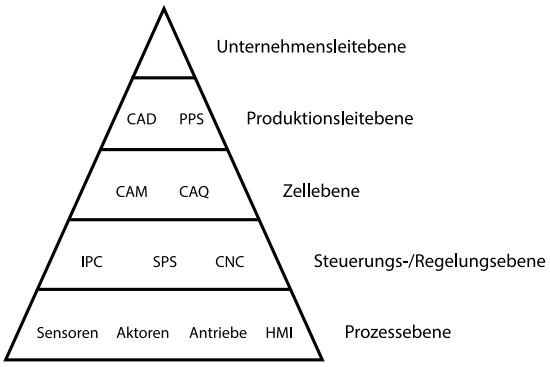
5.2. Paradigma der Logistik 4.0

Die Logistik bleibt in einem fraktalen Modell der Industrie 4.0 die Kernfunktion zur Koordination, Planung und Lenkung der Flüsse in Unternehmen und ihren Netzwerken. Die Logistik 4.0 entwirft das Zielsystem für sich selbststeuernde Fraktale und sorgt für deren Vernetzung in virtueller wie physischer Ebene.

Aufgabe der Logistik ist es, Infrastrukturen für die erfolgreiche Anwendung von Selbststeuerungsparadigma und dezentralen Produktionskonzepten für alle Bereiche der Wertschöpfungskette zu schaffen. Als Querschnittsfunktion bringt die Logistik bereits die hierfür benötigte interdisziplinäre Grundstrategie mit. Die in der unternehmerischen Praxis genutzten Konzepte und Werkzeuge können hierzu gezielt weiterentwickelt werden, wie dies anhand des Lean Managements und dem Werkzeug der Wertstromanalyse beschrieben wurde.

Mit voranschreitender Automatisierung und Computerisierung in allen Ebenen der Wertschöpfungskette werden unterschiedliche Geschwindigkeiten in der Zielerreichung aber auch konkrete technische oder wirtschaftliche Schwierigkeiten zu unterschiedlichen Reifegraden der Durchsetzung von Industrie 4.0 führen. Ziel der Logistik 4.0 ist es daher, die „Inseln“ der Automatisierung zu vernetzen und Bereiche mit manuellen Fertigungsanteilen bzw. teilautomatisierten Prozessen in diesen Wertstrom einzubinden. Die Logistik 4.0 ist das Betriebssystem der Industrie 4.0.

[485] Ein Prozess ist dann beherrschbar, wenn er einen rein stochastischen Verlauf aufweist. Vgl. Brunner et al., 2008, S. 189f.
[486] Im Sinne des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP). Ebenda, S. 263f.
[487] Speicherprogrammierbare Steuerung
[488] Zugänglich im Sinne von erreichbar, z.B. gespeichert in einer Cloud und zugänglich über Internettechnologien.



CAD: Computer Aided Design
PPS: Produktionsplanung und -steuerung
CAM: Computer Aided Manufacturing
CAQ: Computer Aided Quality
IPC: Industrie-PC
SPS: Speicherprogrammierbare Steuerung
CNC: Computer Numerical Control
HMI: Human-Machine Interface

Abbildung 14: Topologie der Automatisierung[492]

5.3. Anwendungsbeispiel

5.3.1. Ansatz von Siemens mit dem TIA-Portal

Der Siemenskonzern gilt als einer der Marktführer im Bereich der Automationstechnik[489]. Der Konzern bietet für alle Anwendungsbereiche der Automatisierung. Beginnend bei Aktorik und Sensorik bis hin zur PLM-Software[490] eigene Lösungen an, die aufeinander abgestimmt der Modellvorstellung der smarten Fabrik (vgl. Abschnitt 3.4.4) folgen. Die Umsetzung einer Automatisierungsstrategie, also einer durchgehenden vertikalen Integration lässt sich anhand dieser Produkte gut darstellen. Es soll an dieser Stelle keine Bewertung der Produkte erfolgen, ebenso ist die Darstellung auch nicht als Produktempfehlung zu werten. Die folgende Beispieldarstellung dient lediglich der Verdeutlichung der Automatisierungsmöglichkeiten im Themenumfeld der Industrie 4.0 anhand konkreter am Markt erhältlicher Produkte[491].

Der Topologieaufbau der Siemens-Produkte folgt dabei der bereits in Abschnitt 4.4.1 dargestellten Automatisierungspyramide.

Zentrales Element der Automatisierung ist die Steuerung (CPU) welche die Programmbausteine für die jeweiligen Arbeitsschritte ausführt und in Steuerungsbefehle für die einzelnen Feldgeräte (Sensoren und Aktoren) übersetzt. Bei großen Anlagen mit weitverzweigter Vernetzung werden sogenannte dezentrale Peripheriegeräte eingesetzt, welche lediglich über LAN mit der Steuerung verbunden werden müssen und dann lokal die Verteilung der Steuerbefehle und die Aufnahme der Messwerte durchführen. Messwerte von Sensoren (z.B. Lichtschranken, Taster, etc.) und Steuerungsbefehle an Aktoren (z.B. Ventile, Motoren, etc.) werden über Ein-/Ausgabegeräte (IO-Geräte/-Module) vom Feldgerät abgefragt bzw. übermittelt. Bei Betrachtung der Topologie ergibt sich dann meist eine hohe Anzahl an Feldgeräten, die über IO-Module an dezentralen Peripheriegeräten angeschlossen sind, welche wiederum von einer Steuerung bedient werden (siehe Abbildung 15).

Die Administration der Anlage, sowie die Programmierung geschehen über einen Industrie-PC, der ebenfalls im Netzwerk (LAN) angebunden ist und über eine entsprechende Software verfügt. Bei ak-

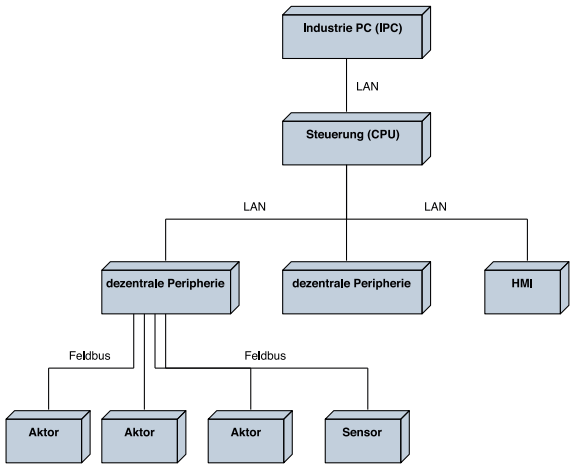


Abbildung 15: Beispielhafte Darstellung der Komponenten der Automatisierungstechnik

489 Nach eigener Aussage der Siemens AG: vgl. SIEMENS AG, 2013c
490 Vgl. SIEMENS AG, 2010, S. 14f.
491 Es ist davon auszugehen, dass sich Lösungen anderer Anbieter an den Produkten der Marktführer orientieren bzw. Kompatibilitäten zu diesen aufweisen. Dies war jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit.
492 Grafische Darstellung angelehnt an: SPS-Magazin, 2011

tuellen Umsetzungen wie dem TIA-Portal[493] können alle Geräte im Netzwerk erkannt und bis hin zu den Anschlüssen des Feldgerätes am Modul des Peripheriegerätes geprüft werden. In der Software werden auch die PLC[494]-Bausteine (SPS-Programme) verwaltet, die in gängigen Programmiersprachen (z.B. KOP, FUP, AWL[495]) editiert werden können[496]. Zudem existieren ergänzende Lösungen für den Einsatz von skriptorientieren Hochsprachen (in der Programmierumgebung STEP 7[497]). Geänderte Programme werden von der Software „übersetzt" (kompiliert) und können anschließend auf die entsprechende Steuerung überspielt werden. Im Normalfall müssen hierfür an der Maschine selbst keinerlei Veränderungen vorgenommen werden, wie dies in Zeiten fester Verdrahtung bzw. vor der Vernetzung der Komponenten noch notwendig war[22]. Mit der Software TIA-Portal verfolgt Siemens das Ziel, die unterschiedlichen Programmumgebungen HMI (Gestaltung und Projektierung von Bedienoberflächen), SPS-Programmierung (Programmierung von Steuerungsabläufen) und Diagnose/Projektierung[498] unter einer Oberfläche zusammenzuführen[499].

Die Vernetzung der Komponenten bis zur Feldebene erfolgt mit dem auf TCP/IP-basierendem Netzwerkprotokoll Profinet. Die Feldgeräte selbst sind über den sogenannten Feldbus mit den IO-Modulen bzw. der dezentralen Peripherie verbunden[500].

Über die zentrale Administration am PC werden auch die sogenannten HMI-Geräte[501] eingerichtet. Sie dienen als Schnittstelle zum Menschen (Bedienpersonal der Maschinen) und machen auf einfache Weise die Funktionen der Maschine verfügbar und stellen die fortlaufend erfassten Messwerte und ggfs. Fehlermeldungen dar. Viele dieser Geräte sind bereits mit berührungssensitiven Farbdisplays ausgestattet, sodass sich ein großer Spielraum und Flexibilität bei der Gestaltung der Bedienoberfläche und Darstellung von Fehlermeldungen, der Visualisierung von Abläufen (Animationen) etc. ergibt. So können Bedienelemente graphisch gestaltet und mit den Funktionen der Maschine belegt werden.

Dabei sind alle Funktionsbausteine und Konfigurationen der Komponenten über die TIA-Software in Bibliotheken speicherbar. Die Übertragung auf neue Komponenten (z.B. beim Wechsel der Steuerung) ist damit innerhalb kürzester Zeit durch erneutes Aufspielen der Programme und Parameter zu bewerkstelligen. Darüber hinaus lassen sich die Einstellungen somit auch auf weitere Maschinen (ggfs. in anderen Werken) übertragen. Durch umfangreiche Simulationswerkzeuge können die Veränderungen an der Konfiguration zunächst offline getestet werden und um Fehler bereinigt werden. Hierbei werden von der Software sowohl die Steuerungselemente, Aktoren und Sensoren simuliert, als auch die Visualisierung auf den HMI-Geräten. Erst nach dem Testdurchgang werden die Einstellungen auf die tatsächlich vorhandene Hardware überspielt.

Damit ist zum einen aufgezeigt, dass die vertikale Vernetzung von der Feld- bis zur Planungsebene mit den heutigen technischen Werkzeugen und Produkten am Markt bereits möglich ist. Die dezentrale Projektierung von Steuerungseinrichtungen, das flexible Vernetzen von Komponenten über Netzwerkprotokolle wie Profinet sowie die digitale Speicherung von Konfigurationen und Parametern bilden die Infrastruktur auf der Industrie 4.0 aufbauen kann. Mittels einer geeigneten Software lassen sich somit für eine Maschine verschiedene Konfigurationen als Set speichern und je nach aktueller Produktionsanforderung auf die Maschine (bzw. in deren Steuerung) überspielen. Damit ist eine sehr hohe Flexibilität der Fertigungseinheit erreicht, die lediglich durch ihre physischen Möglichkeiten begrenzt wird.

5.3.2. Automatisierungsaufgabe am Beispiel einer Farbmischanlage

Das folgende Beispiel ist dem Siemens-Handbuch zur Installation und Inbetriebnahme einer automatisierten Steuerung (S7-1500) entnommen[502] und soll der Veranschaulichung dienen. Aufbauend auf dem Beispiel werden im Anschluss die logistischen Fragestellungen am Beispiel erläutert.

493 Totally Integrated Automation Portal. Vgl. SIEMENS AG, 2013b
494 Die Bezeichnung Programmable Language Controller (PLM) entspricht dem im Deutschen verwendeten Begriff SPS (speicherprogrammierbare Steuerung).
495 Anweisungsliste (AWL), Funktionsplan (FUP) und Kontaktplan (KOP), vgl. Kief et al., 2013, S. 150f.
496 Vgl. SIEMENS AG, 2013b, S. 3
497 Vgl. SIEMENS AG, 2014b
498 Projektierung wird in diesem Zusammenhang verstanden als das Planen, Zusammenstellen und Verknüpfen von technischen Komponenten zu einem Gesamtkonstrukt, das einem bestimmten Zweck dient. Beispiel: Zusammenstellen der Hardwarekomponenten, deren Vernetzung und Programmierung zum Betrieb einer Maschine (z.B. Farbmischanlage).
499 Vgl. SIEMENS AG, 2013b, S. 2ff.
500 Vertiefende Informationen zu Profinet und Feldbussystemen in: Kief et al., 2013, S. 70
501 Human Machine Interface. Beispiele: Vgl. SIEMENS AG, 2014c
502 Vgl. SIEMENS AG, 2013d, S. 7ff.

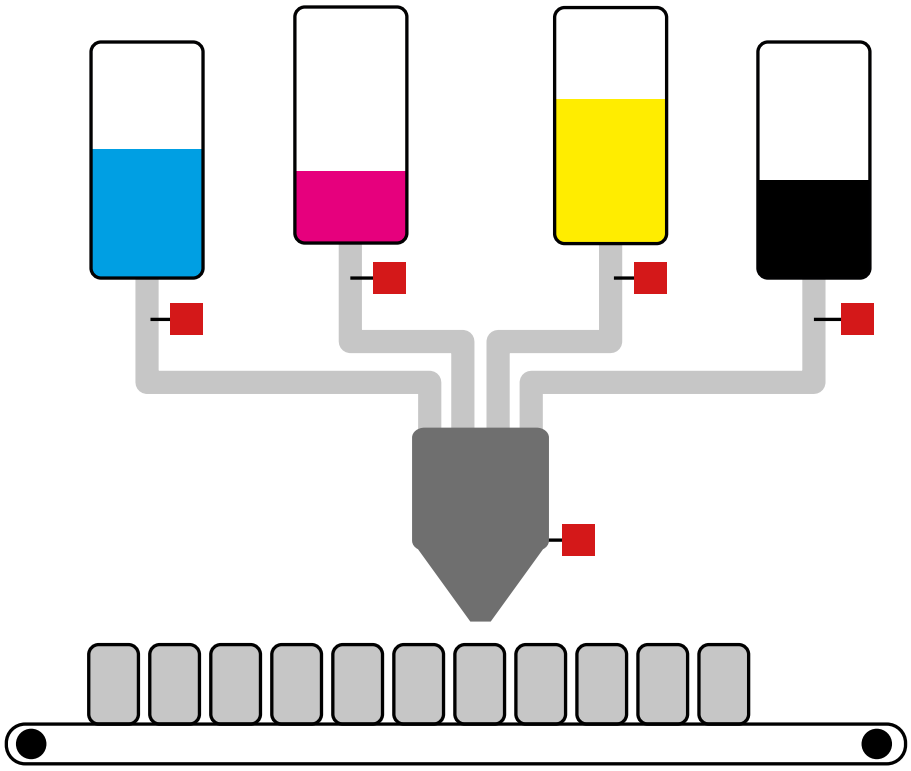


Abbildung 16: Modell der Farbmischanlage[503]

Es handelt sich um eine Farbmischanlage, bei der aus den vier Grundfarben Cyan, Magenta, Gelb und Schwarz beliebige, per Rezeptur hinterlegte Farben gemischt werden können. Die Anlage besteht aus vier Tanks für die Grundfarben, die über Ventile mit dem Farbmixer verbunden sind. Über die Steuerung der Ventile werden die Farbanteile entsprechend der Rezeptur in den Mixer gegeben und anschließend in eine Dose abgefüllt. Die Zuführung und der Abtransport der Dosen erfolgt durch ein Förderband (Abbildung 16).

Alle Aktoren (Ventile, Mixer, Förderband) sind über die zentrale Steuerungseinheit (CPU) gemäß der weiter oben erläuterten Topologie (siehe Abbildung 15) vernetzt, einzeln ansteuerbar und können über die Software TIA-Portal administriert und konfiguriert werden.

Die Fähigkeiten zur Automatisierung einer derartigen Anlage und die Zusammenführung aller administrativen Tätigkeiten in einer Software wurden bereits als Bestandteil der vertikalen Integration beschrieben und sollen hier nicht weiter vertieft werden[504]. Anhand der in Abschnitt 3.4.3 gefundenen Definition für CPS lässt sich die automatisierte Farbmischanlage als einfaches Beispiel für ein Cyber-Physikalisches System begreifen.

5.3.3. Betrachtung des Beispiels aus logistischer Sicht

Aufgabe der innerbetrieblichen Logistik (Intralogistik) ist nach wie vor die pünktliche Bereitstellung der benötigten Materialien, Roh- und Hilfsstoffe an der Maschine, sowie die Organisation des Materialflusses durch den Wertstrom (vgl. Abschnitt 4.2). Anhand des Beispiels bedeutet dies die Zuführung neuer Dosen für die Abfüllung, die Zuführung von Rohstoffen (hier die Grundfarben für die Mischung), sowie der Transport der abgefüllten Dosen zur Folgestation bzw. bis zur Senke des Fertigungsflusses (Auslieferung, Versand, etc.). Die Beschaffung ermittelt anhand der Verbrauchsdaten, der Verkaufsprognose und des Fertigungsprogramms den Bedarf. So müssen entsprechende Rohstoffe, wie z.B. die Grundfarben und Dosen rechtzeitig beschafft werden. Eine nach den Grundsätzen des Lean Managements organisierte Fertigung wird dabei darauf ausgerichtet sein, die eigenen Bestände, also das Eingangslager sowie die Umlaufbestände (Warteschlange vor der Maschine, bzw. auf Transportwegen) und das Fertigwarenlager möglichst gering zu halten. Aus den Bestellungen bzw. den Bestellverläufen wird nach klassischer Vorgehensweise eine Prognoserechnung und daraus ein Produktionsprogramm ermittelt[505]. Mit den Werkzeu-

503 ebenda, S. 7
504 Zur ausführlichen Vorstellung der Automatisierungsaufgabe mit Unterlagen und Videos: Vgl. SIEMENS AG, 2014d
505 Vgl. Hackstein, 1989, S. 9ff.

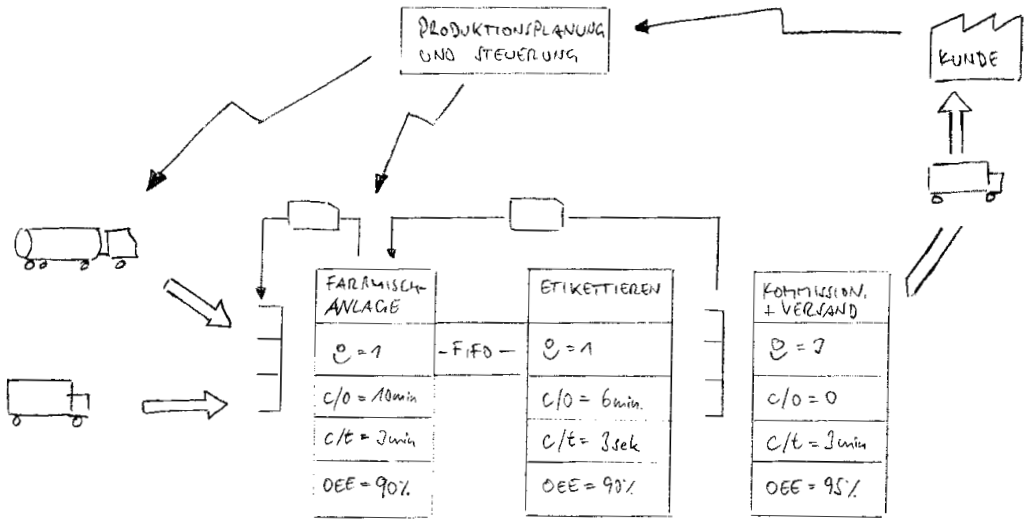


Abbildung 17: Darstellung der Farbmischanlage im Wertstrom[506]

gen des Lean Managements wird dann eine bedarfsgerechte Anlieferung Just-in-Time angestrebt, Rohstoffe und benötigte Materialien wie Farbe und Dosen treffen also termingerecht in exakt der benötigten Menge an der Maschine ein.

Zur vereinfachten Darstellung soll im Folgenden davon ausgegangen werden, dass es sich bei dem beispielhaft dargestellten Betrieb um eine Fabrik mit einer Farbmischanlage handelt. Der Produktionsablauf ist damit sehr übersichtlich und die Logistikfunktionen im Zusammenspiel mit einem automatisierten Produktionssystem lassen sich daran exemplarisch gut darstellen.

Der Farbmischbetrieb wird täglich mit Dosen beliefert, die angelieferte Menge entspricht dem Tagesdurchsatz der Farbmischanlage zzgl. eines Sicherheitsbestandes. Die Grundfarben werden von einem zweiten Zulieferer geliefert. Dieser liefert wöchentlich die benötigte Farbmenge, d.h. er füllt die Vorratstanks der Farbmischanlage wieder auf. Da die Dosen neutral angeliefert werden, müssen diese nach der Abfüllung noch etikettiert werden. Die Klebetiketten werden als Rollenware wöchentlich geliefert, sodass das Magazin des Druckers für den Wochenbedarf zzgl. eines Sicherheitsbestandes befüllt ist. Die Etiketten werden im Digitaldruckverfahren mit dem jeweiligen Farbwert und weiteren Herstellerangaben gedruckt und automatisiert auf die Dosen aufgebracht. Zur Vereinfachung sind hier die Wertströme zur Versorgung der Etikettiermaschine und der Verpackungsstation nicht betrachtet.

Als weitere Vereinfachung unterstellen wir eine einheitliche Dosengröße, sodass es lediglich einer Dosensorte und -größe bedarf. Damit entfallen die sonst vorzunehmenden Unterteilungen in Produktfamilien bzw. die Beachtung unterschiedlicher Zykluszeiten der Dosengrößen in der Fertigung.

Im Anschluss an die Etikettierung werden die Dosen je nach Bestellmenge zu Gebinden verpackt (kommissioniert) und für den Versand bereitgestellt. Die Auslieferung an den Handel und Großabnehmer erfolgt durch spezialisierte Logistikpartner und wird nicht von dem Farbenhersteller selbst ausgeführt. In der Betrachtung des Wertstroms der Fabrik stellt die Senke damit bereits die Rampe der eigenen Fertigung dar. Sobald die Farbdosen verladen sind und das Betriebsgelände verlassen haben, endet zunächst die Betrachtung des Wertstroms.

Aus den Bestellungen, der Vorausschau der Bestellungen bzw. Prognosen ergibt sich ein künftiger Bedarf, der wiederum in die Produktionsplanung einfließt. Die Abnahmemenge und -frequenz definiert den Kundentakt[507] nach dem wiederum im Idealfall des Lean Managements gefertigt wird. Entsprechend der Aufträge und Termine wird vom der Produktionsplanung und -steuerung ein Programm berechnet, welches nach den Maßstäben der Produktionsnivellierung[508] in die Fertigung eingelastet wird.

506 Anmerkung zur Darstellung: Ein Wertstrom wird immer von Hand und mit Bleistift gezeichnet. Vgl. Rother et al., 2004, S. 13

507 Der Kundentakt ist der Zielwert für die Produktion, alle Einheiten werden hierauf ausgerichtet; es darf nicht zu wenig, aber zur Bestandsvermeidung auch nicht zu viel produziert werden. Detaillierte Ausführungen: Vgl. Rother et al., 2004, S. 40ff.

508 Fertigung in kleinen Losgrößen in einem Produktionsmix zur Vermeidung langer Durchlaufzeiten. Detaillierte Ausführungen: Ebenda, S. 46ff.

5.3.4. Fertigungsbeispiel nach Industrie 4.0

Im Kontext der Industrie 4.0 stellt das dargestellte Beispiel noch keine Besonderheit dar. Wie bereits weiter oben beschrieben, findet Automatisierung bereits seit den 1970er Jahren breite Anwendung in der Industrie und ist durch die Evolution der Technik stetig verbessert worden (vgl. Abschnitt 4.2.2).

Im Folgenden soll das verwendete Beispiel der Farbmischanlage in den Kontext der Industrie 4.0 eingeordnet werden. An der technischen Ausstattung der Farbmischanlage sind keine Änderungen erforderlich. Diese ist bereits automatisiert und mit intelligenter Steuerungstechnik schon auf dem technischen Niveau angekommen, an dem Veränderungen der Industrie 4.0 ansetzen. Die Farbmischanlage stellt bereits ein CPS dar, welches flexibel auf die jeweiligen Produktionsbedingungen (hier: wechselnde Farbmischungen) eingestellt werden kann. Im Grenzfall ist die Fertigung in Losgröße 1 möglich, wenn nach jedem Abfüllvorgang eine neue Rezeptur in die Steuerung geladen wird. Dies könnte manuell über ein HMI geschehen, wäre aber durch die Vernetzung der Systeme auch direkt aus einer übergeordneten Software zu bewerkstelligen.

In der konventionellen Logistik existiert in der Massenfertigung ein anonymer Materialfluss, in dem sich Güter bereits in Antizipation eines künftigen Auftrags im Fertigungsprozess befinden[509]. Mit den Werkzeugen der aktuellen Identifikationstechnik wie bspw. RFID lassen sich die einzelne Elemente im Materialfluss eindeutig erkennen und jederzeit mit individuellen Informationen verknüpfen[510]. Am Beispiel der Farbmischanlage bedeutet dies, dass ein RFID-Tag auf der Dose bereits beim Dosenhersteller oder erst unmittelbar vor dem Abfüllen mit den Auftragsdaten und der Rezeptur beschrieben werden kann. Die Farbdose ist ab diesem Zeitpunkt individualisiert[511]. Diese Individualisierung erfolgt im Idealfall erst kurz vor der ersten auftragsbezogenen Handlung (hier: das Abfüllen der Farbmischung), sodass die Reihenfolge der Aufträge noch kurzfristig geändert werden kann. Am Beispiel bedeutet dies einen anonymen Materialfluss der Dosen bis zur Warteschlange der Farbmischanlage, dann werden die aktuellen Aufträge aus der nach Prioritäten sortierten Auftragsliste auf die Dosen verteilt (Beschreiben der RFID). Anders als in einem konventionellem Materialfluss ließe sich ein RFID-Etikett auch später noch mit neuen Inhalten überschreiben.

Damit lässt sich die Produktionsreihenfolge ohne physischen Eingriff (Ändern der Dosenreihenfolge auf dem Fördersystem, etc.) bis unmittelbar vor der Befüllung noch ändern, z.B. bei folgenden Ereignissen:

- Ein eiliger Auftrag muss vorgezogen werden: Die Dosen vor der Abfüllung werden mit den Daten des eiligen Auftrags überschrieben.
- Ein Ventil an der Anlage ist defekt und bestimmte Farbwerte können bis zur Behebung nicht abgefüllt werden: Alle Aufträge werden automatisch vorgezogen, die noch abgefüllt werden können.

Die Rezepturdaten werden dann durch die Farbmischanlage vom RFID-Tag der Dose ausgelesen und für die Konfiguration des Farbmischvorganges genutzt. Ab dem Zeitpunkt der Verknüpfung des Tags mit einem konkreten Kundenauftrag besteht im System eine Verknüpfung zwischen der Dose und dem kompletten Datensatz. Ist die Dose eindeutig identifizierbar, kann sie im Anschluss an den Abfüllvorgang beim Durchfahren eines Lesegerätes Aktionen im System auslösen:

- Intelligente Dose: Füll mich mit den Farbwerten: 0/100/100/0 (Rot).
- Intelligente Dose: Ich gehöre zum Auftrag: Nr. 1235 und muss zusammen mit Dose 0815 und 4711 verpackt werden
- Rückmeldungen in ein ERP-System (abgefüllt, verpackt etc.).
- Intelligente Dose: Etikettier mich mit dem (für Menschen lesebaren) Label zum Auftrag Nr. 1235.

Mit der Individualisierung des Materialflusses kann auf die bislang praktizierte Produktionsplanung (deterministisch) ab dem Zeitpunkt der Individualisierung verzichtet werden. Die Dosen bzw. die Aufträge steuern sich selbst durch die Produktion: Die „smarte Farbdose“ instruiert nicht nur die Farbmisch- und Etikettiermaschine, sondern reserviert sich anschließend Bearbeitungszeit in der Kommission und bucht sich ggfs. einen Platz auf einem Transportmittel.

Auf Basis dieser Konstellation ist eine Erweiterung hin zur kundenindividuellen Massenfertigung (Mass Customization) bereits mit angelegt. Der beschriebene Ansatz ist für die Massenfertigung in

[509] Vgl. Schuh et al., 2012, S. 39ff.
[510] Vgl. Scholz-Reiter, 2014, S. 70f.
[511] Häufig wird dies auch als der Kundenentkopplungspunkt bezeichnet. Die Fertigung verläuft ab diesem Zeitpunkt auftragsbezogen, nach dem make-to-order-Prinzip. Vgl. Schuh et al., 2012, S. 88ff.

Losen als auch für die Fertigung von Einzelstücken (Losgröße 1) geeignet.

So wäre folgendes Szenario denkbar: Auf der Bestellplattform (E-Shop) des Farbmischbetriebs können Kunden sich ihre Farbwerte selbst einstellen, das System berechnet anhand der hinterlegten Prozessparameter den Preis und kann in Rückkopplung mit dem Produktionssystem auch die aktuellen Lieferzeiten (= Gesamtdurchlaufzeit bei aktueller Auslastung der Kapazitäten + Versandlaufzeit) angeben. Kundenbestellungen fließen wiederum unmittelbar nach Bestätigung der Bestellung auf der Online-Plattform in den Produktionsablauf mit ein. Auf diese Weise lassen sich kurzfristige Bestellungen noch durch automatische Reihenfolgeänderung der Aufträge in die Fertigung einlasten und tragen zu einer besseren Auslastung der Kapazitäten bei. Voraussetzung hierfür ist der Austausch von CPS-basierter Fertigung mit einer Planungsebene (z.B. ERP) und einer entsprechenden Portalseite (Webshop, Procurement-Plattform) in Echtzeit.

Für die Organisation der Beschaffung stellt sich das Szenario mit cyber-physikalischen Systemen ebenfalls verändert dar. Über die Sensorik der Farbmischanlage wird der Füllstand der Farbtanks bspw. von einem ERP-System erfasst und ggfs. mit der im System verfügbaren Auftragsliste abgeglichen. Anhand hinterlegter Sicherheitsbestände und berechneter Verbrauchsmengen könnte dann automatisch eine Bestellung beim Zulieferer ausgelöst werden (vgl. hierzu Abschnitt 4.2.3). Es würden dann nicht alle Farben in den Tanks aufgefüllt werden, wenn keine Aufträge hierfür vorliegen und der Sicherheitsbestand noch nicht erreicht ist. Gleiches gilt für die Zuführung mit Dosen, der Lager- und Umlaufbestand ist jederzeit über die RFID-Tags der Dosen zu ermitteln und durch die Individualisierung ist der jeweilige Auftrag bzw. die dazu gehörigen Dosen in der Fertigung lokalisierbar.

Ein derart installierter Datenerfassungszyklus ermöglicht zudem die kontinuierliche Verbesserung des Herstellungsprozesses. Aus der Individualisierung des Gutes lässt sich die jeweilige Durchlaufzeit an der Maschine oder im Gesamtprozess ermitteln. Ferner sind die Zykluszeiten der Maschinen, die Rüstzeiten, als auch die Wege durch die Fertigung jederzeit darstellbar und für Auswertungen bzw. Nutzung in Simulationsmodellen nutzbar. Sollte es also Zeitunterschiede zwischen verschiedenen Farbmischungen geben, werden diese sichtbar und können im System zur Rezeptur hinterlegt werden.

Die gravierendsten Vorteile einer CPS-Farbmischanlage lassen sich aber erst bei Betrachtung der Fabrik im Verbund mit anderen Unternehmen erkennen. Da auf Basis der Echtzeitdaten freie Kapazitäten sichtbar werden, können diese Informationen einem zweiten Werk zugänglich gemacht werden und dort kann mit diesen Kapazitäten geplant werden. Ein Auftrag würde demnach auf mehrere Standorte verteilt werden, wenn die Kapazität in einem Werk nicht mehr ausreicht. Zudem können die Transportkosten und ggfs. Laufzeiten in die Auftragsplanung einbezogen werden. Anhand der Lieferadressen wird dann automatisch das Werk für den Auftrag ausgewählt, dessen Transportkosten zur Lieferadresse am günstigsten sind (konstante Fertigungskosten in beiden Werken vorausgesetzt). Damit ließe sich „near-shoring“ mit global vernetzter Produktion umsetzen.

6. Schlussbetrachtung und Diskussion

Die Notwendigkeit von Veränderungen in der Logistik konnten im Rahmen dieser Arbeit aufgezeigt werden. Die wesentliche Erkenntnis aus dem vorangegangenen Kapitel 5 ist, dass die Techniken, welche für die Vision der Industrie 4.0 benötigt werden, bereits am Markt erhältlich sind. Überlegungen zur Umsetzung einer Industrie 4.0 müssen daher nicht im theoretischen Raum bleiben, sondern können gestützt durch Hypothesen und Konzepte in der Praxis erprobt werden. Forschung und Unternehmenspraxis sollten daher wie schon an einigen Beispielen verdeutlicht, den unmittelbaren Erfahrungsaustausch suchen, um die Modelle der Logistik weiterzuentwickeln.

Darüber hinaus ist festzustellen, dass nur ein einheitliches Verständnis der Logistik an sich und ihrer Aufgaben zu einem übergreifenden Modellansatz führen können. Die teilweise starken Diskrepanzen im Logistikverständnis sind im Rahmen dieser Arbeit aufgezeigt, konnten aber nicht abschließend betrachtet werden. Eine fundierte Theorie der Logistik liefert das Fundament für die Herausarbeitung der Konzepte für die Produktion von morgen. Dass die aktuellen Ansätze der „klassischen Logistik“ in Bereichen der Beschaffung, Produktionsplanung und -steuerung sowie der Distribution inkompatibel mit den technologischen und wirtschaftsstrukturellen Entwicklungen sind, zeigt sich deutlich anhand des Lastenheftes für die Logistik. Die Diskussion, ob sich die aktuellen Veränderungstreiber nun als industrielle Revolution definieren lassen, wird aus Sicht der Unternehmenspraxis vermutlich eher zweitrangig sein, hier stellen die konkret wirksamen Veränderungstreiber, die mit der Vielzahl der herangezogenen Studien herausgearbeitet sind, den Ausgangspunkt für unternehmensstrategische Entscheidungen dar. Eine klare Vision von den Aufgaben der Logistik im Umfeld der Industrie 4.0 wird den Unternehmen aber als wertvolle Leitlinie bei ihren Investitionsentscheidungen dienen.

Das gerade die Volatilität in der Unternehmensumgebung anhalten wird und hierfür zum einen Konzepte und technisch flexible Lösungen erforderlich sind, konnte anhand der geschilderten Möglichkeiten der Cloud-Technologien dargestellt werden. Dabei hat sich gezeigt, dass das Cloud-Konzept bei intensiverer Betrachtung weitaus mehr Potenzial für die organisatorischen, technologischen und kooperativen Herausforderungen aufweist als bislang in der Ausprägung von SaaS-Diensten möglich ist. Das Konzept der Logistics Mall führt den Gedanken bereits weiter und zeigt letztlich die Möglichkeiten einer Dienstleistungsstruktur in der Cloud auf.

Der These, nach der die Industrie 4.0 auch eine neue Logistik benötigt, kann insoweit gefolgt werden, dass es neuer Materialfluss- und Steuerungskonzepte bedarf. Der grundlegende Paradigmenwechsel hin zur Selbststeuerung wird dabei Veränderungen in allen Bereichen der Wertschöpfung nach sich ziehen. Die Betrachtung dabei aus Sicht der Fertigung (Produktionslogistik) zu wählen, hat sich als sinnvoll erwiesen, gehen doch alle logistischen Tätigkeiten letztlich vom Takt der Fertigung aus, welche sich wiederum am Takt des Kunden orientiert.

Maßgeblich für die Weiterentwicklung der Vision der Industrie 4.0 wird die Umsetzung in Softwarekonzepten und am Markt erhältlicher Softwarelösungen sein. Die Hardware ist bereits in der Lage, in Gestalt von flexiblen Fertigungssystemen und intelligenter Sensorik und Aktorik Cyber-Physikalische Systeme abzubilden. Diese zeichnen sich durch einen hohen Grad an Flexibilität aus und liefern zugleich eine Vielzahl an Daten aus ihrem Betrieb. Aus diesen Daten die relevanten Informationen zu gewinnen und diese zielgerichtet für die Weiterentwicklung einzusetzen, stellt eine der noch zu lösenden Herausforderungen dar.

Die durchgängige vertikale und horizontale Integration ist von der physischen Infrastruktur her betrachtet ebenfalls bereits möglich. Auch hier bedarf es einer neuen Softwarearchitektur, die den Ansprüchen flexibler, ggfs. automatischer Vernetzungen gerecht wird und dabei auch die Sicherheitsaspekte berücksichtigt.

Die Logistik liefert als Querschnittsfunktion für alle Bereiche des einzelnen Unternehmens als auch für die Betrachtung von Unternehmensverbünden (Produktionsnetzwerken) mit dem Modellansatz der fraktalen Fabrik einen guten Ansatz, die Komplexität der Gesamtzusammenhänge für die Lösung einzelner Aufgaben zu reduzieren. Dabei wird die maßgebliche Fragestellung sein, wie mit unterschiedlichen Entwicklungsständen und Automatisierungsgraden der einzelnen Betriebe umzugehen sein wird. Dies konnte im Rahmen dieser Arbeit lediglich angeschnitten werden, dennoch erscheint der Betrachtungsansatz über unterschiedlich zerlegbare Fraktale (intransparente Fraktale) als ein gangbarer Weg.

Das zu entwickelnde Modell der Industrie 4.0 wird dabei kein ausschließlich logistisches sein, dennoch kommt der Logistik die Rückgratfunktion einer Architektur der Industrie 4.0 zu. Dazu sollte die Logistiktheorie und ihr Aufgabenumfang klar beschrieben und mit den übrigen Theorien der Technikwissenschaften und Soziologie verzahnt werden. Ohne ein einheitliches Verständnis, was die Logistik bedeutet und welche Aufgaben ihr zukommen, können keine Lösungsansätze für die anstehenden Herausforderungen entwickelt werden. Der anstehende Paradigmenwechsel in der Logistik bietet die Möglichkeit, diese Definition nun anzugehen.

Literaturverzeichnis

abbeglen: Lean Management Studie 2009. Zürich 2009, online abrufbar unter: http://www.abegglen.com/fileadmin/download/Abegglen_Lean_Management_Studie_2009.pdf (Stand: 30.07.2014).

Abele, E.: Global production. Berlin 2008.

Abele, E., Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. München 2011.

acatech, 2011: Cyber-Physical Systems. München 2011, online abrufbar unter: http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Publikationen/Stellungnahmen/POSITION_CPS_NEU_WEB_120130_final.pdf (Stand: 05.08.2014).

acatech, 2014: online abrufbar unter: http://www.acatech.de (Stand: 21.07.2014).

AfA, 2014: AfA-Tabelle des Bundesministeriums für Finanzen, abrufbar unter: http://www.bundesfinanzministerium.de/Web/DE/Themen/Steuern/Weitere_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA_Tabellen/afa_tabellen.html (Stand: 12.07.2014).

Annunziata, M., Evans, P. C.: The Industrial Internet@Work. 2013, online abrufbar unter: https://www.ge.com/sites/default/files/GE_IndustrialInternetatWork_WhitePaper_20131028.pdf (Stand: 30.07.2014).

Appelfeller, W., Buchholz, W.: Supplier Relationship Management. 2. Auflage, Wiesbaden 2011.

Arnold, D.: Handbuch Logistik. 3. Auflage, Berlin 2008.

Barck, R.: Das Lager wird mobil, in: Logistik Heute, 1-2/2014, S. 61-62, online (mit Lizenz) abrufbar unter: http://www.wiso-net.de/webcgi?START=A60&DOKV_DB=ZECO&DOKV_NO=LOGIC1435F96A4BD606B94D473858D4512FF&DOKV_HS=0&PP=1 (Stand: 01.08.2014).

Bartsch, B.: Die Bank in der Hand. In: Brand Eins, Nr.5/2013, online abrufbar unter: http://www.brandeins.de/uploads/tx_b4/096_099_b1_05_13_private_banking.pdf (Stand: 30.07.2014).

Bauer, W., Schlund, S., Marrenbach, D., Ganschar, O.: Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland. Berlin 2014, online abrufbar unter: http://www.bitkom.org/files/documents/Studie_Industrie_4.0.pdf (Stand: 30.07.2014).

Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B.: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden 2014.

Baumgarten, H.: Das Beste der Logistik. Berlin 2008.

Behrens, C.; Becker, M.; Gehrke, J. D.; Jedermann, R.; Görg, C.; Herzog, O.; Lang, W.; Laur, R.: Ein Multiagentensystem für Selbststeuerung in der Transportlogistik. In: Fachtagungsberichte VDE Kongress 2006. Innovations for Europe, Aachen 2006, S. 29-34, online abrufbar unter: http://www.intelligentcontainer.com/fileadmin/Redakteure/pdfs/2006/Behrens_Nr4_ITG-Mobility_2006_MAS-Logistik.pdf (Stand: 03.08.2014).

BITKOM; Plattform Industrie 4.0: Industrie 4.0 - Whitepaper FuE-Themen. Berlin 2014, online abrufbar unter: http://www.plattform-i40.de/whitepaper-forschungs-und-entwicklungsaktivit%C3%A4ten-auf-dem-weg-zu-industrie-40 (Stand: 30.07.2014).

BMBF: IKT 2020. Berlin, Bonn 2007, online abrufbar unter: http://www.bmbf.de/pub/ikt2020.pdf (Stand: 30.07.2014).

BMBF: Zukunftsbild ‚Industrie 4.0". Bonn 2012a, online abrufbar unter: http://www.bmbf.de/pubRD/Zukunftsbild_Industrie_40.pdf (Stand: 30.07.2014).

BMBF: Zukunftsprojekte der Hightech-Strategie (HTS-Aktionsplan). Bonn, Berlin 2012b, online abrufbar unter: http://www.bmbf.de/pub/HTS-Aktionsplan.pdf (Stand: 30.07.2014).

BME (Bundesverband Materialwirtschaft), Wittenbrink, P.: Risikomanagement in Transport und Logistik 2015. Lörrach 2012, online abrufbar unter: http://www.bme.de/fileadmin/bilder/BME-Logistik-Umfrage_2012_finale_Ergebnisse_neu.pdf (Stand: 05.08.2014).

BME (Bundesverband Materialwirtschaft), Einkauf und Logistik e.V.; Universität Würzburg; HTWK Leipzig: Elektronische Beschaffung 2014: Stand der Nutzung und Trends, 2014, online abrufbar unter: http://www.bme.de/fileadmin/bilder/PDF/Elektronische_Beschaffung_2014.pdf (Stand: 23.07.2014).

BMWi: Aktionsprogramm Cloud Computing. Berlin 2010, online abrufbar unter: http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/Technologie-und-Innovation/aktionsprogramm-cloud-computing,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf (Stand: 31.07.2014).

Bracht, U., Geckler, D., Wenzel, S.: Digitale Fabrik. Berlin, Heidelberg 2011.

Brunner, F. J., Wagner, K. W., Durakbasa, N. M.: Taschenbuch Qualitätsmanagement. 4. Auflage, München 2008.

BVL: Positionspapier zum Grundverständnis der Logistik als wissenschaftliche Disziplin, 2010, online abrufbar unter: http://www.bvl.de/misc/filePush.php?id=15025&name=Positionspapier+Logistik.pdf (Stand: 21.06.2014), bzw. unter http://www.bvl.de/positionspapier (Stand: 21.06.2014).

Ciupek, M.: Industrie 4.0: Eine konkrete Roadmap ist in Arbeit. In: VDI Nachrichten, 68. Jahrgang, Nr. 5/2014a, online (mit Lizenz) abrufbar unter: http://www.wiso-net.de/webcgi?START=A60&DOKV_DB=ZGEN&DOKV_NO=VDIN578162&DOKV_HS=0&PP=1 (Stand: 05.08.2014).

Ciupek, M.; Hartbrich, I.: Die Fabrik der Zukunft geht in Hannover online, in: VDI Nachrichten, 68. Jahrgang, Nr. 14/2014b, online (mit Lizenz) abrufbar unter: http://www.wiso-net.de/webcgi?START=A60&DOKV_DB=ZGEN&DOKV_NO=VDIN587431&DOKV_HS=0&PP=1 (Stand: 16.05.2014).

Ciupek, M.: Roboter geht dem Werker zur Hand, in: VDI Nachrichten, 68. Jahrgang, Nr. 24/2014c, online (mit Lizenz) abrufbar unter: http://www.wiso-net.de/webcgi?START=A60&DOKV_DB=ZGEN&DOKV_NO=VDIN593626&DOKV_HS=0&PP=1 (Stand: 05.08.2014).

Cuhls, K., Ganz, W., Warnke, P.: Foresight-Prozess im Auftrag des BMBF. Karlsruhe, Stuttgart 2009, online abrufbar unter: http://www.bmbf.de/pubRD/Foresight-Prozess_BMBF_Zukunftsfelder_neuen_Zuschnitts.pdf (Stand: 30.07.2014).

Delfmann, W., Wimmer, T.: Strukturwandel in der Logistik. Hamburg 2010.

Delfmann, W.; Jaekel, F.; The Cloud – Logistics for the Future?, 2012, online abrufbar unter: http://www.bvl.de/wissen/publikationen/positionspapiere/diskussionspapier-cloud-logistics (Stand: 31.07.2014).

DESTATIS, 2013, Unternehmen und Arbeitsstätten. Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien in Unternehmen 2013, Wiesbaden 2013, online abrufbar unter: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UnternehmenHandwerk/Unternehmen/InformationstechnologieUnternehmen.html (Stand: 29.07.2014).

DESTATIS, 2014a: Bruttoinlandsprodukt im 1. Quartal 2014 um 0,8 % gestiegen, 15.05.2014, online abrufbar unter: https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2014/05/PD14_167_811.html (Stand: 21.07.2014).

DESTATIS, 2014b: Zusammenfassende Übersichten für den Außenhandel – vorläufige Jahresergebnisse, Fachserie 7 Reihe 1 – 2013, online abrufbar unter: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Aussenhandel/Gesamtentwicklung/ZusammenfassendeUebersichtenJvorlaeufig.html (Stand: 21.07.2014).

DESTATIS, 2014c; Beschäftigte und Umsatz der Betriebe im verarbeitenden Gewerbe. Tabelle online abrufbar unter: https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/logon?sequenz=tabelleErgebnis&selectionname=42271-0002&zeitscheiben=3 (Stand: 21.07.2014).

DESTATIS, 2014d: Wirtschaftsrechnungen. Private Haushalte in der Informationsgesellschaft – Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien, Fachserie 15, Reihe 4, 2013, Wiesbaden 2014, online abrufbar unter: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/EinkommenKonsumLebensbedingungen/PrivateHaushalte/PrivateHaushalteIKT2150400137004.pdf?__blob=publicationFile (Stand: 05.08.2014).

DESTATIS, 2014e: online abrufbar unter https://www.destatis.de/DE/Startseite.html (Stand: 29.06.2014).

DFKI, 2014: online Abrufbar unter: http://www.dfki.de (Stand: 21.07.2014).

Dreier, J.: Afrika: Der mobile Kontinent, 2013, online abrufbar unter: http://blog.zdf.de/hyperland/2013/03/afrika-der-mobile-kontinent/ (Stand: 14.06.2014).

Drucker, P.: The Mob in The Shipping Room, in: Klaus, P., Müller, S.: The roots of logistics. Berlin 2012.

Peter F. Drucker: The Economy's Dark Continent. First Publication in: Fortune, Vol. LXV, No. 4, April 1962, pp. 265-270.

Dujin, A., Geissler, C., Hostkötter, D.: INDUSTRY 4.0. 2014, online abrufbar unter: http://www.rolandberger.com/media/pdf/Roland_Berger_TAB_Industry_4_0_20140403.pdf (Stand: 30.07.2014).

DVZ: Onlinehändler brauchen Flächen. In: DVZ 2013, Nr. 30, online (mit Lizenz) abrufbar unter: http://www.wiso-net.de/webcgi?START=A60&-DOKV_DB=ZECO&DOKV_NO=DVZLI30gm-on-line-handel-657062-new&DOKV_HS=0&PP=1 (Stand: 30.07.2014).

Erlach, K.: Value stream design. Berlin, London 2011.

Erlach, K.: Wertstromdesign. Berlin, Heidelberg 2007.

Forschungsunion, 2014: online abrufbar unter: http://www.forschungsunion.de/ (Stand: 21.07.2014).

Fraunhofer Smart Face, 2014: online abrufbar unter: http://www.ccl.fraunhofer.de/de/forschung/smart-face.html (Stand: 19.03.2014).

Fraunhofer SIT, 2014: online abrufbar unter: https://www.sit.fraunhofer.de/de/industrie-40/ (Stand: 17.07.2014).

Gausemeier, J., Tschirner, C., Dumitrescu, R.: Der Weg zu intelligenten Technischen Systemen. In: Industrie Management 29, 2013a, Nr. 1, online abrufbar unter: http://www.industrie-management.de/homepage/im/imhp.nsf/0/B0BB1B1F4355A4AB-C1257B09004EFF1D/$FILE/gausemeier_Der_Weg_zu_Intelligenten%20_Technischen_Systemen_IM_2013_1.pdf (Stand: 30.07.2014).

Gausemeier, J., Dumitrescu, R., Steffen, D.: Systems Engineering in der industriellen Praxis. Paderborn 2013b, online (mit Registrierung) abrufbar unter: http://www.unity.de/studie-systems-engineering/ (Stand: 30.07.2014).

Gausemeier, J., Dumitrescu, R., Jasperneite, J., Kühn, A., Trsek, H.: Auf dem Weg zu Industrie 4.0: Lösungen aus dem Spitzencluster it‘s OWL. 2014, online abrufbar unter: http://www.its-owl.de/fileadmin/PDF/Informationsmaterialien/Auf_dem_Weg_zu_Industrie_4.0_-_Loesungen_aus_dem_Spitzencluster_its_OWL.pdf (Stand: 30.07.2014).

Geisberger, E.: agendaCPS. München 2012, online abrufbar unter: http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Cyber-Physical-Systems/acatech_STUDIE_agendaCPS_Web_20120312_superfinal.pdf (Stand: 30.07.2014).

Gronau, N.: Bionic Manufacturing, in: Industrie Management (2013) Nr. 6, S. 12-16, online (mit Lizenz) abrufbar unter: http://www.wiso-net.de/webcgi?START=A60&DOKV_DB=ZECO&DOKV_NO=IMB82EDC6E5A2FC69036F0A12CDE78B91D&DOKV_HS=0&PP=1 (Stand: 30.07.2014).

Günthner, W. A.; Tenerowicz, P.: Modularisierung und Dezentralisierung in der Intralogistik, in: Industrie Management, Nr. 1, 2011, S. 25-29, online (mit Lizenz) abrufbar unter: http://www.wiso-net.de/webcgi?START=A60&DOKV_DB=ZECO&DOKV_NO=IM2A38661C9D5152B49513C65592900865&-DOKV_HS=0&PP=1 (Stand: 01.08.2014).

Gudehus, T.: Logistik 1 – Grundlagen, Verfahren und Strategien. 4. Auflage, Berlin 2012.

Hackstein, R.: Produktionsplanung und -steuerung (PPS). 2. Auflage, Düsseldorf 1989.

Handfield, R.: Embracing global logistics complexity to drive market advantage. Hamburg 2013, online abrufbar unter: www.bvl.de/misc/filePush.php?id=21777&name=BVL_TrendsandStrategies_SCM_Logistics_2013.pdf (Stand: 30.07.2014).

Hartmann, E., Hohenstein, N.-O., Feisel, E., : Der Innovationswürfel: Strategien zum erfolgreichen Umgang mit Supply Chain Störungen. In: Schultz, C., Hölzle, K. (Hrsg.): Motoren der Innovation, Wiesbaden 2014, S. 97 – 114.

Hightech-Strategie, 2014: online abrufbar unter: http://www.hightech-strategie.de/de/13.php (Stand: 14.06.2014).

Hoffmann, F.-J.: iBin – Anthropomatik schafft revolutionäre Logistik-Lösungen, in: Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B.: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden 2014, S. 207 – 220.

IFR Statistical Department: Weltweite Roboterindustrie: Rekorde, Rekorde, Rekorde, Frankfurt am Main 2014, online abrufbar unter: http://www.worldrobotics.org/uploads/tx_zeifr/June_04__2014_PI_IFR_Weltmarkt_Roboter.pdf (Stand: 22.07.2014).

Jörgl, T.: Wege in die Wünsch-dir-was-Welt. In: LOGISTIK HEUTE 36 (2014), Nr. 01/02, online (mit Lizenz) abrufbar unter: http://www.wiso-net.de/webcgi?START=A60&DOKV_DB=ZECO&DOKV_NO=LOGI780C9B3F6791E28EF978C23D804B3F23&-DOKV_HS=0&PP=1 (Stand: 30.07.2014).

Kagermann, H.; Lukas, W.-D.; Wahlster, W.: Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. In: VDI Nachrichten, Nr. 13/2011, S. 3; online (mit Lizenz) abrufbar unter: http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Gesellschaft/Industrie-40-Mit-Internet-Dinge-Weg-4-industriellen-Revolution (Abruf: 16.05.2014).

Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J.: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0., Berlin 2012, online abrufbar unter: http://www.forschungsunion.de/themen_und_bedarfsfelder/¬kommunikation/index.html (Stand: 14.06.2014).

Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J.: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Frankfurt am Main 2013, online abrufbar unter: http://www.plattform-i40.de/sites/default/files/Abschlussbericht_Industrie4%200_barrierefrei.pdf (Stand: 30.07.2014).

Kief, H. B., Roschiwal, H. A.: CNC-Handbuch 2013/2014. München 2013.

Kille, C., Schwemmer, M.: Die Top 100 der Logistik. Hamburg 2012.

Klaus, P.: Gabler Lexikon Logistik. 5. Auflage, Wiesbaden 2012.

Kornwachs, K.: Bedingungen und Triebkräfte technologischer Innovationen. Stuttgart: 2007, online abrufbar unter: http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Publikationen/acatech_diskutiert/acatech_Band_Bedingungen_Triebkraefte_web.pdf (Stand: 30.07.2014).

Kotler, P., Armstrong, G., Wong, V., Saunders, J.: Grundlagen des Marketing. 5. Auflage, München 2011.

Lenz, B., Bochynek, C.: Produktion - Distribution - Konsum. Berlin 2010.

Liedtke, R.: Die Industrielle Revolution. Köln 2012.

Logipedia, 2014: Produktionslogistik, abrufbar unter: http://www.logipedia.de/lexikon/Produktionslogistik/ (Stand: 23.07.2014).

Logistics Mall, 2014: online abrufbar unter http://mmp.logistics-mall.com/ (Stand: 21.07.2014).

Mandelbrot, B. B.: Die fraktale Geometrie der Natur. Berlin 1987.

Manyika, J., Chui, M., Bughin, J., Dobbs, R., Bisson, P., Marrs, A.: Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy. 2013, online abrufbar unter: http://www.mckinsey.com/insights/business_technology/disruptive_technologies (Stand: 05.08.2014).

McKinsey Deutschland: Die Goldenen Zwanziger. 2013, online abrufbar unter: http://www.mckinsey.de/sites/mck_files/files/130314_Goldene_Zwanziger.pdf (Stand: 30.07.2014).

Meinhardt, M., Lippmann, T., ten Hompel, M.: Cloud Computing für Logistik. Stuttgart 2011.

Mell, P., Grance, T.: The NIST Definition of Cloud Computing. 2012, online abrufbar unter: http://csrc.nist.gov/publications/PubsSPs.html#800-145 (Stand: 30.07.2014).

Mill, S.: Principles Of Political Economy. 1848, online abrufbar unter: http://www.gutenberg.org/files/30107/30107-pdf (letzter Abruf am 14.06.2014).

Moore, G. E.: Cramming more components onto integrated circuits. New York 1965, online abrufbar unter: http://www.computerhistory.org/semiconductor/assets/media/classic-papers-pdfs/Moore_1965_Article.pdf (Stand: 30.07.2014).

MWP; Fraunhofer CML; IHS; Uniconsult: Seeverkehrsprognose 2030. Hamburg, Frankfurt am Main: 2014, online abrufbar unter: http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/UI/verkehrsprognose-2030.html (Stand: 30.07.2014).

Nyhuis, P., Wildemann, H.: Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin, Heidelberg 2008.

Ohno, T., Hof, W.: Das Toyota-Produktionssystem. 2. Auflage, Frankfurt am Main 2009.

Otto, A.: Logistikmanagement. Wiesbaden 2007.

Pfohl, H.: Logistiksysteme. 8. Auflage, Berlin 2010.

Pieringer, M.: Stresstests für die Supply Chain, in: LOGISTIK HEUTE, Heft 12/2011.

Piller, F. T.: Mass Customization. 4. Auflage, Wiesbaden 2006.

Plattform Industrie 4.0: Was Industrie 4.0 (für uns) ist, 2013a, online abrufbar unter: http://www.plattform-i40.de/blog/was-industrie-40-für-uns-ist (Stand: 20.07.2014).

Plattform Industrie 4.0: Pressekonferenz der Plattform Industrie 4.0, 2013b, online abrufbar unter: http://www.plattform-i40.de/presse/plattform-industrie-40/pressekonferenz-der-plattform-industrie-40 (25.12.2013).

Plattform Industrie 4.0: Organisation und Gremien, 2014, online abrufbar unter: http://www.plattform-i40.de/plattform/organisation (05.07.2014).

Porter, M. E.: Wettbewerbsstrategie. 12. Auflage, Frankfurt am Main 2013.

Porter, M. E.: Wettbewerbsvorteile. 8. Auflage, Frankfurt am Main 2014.

Promotorengruppe, 2014, online abrufbar unter: http://www.forschungsunion.de/themen_und_bedarfsfelder/kommunikation/index.html (Stand: 30.07.2014).

Rekersbrink, H.; Wenning, B.-L.: Selbststeuerung in der Transportlogistik, in: Industrie Management, Nr. 27/2011, S. 30-34, online (mit Lizenz) abrufbar unter: http://www.wiso-net.de/webcgi?START=A60&DOKV_DB=ZECO&DOKV_NO=IM8D2D5C845D7FF23A3941F469222817B9&DOKV_HS=0&PP=1 (Stand: 03.08.2014).

REN21, 2014a; Renewables 2014 Global Status Report, 2014, online abrufbar unter: http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_Release_German_website.pdf (Stand: 19.07.2014).

REN21, 2014b; Renewables 2014 Global Status Report, 2014, online abrufbar unter: http://www.ren21.net/REN21Activities/GlobalStatusReport.aspx (Stand: 19.07.2014).

Rifkin, J.: Die dritte industrielle Revolution. Frankfurt am Main 2014.

Roidl, M.: Kooperation und Autonomie in selbststeuernden Systemen, in: Günthner, W. A., ten Hompel, M.: Internet der Dinge in der Intralogistik. Berlin 2010, S. 65 – 78.

Ropohl, G.: Allgemeine Systemtheorie. Berlin 2012.

Rother, M., Shook, J.: Sehen lernen. Version 1.2, Aachen 2004.

Russell, S., Norvig, P., Kirchner, F.: Künstliche Intelligenz. 3. Auflage, München 2012.

Scheuplein, C.: Der Raum der Produktion. Berlin 2006.

Schließmann, A.; iProduction, die Mensch-Maschine-Kommunikation in der Smart Factory. In: Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B.: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden 2014, S. 207 – 220.

Schmidt T, Schulze F: Simulationsbasierte Entwicklung energieeffizienter Steuerungsstrategien für Materialflusssysteme, in: Logistics Journal Proceedings, Nr. 07, 2011, online abrufbar unter: https://www.logistics-journal.de/proceedings/2011/3100/schmidt_wgtl_2011.pdf (Stand: 03.08.2014).

Schöning, H.: Data Mining und Analyse, in: Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B.: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden 2014, S. 543 – 554.

Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.; Rekersbrink, H.; Wenning, B.-L.; Gorldt, C.; Echelmeyer, W.: Auf dem Weg zur Selbststeuerung in der Logistik – Grundlagenforschung und Praxisprojekte, in: Wäscher, G. et. al. (Hrsg.): Begleitband zur 11. Magdeburger Logistiktagung „Intelligente Logistikprozesse: Konzepte, Lösungen Erfahrungen“, Magdeburg 2005, S. 166-180, online abrufbar unter: http://www.sfb637.uni-bremen.de/pubdb/repository/SFB637-B1-05-001-IC.pdf (Stand: 03.08.2014).

Scholz-Reiter, B.; Harjes, F.; Rippel, D.: Von der Selbststeuerung zu cyberphysischen Systemen, in: Schuh, G., Stich, V.: Enterprise -Integration. Berlin, Heidelberg 2014, S. 63 – 75.

Schröder, C.: Industrielle Arbeitskosten im internationalen Vergleich. Köln 2012, online abrufbar unter: http://www.iwkoeln.de/de/studien/iw-trends/beitrag/christoph-schroeder-industrielle-arbeitskosten-im-internationalen-vergleich-92762 (Stand: 05.08.2014).

Schubert, 2011, online abrufbar unter: http://www.bpb.de/nachschlagen/lexika/politiklexikon/18147/revolution (Stand: 19.07.2014).

Schuh, G., Stich, V.: Grundlagen der PPS. 4. Auflage, Berlin 2012.

Sendler, U.: Industrie 4.0. Berlin, Heidelberg 2013.

SFB637, 2014: Sonderforschungsbereich Selbststeuernde Logistik der Universität Bremen, online abrufbar unter: http://www.sfb637.uni-bremen.de/publikationen.html (Stand: 03.08.2014).

SIEMENS AG: Die Antwort von Siemens: Mit PLM-Software, für die Entwicklung und Fertigung marktgerechter Produkte. Köln 2010, online abrufbar unter: http://www.plm.automation.siemens.com/de_de/plm/ (Stand: 03.08.2014).

SIEMENS AG: SIMATIC Controller. Nürnberg 2013a, online abrufbar unter: http://www.automation.siemens.com/salesmaterial-as/interactive-manuals/getting-started_simatic-s7-1500/documents/DE/software_complete_de.pdf (Stand: 27.07.2014).

SIEMENS AG: Totally Integrated Automation Portal. Nürnberg 2013b, online abrufbar unter: http://www.automation.siemens.com/salesmaterial-as/brochure/de/brochure_tia_portal_de.pdf (Stand: 27.07.2014).

SIEMENS AG: In der Fertigung wächst zusammen, was zusammen gehört. 2013c, online abrufbar unter: http://www.siemens.com/innovation/apps/pof_microsite/_pof-spring-2013/_html_de/industrie-40.html (Stand: 10.07.2014).

SIEMENS AG: SIMATIC S7-1500. Nürnberg 2013d, online abrufbar unter: http://www.automation.siemens.com/salesmaterial-as/brochure/de/brochure_simatic-controller_overview_de.pdf (Stand: 27.07.2014) Animierte Darstellung abrufbar unter: http://cache.automation.siemens.com/media/78027451_S7_1500_gs_auto_web_de/start.htm (Stand: 10.07.2014).

SIEMENS AG: PROFINET, 2013e, online abrufbar unter: https://www.automation.siemens.com/mcms/infocenter/dokumentencenter/sc/ic/Documentsu20Brochures/E20001-A25-M116-V1_WS_PROFINET.pdf (Stand: 03.03.2014).

SIEMENS AG: Siemens – Vision 2020, 2014a, online abrufbar unter: http://www.siemens.com/press/pool/de/pressemitteilungen/2014/corporate/2014-q2/AXX20140534d.pdf (Stand: 16.05.2014).

SIEMENS AG: STEP 7 Programmiersoftware, 2014b, online abrufbar unter: http://w3.siemens.com/mcms/simatic-controller-software/de/step7/Seiten/Default.aspx (Stand: 03.08.2014).

SIEMENS AG: HMI, 2014c, online abrufbar unter: http://w3.siemens.com/mcms/human-machine-interface/de/hmi-panel/Seiten/Default.aspx (Stand: 27.07.2014).

SIEMENS AG: Automatisierungsaufgabe, 2014d, online abrufbar unter: http://support.automation.siemens.com/WW/llisapi.dll?func=cslib.csinfo&lang=de&objid=78027451&caller=view (Stand: 10.07.2014).

Spath, D., Ganschar, O.: Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0. Stuttgart 2013, online abrufbar unter: http://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/forschungsthemen/Wissenschaftsjahr/2014-die-digitale-gesellschaft/Produktionsarbeit-der-Zukunft_Industrie-4.0.pdf (Stand: 31.07.2014).

SPS Magazin: Grundlagen moderner Industriekommunikation: Vom Feldbus zum Industrial Ethernet, in: SPS Magazin, Nr. 06/2011, online abrufbar unter: http://www.sps-magazin.de/?inc=artikel/article_show&nr=58720 (Stand: 27.07.2014).

Statistisches Bundesamt: Statistisches Jahrbuch 2013. Wiesbaden 2013, online abrufbar unter: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/StatistischesJahrbuch/StatistischesJahrbuch2013.pdf?__blob=publicationFile (Stand: 05.08.2014).

Statistisches Bundesamt: Klassifikation der Wirtschaftszweige 2008. Wiesbaden 2008, online abrufbar unter: https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/GueterWirtschaftklassifikationen/klassifikationwz2008_erl.pdf;jsessionid=521A28795240D8A981FAD6297A8E98B5.cae3?__blob=publicationFile (Stand: 05.08.2014).

Straube, F., Pfohl, H.: Trends und Strategien in der Logistik. Hamburg 2008, online abrufbar unter: http://www.bvl.de/misc/filePush.php?id=17856 (Stand: 31.07.2014).

Strietzel, T.: Internet der Dinge in Maschinen- und Anlagensteuerungen. Berlin 2013.

Supply Chain Council, I.: Supply Chain Operations Reference (SCOR®) model. 2010, online abrufbar unter: https://supply-chain.org/f/SCOR-Overview-Web.pdf (Stand: 30.07.2014).

ten Hompel, M.: Zellulare Fördertechnik, in: Logistics Journal (nicht-referierte Veröffentlichungen), 2006, online abrufbar unter: https://www.logistics-journal.de/not-reviewed/2006/8/599/tenHompel_d.pdf (Stand: 01.08.2014).

ten Hompel, M.: Vom Prozess zum Service, in: Baumgarten, H.: Das Beste der Logistik, Berlin 2008, S. 104 – 110.

ten Hompel, M., Heidenblut, V.: Taschenlexikon Logistik. Berlin, Heidelberg 2011.

ten Hompel, M.; Wolf, O.; Daniluk, D., Rahn, J.: Logistics Mall - Software aus der Steckdose in: Stölzle, W., Lieb, T. C.: Business Innovation in der Logistik. Wiesbaden 2012, S. 127 – 146.

ten Hompel, M., Wolf, O.: IT in der Logistik 2013/2014. Stuttgart 2013.

ten Hompel, M.; Henke, M.: Logistik 4.0, in: Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B.: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden 2014, S. 615 – 634.

Top100, 2014: http://www.scs.fraunhofer.de/de/studien/logistikmarkt/top100_12.html (Stand: 22.06.2014).

Toynbee, A.: Lectures on the industrial revolution of the 18th century in England.1894; online abrufbar unter: https://archive.org/details/LecturesOnTheIndustrialRevolutionOfThe18thCenturyInEngland (Stand: 14.06.2014).

VDI: Industrie 4.0 – Eine (R)Evolution, 2013, online abrufbar unter: http://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/news_bilder/Pressemitteilungen/wf-2013-02-06-Nachbericht_Industrie_4_0.pdf (Stand: 18.05.2014).

VDI: „Mit Logistik 4.0 zur vernetzten Industrie“, 2014, online abrufbar unter: https://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/news_bilder/Pressemitteilungen/2014-03-20-PM_PG_Materialflusskongress-02TA205014.pdf (Stand: 30.07.2014).

VDI/VDE: Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation. 2013, online abrufbar unter: http://www.vdi.de/uploads/media/Stellungnahme_Cyber-Physical_Systems.pdf (Stand: 30.07.2014).

VDMA, 2014: Definition Intralogistik, online abrufbar unter: http://www.forum-intralogistik.org/de/ueberuns/definitionintralogistik/ (Stand: 08.07.2014).

Veigt, M.; Lappe, D.; Hribernik, K. A.: Entwicklung eines Cyber-Physischen Logistiksystems, in: Industrie Management, Nr. 29, 2013, S. 15-18, online (mit Lizenz) abrufbar unter: http://www.wiso-net.de/webcgi?START=A60&DOKV_DB=ZECO&DOKV_NO=IM3BF16F794D44FFC5432BF7D1E6F1DA86&DOKV_HS=0&PP=1 (Stand: 02.08.2014).

Wannenwetsch, H.: Integrierte Materialwirtschaft und Logistik. 4. Auflage, Berlin 2009.

Warnecke, H.: Die fraktale Fabrik. Berlin 1992.

Weber, J.: Logistikkostenrechnung. 3. Auflage, Berlin 2012.

Weimar, T.: Einkauf von C-Teilen: Prozesse werden weiter automatisiert – Amazonisierung des Einkaufs, in: Beschaffung aktuell, Nr. 10/2013, S. 32, online abrufbar unter: http://www.wiso-net.de/webcgi?START=A60&DOKV_DB=ZECO&DOKV_NO=BABA33497023&DOKV_HS=0&PP=1 (Stand: 05.08.2014).

Weiner, N., Renner, T., Kett, H.: Geschäftsmodelle im ‚Internet der Dienste“. Stuttgart 2010, online abrufbar unter: http://www.e-business.iao.fraunhofer.de/de/publikationen/geschaeftsmodelle/beschreibung/bm_praxis.html (Stand: 31.07.2014).

Weiss, H.: Industrie 4.0 – ein deutscher Begriff, in: VDI Nachrichten, 68. Jahrgang, Nr. 5/2014, online (mit Lizenz) abrufbar unter: http://www.wiso-net.de/webcgi?START=A60&DOKV_DB=ZGEN&DOKV_NO=VDIN579386&DOKV_HS=0&PP=1 (Stand: 05.08.2014).

Weskamp, M., Tamas, A., Wochinger, T., Schatz, A.: Studie Einsatz und Nutzenpotenziale von Data Mining in Produktionsunternehmen. 2014, online (auf Anforderung) abrufbar unter: http://www.ipa.fraunhofer.de/Studien.33.0.html (Stand: 31.07.2014).

Westkämper, E.; Bauernhansl, T.: Produktionssteuerung, in: Schuh, G., Stich, V.: Enterprise Integration. Berlin, Heidelberg 2014, S. 13 – 22.

Wiendahl, H.: Stolpersteine der PPS – ein sozio-technischer Ansatz für das industrielle Auftragsmanagement, in: Nyhuis, P.: Beiträge zu einer Theorie der Logistik, Berlin, Heidelberg 2008, S. 275 – 304.

Wildemann, H.: Entwicklungslinien der Logistik in: Nyhuis, P. Beiträge zu einer Theorie der Logistik, Berlin, Heidelberg 2008, S. 19 – 41.

Wolf, M., Rahn, J., ten Hompel, M.: Cloud Computing für Logistik 2. Stuttgart 2013.

Wolfram, G.: Auf dem Weg zur Prozesskette der Zukunft – RFID in der Handelslogistik, in: Baumgarten, H.: Das Beste der Logistik. Berlin 2008, S. 113 – 119.

Ziegler, D.: Die Industrielle Revolution. 3. Auflage, Darmstadt 2012.

ZVEI: Nationale Roadmap Embedded Systems, 2009, online abrufbar unter: http://www.pt-it.pt-dlr.de/_media/Roadmap-Embedded-Systems.pdf (Stand: 16.05.2014).