



Bachelorthesis

Vor- und Zuname:

Jean Philip Zimmermann

Titel:

„Materialflusssysteme in Smart Factories“

Abgabedatum:

10.08.2015

Betreuender Professor: Herr Prof. Dr. Kontny

Zweiter Prüfender: Herr Prof. Dr. Wagenitz

Fakultät Wirtschaft und Soziales

Department Wirtschaft

Studiengang:

Logistik/Technische Betriebswirtschaftslehre

Inhalt

I	Abkürzungsverzeichnis.....	III
II	Abbildungsverzeichnis.....	IV
III	Tabellenverzeichnis.....	V
1	Einleitung.....	1
2	Industrie 4.0 als neues Produktionsparadigma.....	7
2.1	Die Vision Industrie 4.0.....	7
2.2	Industrie 4.0 als Teil einer vernetzten, intelligenten Welt.....	8
2.3	Wertschöpfung in der Smart Factory	9
2.3.1	Cyber-physische Systeme.....	9
2.3.2	Das Internet der Dinge und Dienste	11
2.3.3	Entitäten und Eigenschaften der Smart Factory.....	13
2.3.3.1	Das intelligente Produkt.....	13
2.3.3.2	Die intelligente Maschine	13
2.3.3.3	Der assistierte Bediener	14
2.3.3.4	Der Produktionsprozess	15
2.3.4	Potenziale der Smart Factory.....	16
3	Materialflusssysteme in Smart Factories.....	17
3.1	Materialflusssysteme	17
3.1.1	Hauptfunktionen des Materialflusssystems	18
3.1.1.1	Funktion Fördern	18
3.1.1.2	Funktion Handhaben	20
3.1.1.3	Funktion Lagern.....	20
3.1.2	Steuerung eines Materialflusssystems.....	21
3.1.3	Planung eines Materialflusssystems	22
3.2	Anforderungen an Materialflusssysteme in Smart Factories.....	23
3.2.1	Flexibilität	23

3.2.1.1	Fördergutflexibilität	25
3.2.1.2	Layoutflexibilität.....	26
3.2.1.3	Durchsatzflexibilität	27
3.2.2	Wandlungsfähigkeit	30
3.2.3	Wirtschaftlichkeit.....	32
3.2.4	Komplexitätsreduktion	37
3.3	Charakteristiken cyber-physischer Materialflusssysteme	38
3.3.1	Entitäten eines CPMS.....	42
3.3.1.1	Fördertechnikmodule	43
3.3.1.2	Transporteinheiten	44
3.3.1.3	Softwaredienste	45
3.3.2	Steuerung eines CPMS	45
4	Lösungen für cyber-physische Materialflusssysteme	48
4.1	MultiShuttle Move.....	48
4.2	KARIS PRO.....	52
5	Zusammenfassung und Ausblick	55
IV	Literaturverzeichnis	VI
V	Eidesstattliche Versicherung.....	XII
	Einverständniserklärung.....	XIII

I Abkürzungsverzeichnis

CPS	Cyber-physisches System
CPMS	Cyber-physisches Materialflusssystem
CPPS	Cyber-physisches Produktionssystem
IML	Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik
IT	Informationstechnik
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KLT	Kleinladungsträger
MS Move	MultiShuttle Move
M2M	Machine-to-Machine
RFID	Radio-frequency Identification
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TE-Agent	Softwareagent einer Transporteinheit
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WLAN	Wireless Local Area Network

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Marktsättigung des Waschmaschinenmarktes in Deutschland von 2008 bis 2010.....	1
Abbildung 2: Umsatz mit Waschmaschinen durch Verkäufe an Endverbraucher in Deutschland von 2007 bis 2010	2
Abbildung 3: Gegenüberstellung äußere – innere Komplexität	4
Abbildung 4: Bedeutsamkeit strategischer Erfolgsfaktoren für Unternehmen früher und heute	5
Abbildung 5: Einordnung des Industrie 4.0 Gedankens in die vernetzte, intelligente Welt.....	9
Abbildung 6: Schematischer Aufbau eines Cyber-physischen Systems.....	10
Abbildung 7: Hierarchie und Entwicklung des Internets der Dinge	12
Abbildung 8: Hierarchie der klassischen Materialflusssteuerung.....	21
Abbildung 9: Handlungsspielraum durch Flexibilität	29
Abbildung 10: Erweiterter Handlungsspielraum durch Wandlungsfähigkeit	32
Abbildung 11: Einfluss der Basisflexibilität auf die Wandlungskosten	35
Abbildung 12: Investition in sehr hohe Basisflexibilität im Zeitverlauf	36
Abbildung 13: Bedarfsnahe Anpassung des Flexibilitätspotenzials durch Erweiterung bzw. Integration	36
Abbildung 14: Schematische Darstellung eines modularen Systems.....	39
Abbildung 15: Schematische Darstellung der dezentralen Selbststeuerung eines CPMS	46
Abbildung 16: MS Move Fahrzeug	48
Abbildung 17: Steuerungsarchitektur eines MS Move	50
Abbildung 18: KARIS PRO Systemfahrzeug	52
Abbildung 19: Mögliche Strukturen eines KARIS PRO Fördersystems	53

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wandlungstreiber und ihre Flexibilitätsarten und Dimensionen des Wandels	24
Tabelle 2: Variablen und mögliche Ausprägungen der Fördergutflexibilität für die Materialflussfunktion „Fördern“	25
Tabelle 3: Variablen und mögliche Ausprägungen der Layoutflexibilität für die Materialflussfunktion „Fördern“	26
Tabelle 4: Variablen und mögliche Ausprägungen der Durchsatzflexibilität für die Materialflussfunktion „Fördern“	28
Tabelle 5: Kostenstruktur wandlungsfähiger Materialflusssysteme	33

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird der Einfluss des Produktionsparadigmas einer Smart Factory auf das Materialflusssystem in der Produktion analysiert. Dazu wird die Smart Factory und davon ausgehend die Anforderungen, die diese Art der Wertschöpfung an Materialflusssysteme stellt, beschrieben. Es wird dargestellt, wie Materialflusssysteme, die diese Anforderungen erfüllen, charakterisiert sein könnten.

In einer Smart Factory werden die Produktionsprozesse dezentral durch die Produkte gesteuert und selbstoptimiert. Da das Produktionssystem höchst wandlungsfähig ist, muss das Materialflusssystem eine ebenso wandlungsfähige physische Verknüpfung der Produktionsmodule bereitstellen und sich an Veränderungen des Produktionssystem anpassen können. Dazu muss ein Materialflusssystem fördergut-, layout- und durchsatzflexibel und wirtschaftlich wandlungsfähig sein. Um diese Anforderungen zu erfüllen, müssen die Elemente des Materialflusssystems die Wandlungsbefähiger Modularität, Skalierbarkeit, Universalität, Mobilität und Kompatibilität aufweisen. Eine mögliche Lösung ist ein dezentral gesteuertes Materialflusssystem, das aus miteinander eigenständig kommunizierenden und kooperierenden Fördertechnikmodulen, Transporteinheiten und Softwarediensten besteht.

Abschließend werden zwei konkrete Lösungen, die in solchen Materialflusssystemen eingesetzt werden könnten vorgestellt: das *MultiShuttle Move* und das *KARIS PRO*. Die Migration solcher Lösungen wird in evolutionären Schritten stattfinden.

1 Einleitung

Die Abbildung 1 zeigt die Entwicklung der Marktsättigung des Waschmaschinenmarktes in Deutschland von 2008 bis 2010.¹ Zu erkennen ist, dass schon 2008 ein Marktsättigungsniveau von 97 % erreicht war, welches bis 2010 leicht auf 98 % anstieg.

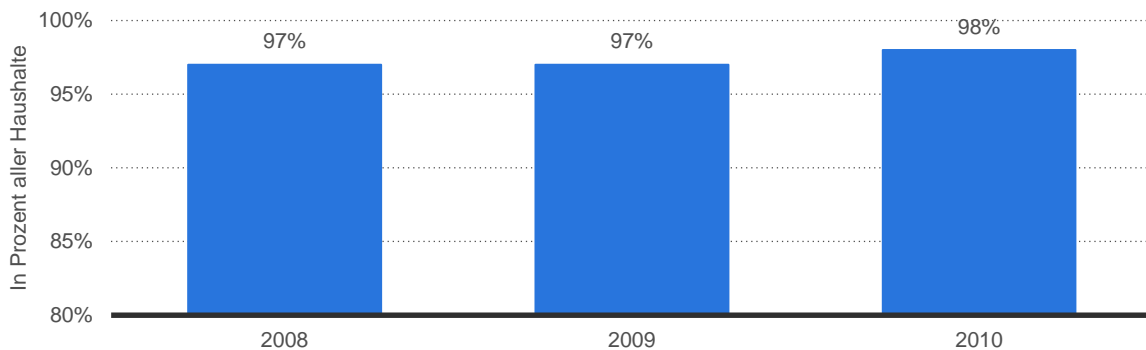


Abbildung 1: Marktsättigung des Waschmaschinenmarktes in Deutschland von 2008 bis 2010

Der deutsche Waschmaschinenmarkt ist offensichtlich ein gesättigter Markt. Solche Märkte sind Käufermärkte und geprägt von Produkten ohne Alleinstellungsmerkmale, sehr hartem Preiskampf zwischen den konkurrierenden Anbietern, schwachem bis negativem Wachstum und Kunden, die jederzeit problemlos den Anbieter wechseln können.² Das zeigt sich auch an den Umsatzzahlen des Waschmaschinenmarktes in Deutschland. Die Abbildung 2 zeigt die Entwicklung des Umsatzes mit Waschmaschinen durch Verkäufe an Endverbraucher in Deutschland im selben Zeitraum.³ 2008 konnte der Umsatz nur ein marginales Wachstum von rund 1,8 % erreichen, 2009 von rund 7 % und das Jahr 2010 schlug sogar mit einem negativem

¹ ZVEI. Marktsättigung von Waschmaschinen in Deutschland von 2000 bis 2010. In Statista - Das Statistik-Portal. Zugriff am 20. Mai 2015, von <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/156487/umfrage/saettigung-des-waschmaschinenmarktes-in-deutschland-seit-2000>.

² Vgl. Huckemann / Krug, 2013, S. 1.

³ ZVEI. Umsatz mit Waschmaschinen durch Verkäufe an den Endverbraucher in Deutschland von 2007 bis 2010 (in Millionen Euro). In Statista - Das Statistik-Portal. Zugriff am 20. Mai 2015, von <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/155195/umfrage/umsatz-mit-waschmaschinen-in-deutschland-seit-2007>.

Wachstum von -0,7 % zu Buche. Das ergibt ein durchschnittliches Umsatzwachstum von nur 2,4 %.

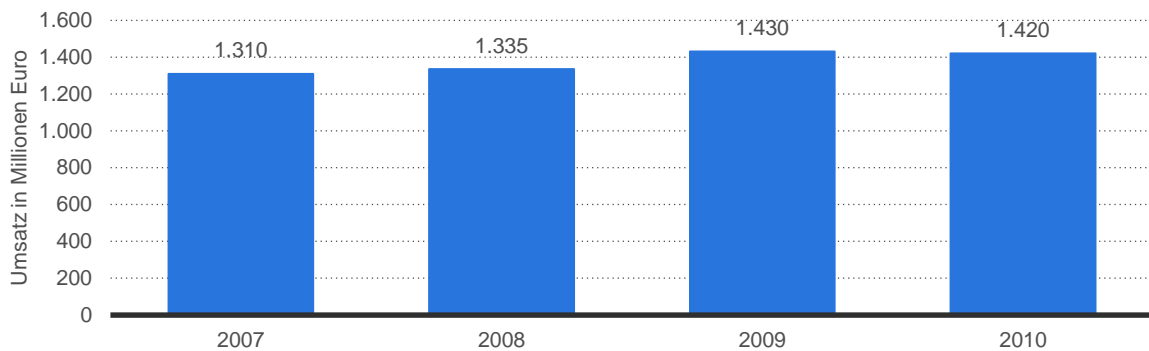


Abbildung 2: Umsatz mit Waschmaschinen durch Verkäufe an Endverbraucher in Deutschland von 2007 bis 2010

Für die Unternehmen in diesen Märkten werden die Kundenbindung und das Anbieten individualisierter, an die Anforderungen des einzelnen Kunden angepasster Produkte zu einem wichtigen Erfolgsfaktor bei der Eroberung von Marktanteilen und Generierung von zusätzlichem Wachstum.⁴ So plant der Hausgerätekonzern Bosch und Siemens BSH, der auch Waschmaschinen anbietet, bis 2023 eine Verdopplung des Umsatzes von 2013, indem er u.a. individualisierte Hausgeräte, die passgenau auf die persönliche Situation des Konsumenten zugeschnitten sind, anbietet.⁵ Neben der Individualisierung legt der Kunde hohen Wert auf Qualität und technische Funktionalität der Produkte und fordert kurze Lieferzeiten und hohe Lieferflexibilität. Außerdem werden die Produktlebenszyklen durch steigende Innovationsgeschwindigkeit immer kürzer.⁶

Eine zentrale Herausforderung für Unternehmen ist es, die Produktion von individualisierten Produkten wirtschaftlich und mit der Effizienz einer vergleichbaren Massenproduktion zu gestalten und diese nachhaltig zu Preisen anzubieten, die mit denen der Massenproduktion vergleichbar sind.⁷ Diese kundenindividuelle Massenproduktion nennt sich Mass Customization und hat zum Ziel, jedem einzelnen Kunden in einem relativ großen Marktsegment ein Produkt oder eine Leistung zur

⁴ Vgl. BDI / Z_punkt, 2011, S. 22.

⁵ Vgl. BSH Bosch und Siemens Hausgeräte GmbH, 2014, S.10.

⁶ Vgl. Vogel-Heuser / Bayrak / Frank, 2012, S. 8.

⁷ Vgl. Freund, 2009, S. 2.

Verfügung zu stellen, die seinen spezifischen Bedürfnissen oder Wünschen entspricht, und dies zu einem Preis, den er auch zu zahlen bereit ist.⁸ Die Kunden werden nämlich nicht bereit sein, für individualisierte Produkte mehr Geld als für Massenprodukte zu zahlen.

Das Anbieten personalisierter Produkte hat auch und gerade Einfluss auf die Produktentwicklung. Da das spezifische Produkt vor dem Auftragseingang noch nicht definiert ist, muss der Kunde in den Produktentwicklungs- und Leistungserstellungsprozess eingebunden werden. Die direkte Interaktion mit jedem einzelnen Kunden aus einem Massenmarkt erfordert die Nutzung neuester Informations- und Kommunikationstechnologien und eine ausgeprägte Kundenorientierung der Anbieter.⁹ Dabei rückt diese Interaktion mit dem Kunden statt dem Produkt in den Mittelpunkt. Die Kunden erwarten, dass der Anbieter Lösungskompetenz zeigt und macht diese unter anderem daran fest, wie und in welchem Maße er z.B. über ein Konfigurationssystem in den Produktentwicklungsprozess eingebunden wird.¹⁰ Das Unternehmen soll die Ziele des Kunden analysieren und ihm ein Leistungspaket aus Produkt und Dienstleistung anbieten, mit dem die Ziele des Kunden effizienter erreicht werden können.¹¹ Unternehmen müssen sich also von reinen Produktherstellern zu Anbietern ganzheitlicher Lösungen wandeln. Die Trennlinie zwischen Gütern und Dienstleistungen löst sich auf.¹²

Doch nicht nur in gesättigten Märkten stellen sich den Unternehmen neue Herausforderungen, auch in den Entwicklungsmärkten ändern sich die Rahmenbedingungen. Eine Studie des Beratungsunternehmens McKinsey prognostiziert ein Anstieg des Konsums in den Entwicklungsländern bis 2025 auf 30 Milliarden US-Dollar pro Jahr. Das entspricht, ausgehend von 2010, einem Anstieg von 250 Prozent. Im selben Zeitraum wird der globale Konsum um 168 Prozent auf 64 Milliarden US-Dollar pro Jahr ansteigen.¹³ Die auf unserem Planeten zur Verfügung stehenden Ressourcen werden allerdings nicht ausreichen, um die zur Produktion des

⁸ Vgl. Freund, 2009, S. 2.

⁹ Vgl. Reichwald et al., S.9.

¹⁰ Vgl. Ebenda.

¹¹ Vgl. Huckemann / Krug, 2013, S. 14.

¹² Vgl. BDI / Z_punkt, 2011, S. 22.

¹³ Vgl. McKinsey, 2012, S. 70.

diese Nachfrage deckenden Angebots notwendige Wertschöpfung zu betreiben. Unternehmen weltweit müssen dieser Ressourcenknappheit deswegen mit gesteigerter Ressourceneffizienz begegnen.¹⁴

Die soeben beschriebenen Einflüsse werden Wandlungstreiber genannt und werden um weitere ergänzt in Abbildung 3 zusammengefasst.¹⁵ Sie erhöhen die äußere oder Markt-Komplexität stark.¹⁶

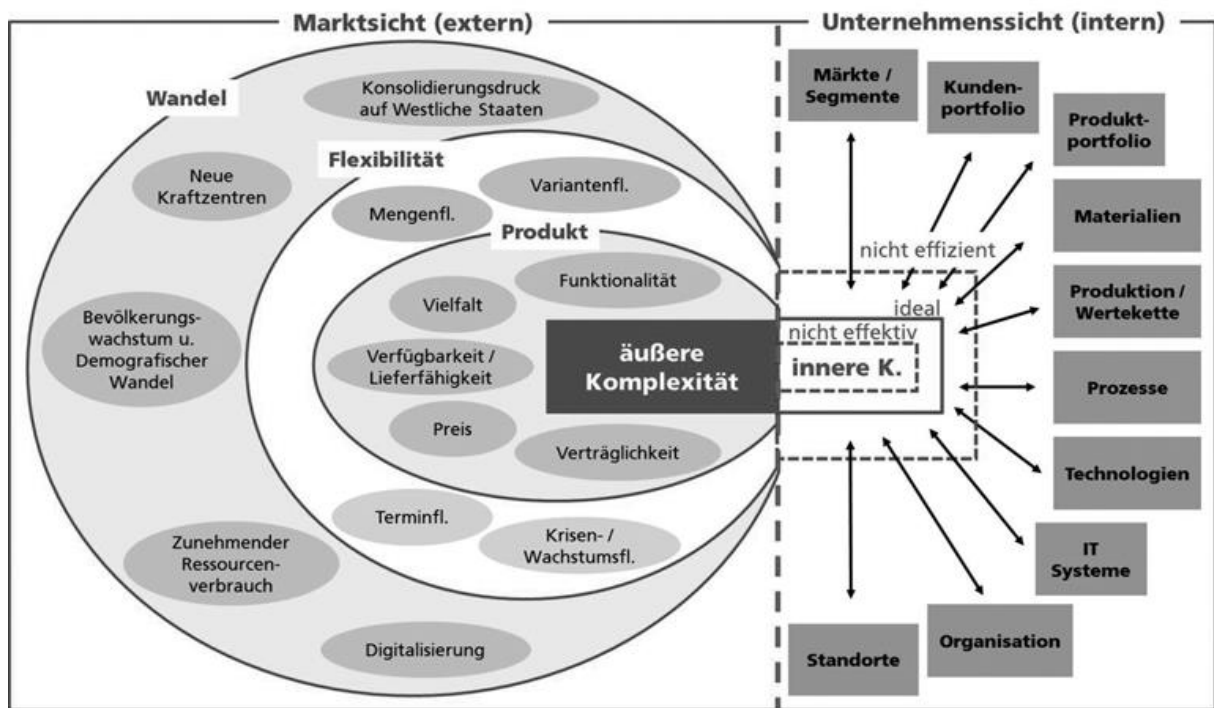


Abbildung 3: Gegenüberstellung äußere – innere Komplexität

Die innere Leistungskomplexität eines Unternehmens, die u.a. von seinem Produktportfolio und Produktion getrieben wird, muss mit der äußeren Marktkomplexität ins Gleichgewicht gebracht werden (vgl. Abbildung 3).¹⁷ Bei der Bewältigung dieser Herausforderung sind die strategischen Erfolgsfaktoren Kosten, Qualität, Zeit, Erzeugnisvielfalt, Service und Flexibilität entscheidend.¹⁸ Standen bis in das 20. Jahrhundert vor allem Kosten und Qualität im Vordergrund von Produktivitätssteigerungsmaßnahmen, sind heute – wie Abbildung 4 zu entnehmen ist

¹⁴ Vgl. Bauernhansl, 2014, S. 11.

¹⁵ Vgl. Abbildung aus: Bauernhansl, 2014, S. 14.

¹⁶ Vgl. Bauernhansl, 2014, S. 14.

¹⁷ Vgl. Ebenda, S. 15.

¹⁸ Vgl. Voigt / Schorr, 2007, S. 41.

– angesichts der oben beschriebenen Marktkomplexität alle Erfolgsfaktoren auf einem etwa gleichen hohen Niveau bedeutsam.¹⁹

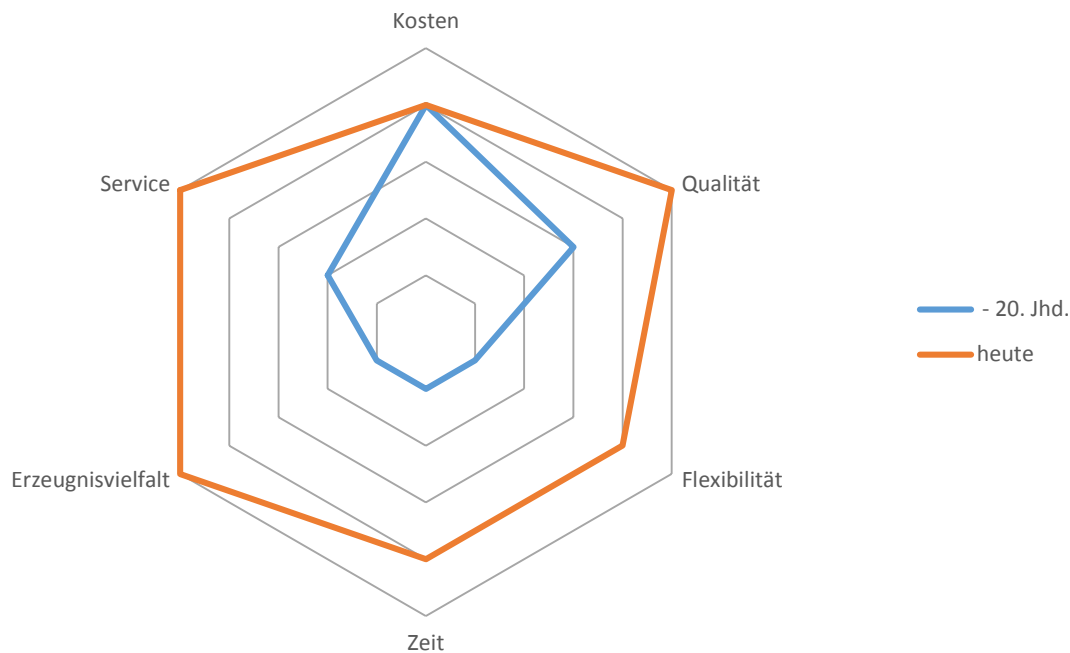


Abbildung 4: Bedeutsamkeit strategischer Erfolgsfaktoren für Unternehmen früher und heute

Die gleichzeitige hohe Erfüllung dieser Erfolgsfaktoren ist mit den heute in vielen Produktionsunternehmen bestehenden tayloristisch organisierten Produktionssystemen mit festen Verkettungen und Takt und zentraler Planung und Steuerung nicht möglich.²⁰ Gerade die Erfolgsfaktoren Erzeugnisvielfalt, Flexibilität, Kosten und Zeit stehen in solchen Systemen, in denen sich Unternehmen zwischen flexiblen, manuellen Produktionsabläufen einerseits und hochproduktiver, repetitiver Automatisierung mit geringer Flexibilität andererseits entscheiden müssen, im Zielkonflikt.²¹

Die Wandlungsfähigkeit wird hierbei zum besonders entscheidenden Erfolgsfaktor von Produktionssystemen, weil sie u.a. befähigt diesen Zielkonflikt aufzulösen.²² Wandlungsfähigkeit beschreibt die Fähigkeit eines Systems (Unternehmen, Produktion etc.), über einen vordefinierten Handlungsspielraum hinaus auf unerwartete Veränderungen der Randbedingungen mit relativ geringem Aufwand

¹⁹ Vgl. Abbildung übernommen aus: Voigt / Schorr, 2007, S. 42.

²⁰ Vgl. Bauernhansl, 2014, S. 21.

²¹ Vgl. Steegmüller / Zürn, 2014, S. 110.

²² Vgl. Ebenda, S. 103.

reagieren und das zu diesem Zeitpunkt benötigte Flexibilitätspotenzial zur Verfügung stellen zu können. Der Begriff der Flexibilität ist dabei Bestandteil der Wandlungsfähigkeit und beschreibt die Fähigkeit eines Systems, sich in vorgehaltenen und vorgeplanten Dimensionen und Szenarien (Handlungsspielraum) ohne jegliche Umbaumaßnahme an erwartete Veränderungen der Randbedingungen anzupassen.²³

Für die Erfüllung der Erfolgsfaktoren werden ein neues Produktionsparadigma und eine Reorganisation der gesamten Wertschöpfungskette benötigt.²⁴ Industrie 4.0, die vierte industrielle Revolution, kann hierbei zu einem bedeutenden Befähiger werden.²⁵

Ziel dieser Bachelorthesis ist es, den Einfluss des neuen Produktionsparadigmas auf die Materialflusssysteme in der Produktion zu analysieren. Hierzu wird im Kapitel 2 zunächst die Vision Industrie 4.0 dargestellt und beschrieben, nach welchem Paradigma in Smart Factories zukünftig Wertschöpfung betrieben werden soll.

Ausgehend von dieser Beschreibung werden die Anforderungen, die diese Art der Wertschöpfung an Materialflusssysteme stellt, herausgearbeitet. Das Kapitel 3 zeigt, wie cyber-physische Materialflusssysteme, die diese Anforderungen erfüllen, charakterisiert sein könnten. Abschließend werden im Kapitel 4 zwei Lösungen deutscher Forschungsinstitute für cyber-physische Materialflusssysteme vorgestellt.

²³ Vgl. Günthner, 2006, S. 31ff.

²⁴ Vgl. Bauernhansl, 2014, S. 15.

²⁵ Vgl. Steegmüller / Zürn, 2014, S. 103.

2 Industrie 4.0 als neues Produktionsparadigma

2.1 Die Vision Industrie 4.0

Eine industrielle Revolution bezeichnet den raschen Wandel von Produktionstechniken und daraus folgend wirtschaftlich-gesellschaftlicher Strukturen.²⁶ Die Erfindung der Dampfmaschine Ende des 18. Jahrhunderts bewirkte in den Manufakturen eine deutliche Produktivitätssteigerung und ging als die erste industrielle Revolution in die Geschichtsbücher ein. Serienfertigung von standardisierten Gütern in Massenproduktion wurde Anfang des 20. Jahrhunderts durch den Einsatz von Fließbändern – erstmals durch Henry Ford – und die Nutzung elektrischer Energie möglich. Diese Produktionsart führte zu Umbrüchen in Wirtschaft, Arbeit und Gesellschaft und wird daher als die zweite industrielle Revolution bezeichnet. Der Einzug von speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) in die Fabriken und der Einsatz von Produktionsrobotern zur Automatisierung seit Beginn der siebziger Jahre des letzten Jahrhunderts erhöhte nochmals deutlich die Produktivität und Qualität der Produkte und markierte die dritte industrielle Revolution.

In Industrie 4.0 soll nun der Wandel die Organisation und Steuerung der gesamten Wertschöpfungskette über den Lebenszyklus von Produkten betreffen. Der Produktlebenszyklus wird sich von der Produktidee, dem Auftrag über die Entwicklung und Produktion, die Auslieferung an den Endkunden bis hin zum Recycling, einschließlich der damit verbundenen Dienstleistungen erstrecken.²⁷

²⁶ Vgl. Alisch / Winter / Arentzen, 2004, S. 1461.

²⁷ Vgl. Plattform Industrie 4.0, 2015, S. 3.

Alle an der Wertschöpfung beteiligten Instanzen sollen vollständig mit Software, Sensoren und Aktoren durchdrungen werden und miteinander und mit der Umwelt vernetzt werden.²⁸ Durch die so realisierte Echtzeit-Verfügbarkeit aller relevanten Informationen für die Wertschöpfung ergibt sich die Fähigkeit, zu jedem Zeitpunkt den optimalen Wertschöpfungsfluss abzuleiten. Aus der Wertschöpfungskette wird so ein dynamisches, echtzeitoptimiertes und selbst organisiertes unternehmensübergreifendes Wertschöpfungsnetzwerk aus Menschen, Objekten und Systemen.²⁹

2.2 Industrie 4.0 als Teil einer vernetzten, intelligenten Welt

Diese Vision der Vernetzung ist im großen Kontext der Entwicklung zu sehen: Neben der Industrie wird auch in anderen Domänen an dem Einsatz von Vernetzung von Objekten geforscht. So befasst man sich zum Beispiel im Rahmen der Energieversorgung mit intelligenten Stromnetzen (*Smart Grids*), die durch intelligente Vernetzung von Stromverbraucher, -erzeuger und Stromnetzkomponenten eine gleichmäßigere Auslastung der Stromnetze erreichen sollen. Diese und weitere Entwicklungen wie *Smart Mobility* (Mobilitätskonzepte) oder *Smart Buildings* (Gebäudemanagement) laufen parallel in verschiedensten Domänen unserer Gesellschaft und sollen zusammen eine *intelligente, vernetzte Welt* bilden, in der Smart Factories, Smart Grids, Smart Health und Co. interagieren und so ihre Wirkungen potenzieren. Die alles verbindende Kraft ist dabei das Internet, welches die inter- und intradomaniale Vernetzung ermöglicht. Es selber entwickelt sich dadurch zu einem sogenannten *Internet der Dinge und Dienste*, welches in Kapitel 2.3.2 näher beschrieben wird. Die Einordnung der Industrie 4.0 Vision in die einer intelligenten, vernetzten Welt ist Abbildung 5 zu entnehmen.³⁰

²⁸ Vgl. Sandler, 2013, S. 1.

²⁹ Vgl. Plattform Industrie 4.0, 2015, S. 3.

³⁰ Vgl. Abbildung modifiziert übernommen aus:

https://netkey40.igmetall.de/homepages/hamburg_forum/start_forum/industrie_40_2013_04.html
[24.04.2014]

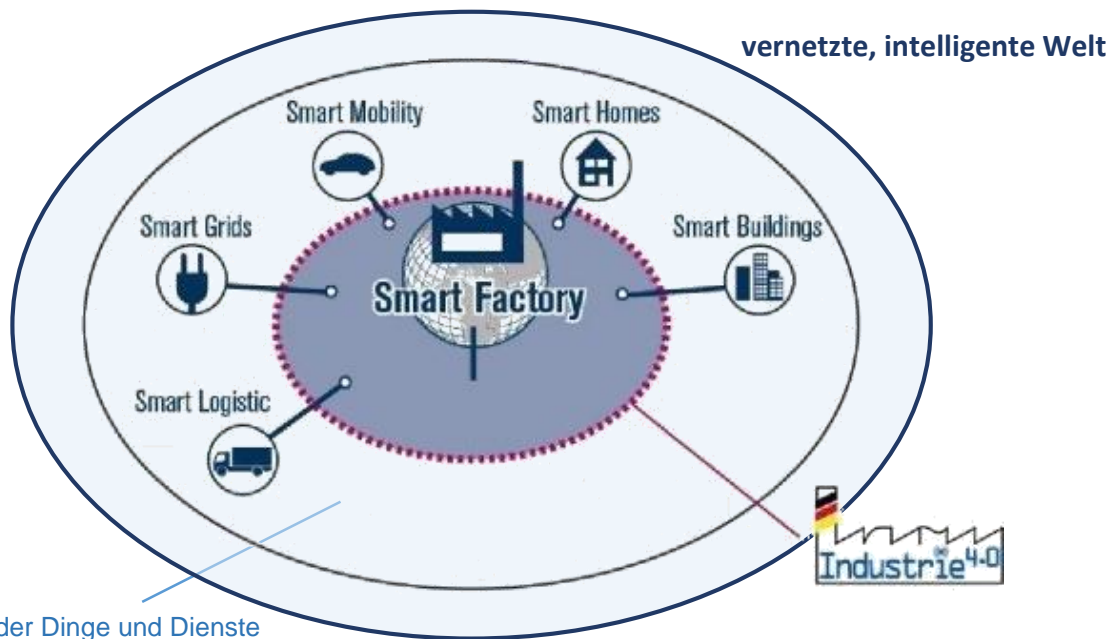


Abbildung 5: Einordnung des Industrie 4.0 Gedankens in die vernetzte, intelligente Welt

2.3 Wertschöpfung in der Smart Factory

Bevor in diesem Kapitel die Eigenschaften und Potenziale einer Smart Factory erläutert werden, um darzustellen wie in Smart Factories Wertschöpfung betrieben wird, werden zunächst die beiden Basistechnologien Cyber-physische Systeme und das Internet der Dinge und Dienste vorgestellt.

2.3.1 Cyber-physische Systeme

Cyber-physische Systeme (CPS) sind die das Basiselement einer Smart Factory. Ein CPS ist ein physisches Objekt wie eine Maschine, ein Gebäude oder ein Bauteil, das ein eingebettetes System enthält, das kommunikationsfähig ist.³¹ Eingebettete Systeme sind Rechner, auf denen eine Software läuft, die die durch Sensoren erfassten Daten auswertet, speichert und Aktuatoren steuert.³² Es ist mit Sensoren ausgestattet, die es ihm ermöglichen, unmittelbar physikalische Daten über seinen

³¹ Vgl. Bauernhansl, 2014, S. 16.

³² Vgl. Broy, 2010, S. 18.

Zustand oder seine Umwelt zu erfassen und verfügt über Aktuatoren, die es befähigt, auf physikalische Vorgänge in dieser Umwelt einzuwirken. Sein eingebettetes System kann die erfassten Daten auswerten und speichern und auf dieser Grundlage aktiv oder reaktiv mit der physischen und der digitalen Welt interagieren.³³ Die zentrale Fähigkeit eines CPS ist es, so jederzeit Echtzeitdaten über sich selbst und seine Umgebung in einem digitalen Modell der physischen Realität zur Verfügung zu stellen. Damit wird die Trennung der physischen und digitalen Welt weitgehend aufgehoben und die physische Welt und deren digitales Modell in Rechnern miteinander verschmolzen. Diese Aufhebung von Medienbrüchen ist das zentrale Paradigma der Industrie 4.0.³⁴ Die Abbildung 6 stellt den schematischen Aufbau eines CPS dar.³⁵

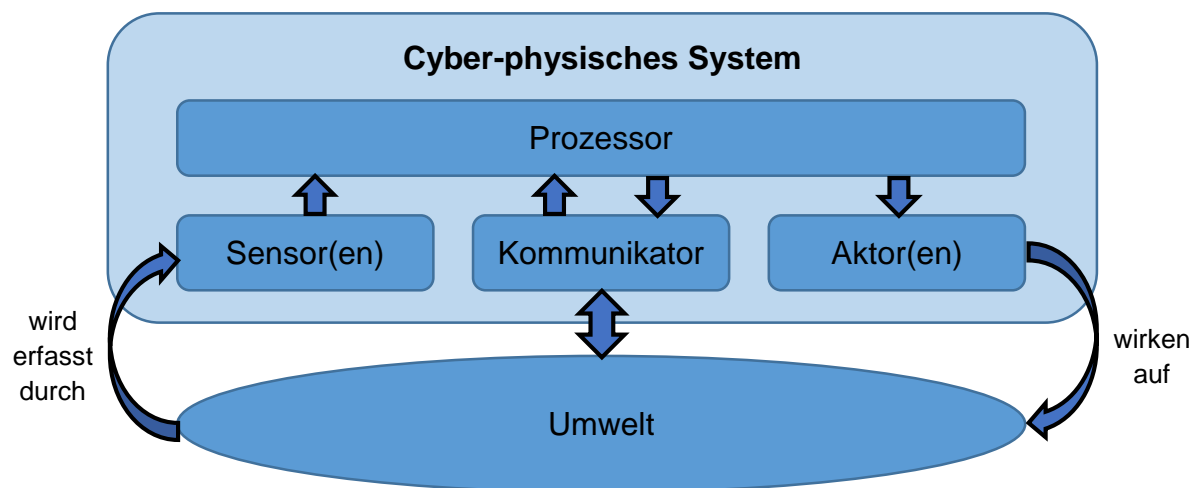


Abbildung 6: Schematischer Aufbau eines Cyber-physischen Systems

Mehrere CPS sind über digitale Netze untereinander verbunden – und zwar sowohl drahtlos als auch drahtgebunden, sowohl lokal als auch global – und nutzen weltweit verfügbare Daten und Dienste. Damit erhält jedes CPS eine eigene IP-Adresse, ist eindeutig identifizierbar und jederzeit lokalisierbar.³⁶ Der Mensch kann über multi-modale Mensch-Maschine-Schnittstellen mit den CPS kommunizieren und Einfluss auf sie nehmen. Dies kann beispielsweise über Sprache, Gesten oder Touch Displays geschehen.³⁷

³³ Vgl. Vogel-Heuser, 2014, S. 37.

³⁴ Vgl. Schlick et al., 2014, S. 58.

³⁵ Vgl. Abbildung entnommen aus: Veigt et al., 2013, S. 16.

³⁶ Vgl. Acatech, 2013, S. 25.

³⁷ Vgl. Vogel-Heuser, 2014, S. 37.

CPS sind die Union zweier bisher getrennt laufender Entwicklungen: Die globale Ausbaugang des Breitband- und Sattelitennetzes und Entwicklung von immer leistungsfähigeren Drahtlos-Netztechnologien auf der einen Seite und die Entwicklung immer komplexerer eingebetteter Systeme sowohl in Produktionsmaschinen als auch in den Produkten auf der anderen Seite. Aus dieser Verbindung eingebetteter Systeme mit dem Internet resultiert eine Fülle weitreichender Lösungs- und Anwendungsmöglichkeiten auch neben der Produktion für alle Bereiche der Gesellschaft.

2.3.2 Das Internet der Dinge und Dienste

Bisher wird das Internet als Kommunikationsplattform hauptsächlich durch soziale Netzwerke wie Facebook, LinkedIn, Twitter u.a. genutzt. Hier interagieren Millionen von Menschen, haben offene Gruppendiskussionen, stellen Daten zur Verfügung, bewerten und speichern sie. Dieses Konzept kann das „Internet der Menschen“ genannt werden.³⁸ Es wird nun auf Netzwerke zwischen Objekten übertragen. Durch die Vernetzung der CPS der Smart Factory untereinander und mit einer großen Anzahl von CPS aus anderen Domänen entsteht ein riesiger Pool an CPS, die Daten über die physikalische Welt erfassen und in Echtzeit über das Internet zur Verfügung stellen. Diesen Pool nennt man das Internet der Dinge, eine Verknüpfung eindeutig identifizierbarer physischer Objekte, die eine selbständige Kommunikation dieser untereinander ermöglicht – ähnlich dem Internet der Menschen.³⁹

Neben der Möglichkeit der selbstständigen Kommunikation zwischen Objekten ergibt sich die Möglichkeit der gegenseitigen Einflussnahme auf die physischen Zustände im Zielsystem eines Objektes über dessen Aktuatoren. So ist das Internet der Dinge, dass alle CPS verbindet, das höchste hierarchische Element der vernetzten, intelligenten Welt und die (bis dato) finale Entwicklungsstufe der eingebetteten Systeme (vgl. Abbildung 7).

³⁸ Vgl. Bauernhansl, 2014, S. 17.

³⁹ Vgl. Baum, 2013, S. 42.

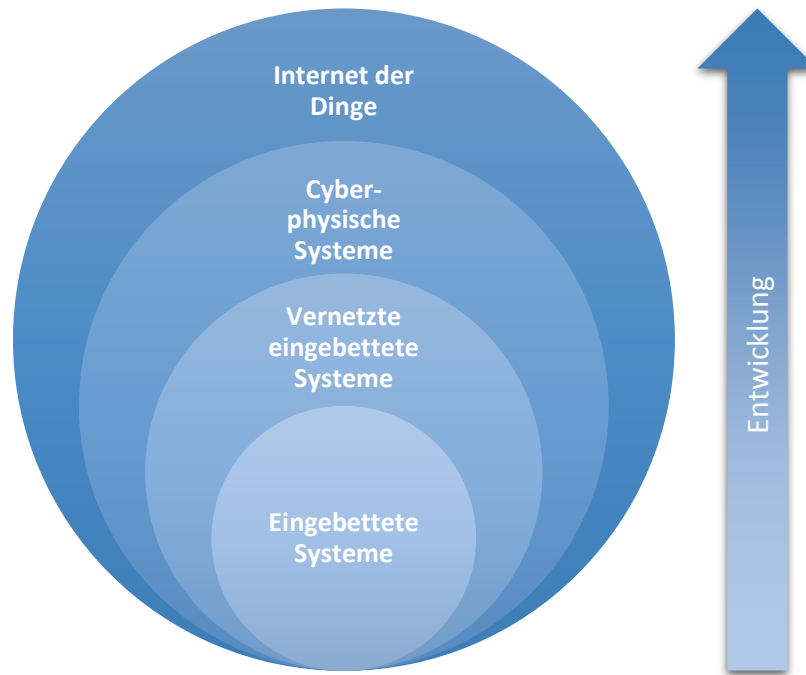


Abbildung 7: Hierarchie und Entwicklung des Internets der Dinge

Das Internet der Dienste stellt die Menge von Diensten, die von Personen oder Objekten im Internet zur Nutzung zur Verfügung gestellt werden, dar. Sie können von Menschen oder Objekten einzeln oder integriert über webbasierte Software genutzt werden.⁴⁰

Das Internet der Dinge und Dienste ist sowohl die Basis als auch die Folge der Industrie 4.0 Vision. Es entsteht erst aus der domänenübergreifenden Vernetzung von eingebetteten Systemen in Objekten und bildet gleichzeitig das Netzwerk, in dem durch Kombination ihrer die im Kapitel 2.3.1 erwähnte neue Bandbreite an Lösungs- und Anwendungsmöglichkeiten entsteht.

⁴⁰ Vgl. Acatech, 2013, S. 85.

2.3.3 Entitäten und Eigenschaften der Smart Factory

Interagieren CPS innerhalb der Produktion miteinander, um gemeinsam Aufgaben zu bewältigen, entstehen sogenannte Cyber-physische Produktionssysteme (CPPS).⁴¹ Die Smart Factory („Intelligente Fabrik“) stellt so ein CPPS dar. Ihre Intelligenz spiegelt sich in ihrer Wandlungsfähigkeit, der dezentralen Steuerung und Selbstoptimierung der Produktionsprozesse wieder. Ihre Entitäten sind das intelligente Produkt, die intelligente Maschine und der assistierte Bediener, die im Folgenden erläutert werden.⁴²

2.3.3.1 Das intelligente Produkt

Wegen ihrer CPS-Eigenschaft werden die Produkte Smart Products („Intelligente Produkte“) genannt. Sie rücken in den Mittelpunkt der Produktion. Smart Products tragen in ihren eingebetteten Systemen alle Informationen über das aus ihnen zu entstehende Produkt, dessen Produktionsparameter, notwendige Konfigurationen von Anlagen, die notwendigen Fertigungsschritte zur Erreichung des Zielzustandes, den aktuellen Zustand des Produktes u.v.m.⁴³ Ist es aufgrund wirtschaftlicher oder physischer Aspekte nicht sinnvoll, ein Produkt selbst mit einem eingebetteten System auszustatten, wird die nächst größere Transporteinheit, z.B. der Werkstückträger, entsprechend ausgestattet.⁴⁴

2.3.3.2 Die intelligente Maschine

Hans-Jürgen Warneckes Konzept der Fraktalen Fabrik folgend werden in der Smart Factory Prozessmodule als Produktionsfraktale kreiert.⁴⁵ Fraktale sind selbstständig agierende (autonome) Einheiten, deren Ziele und Leistung eindeutig beschreibbar sind, die sich selbst optimieren und organisieren und die widerspruchsfrei den

⁴¹ Vgl. Veigt et al., 2013, S. 16.

⁴² Vgl. Schlick et al., 2014, S. 59.

⁴³ Vgl. Ebenda, S. 60.

⁴⁴ Vgl. Ebenda.

⁴⁵ Vgl. Bauernhansl, 2014, S. 15.

Unternehmenszielen als Ganzes folgen (Selbstähnlichkeit).⁴⁶ Diese Einheiten können aus einzelnen oder mehreren Menschen, Maschinen oder Robotern bestehen. Die Produktionsfraktale müssen dabei auf Basis der in Abbildung 3 dargestellten externen Wandlungstreiber gebildet werden.⁴⁷ Die Größe der Produktionsfraktale hängt daher von der Komplexität der Produktionsaufgabe ab, mit steigender Komplexität nimmt der Grad der Autonomie und Dezentralisierung zu.⁴⁸ Die so entstandenen Prozessmodule werden mit Sensorik, Aktuatorik und kommunikationsfähigem eingebetteten System ausgestattet, durch Einsatz von digitalen Netzen miteinander vernetzt und stellen damit auch CPS dar. Sie kennen ihre Fähigkeiten, bieten sie als Dienst an und werden damit Teil des Internets der Dinge und Dienste.⁴⁹

Die Prozessmodule sind universell einsetzbar, d.h. ein Prozessmodul kann für unterschiedliche Aufgaben eingesetzt werden, ist je nach Anforderung gestaltbar und dimensionierbar und kann unabhängig von anderen agieren.⁵⁰ Hierbei spielen besonders sensitive Leichtbauroboter eine zentrale Rolle.⁵¹ Des Weiteren sind die Prozessmodule kompatibel, d.h. sie besitzen Schnittstellen, die es ihnen erlauben sich mit anderen Prozessmodulen zu verknüpfen. Sie sind skalierbar, d.h. räumlich, personell und technologisch erweiter- und reduzierbar und mobil, d.h. uneingeschränkt örtlich im Produktionsraum bewegbar.⁵²

2.3.3.3 Der assistierte Bediener

Die Produktionsmitarbeiter bekommen durch Programme oder Apps auf mobilen Geräten wie Smartphones, Tablets oder Smartglasses, die auf die Echtzeitdaten der CPS in der Produktion und anderen IT-Systemen im Internet der Dinge und Dienste zurückgreifen, einen transparenten Einblick in die vernetzte und dezentral gesteuerte Produktion. Die ablaufenden Produktionsprozesse werden leicht verständlich visualisiert.⁵³ Über Augmented Reality Anwendungen können relevante Informationen

⁴⁶ Vgl. Warnecke, 1995, S. 13.

⁴⁷ Vgl. Bauernhansl, 2014, S. 15.

⁴⁸ Vgl. Ebenda, S. 21.

⁴⁹ Vgl. Vogel-Heuser, 2014, S. 42.

⁵⁰ Vgl. Nyhuis / Deuse / Rehwald, 2013, S. 50.

⁵¹ Vgl. Steegmüller / Zürn, 2014, S. 118.

⁵² Vgl. Nyhuis / Deuse / Rehwald, 2013, S. 50.

⁵³ Vgl. Gorecky / Schmitt / Loskyll, 2014, S. 525.

direkt in das Sichtfeld des Mitarbeiters eingeblendet werden.⁵⁴ Damit werden Mitarbeiter z.B. bei der Instandhaltung durch Bereitstellen von Handlungsanweisungen oder bei der Überwachung von Produktionsprozessen durch Bereitstellen von entsprechenden Informationen unterstützt. Über dieselben Schnittstellen kann der Mitarbeiter auch mit den CPS interagieren.⁵⁵

In den Produktionsmodulen arbeiten Mensch und Roboter eng und ohne Schutzzäune zusammen. Das wird durch sensitive Leichtbauroboter ermöglicht, die durch Sensoren sehr feinfühlig auf ihre Umwelt reagieren können.⁵⁶ Die Roboter unterstützen die Mitarbeiter bei stark ermüdenden, kurzzyklischen und unergonomischen Tätigkeiten, damit diese sich auf ihre menschlichen Stärken der Flexibilität, Sensorik und Intelligenz konzentrieren können.⁵⁷

2.3.3.4 Der Produktionsprozess

Der Produktionsraum besteht aus in einer Matrixform angeordneten mobilen Prozessmodulen.⁵⁸ Das Intelligente Produkt kommuniziert und verhandelt selbstständig mit den Prozessmodulen über seinen nächsten Bearbeitungsschritt, welcher situationsabhängig an unterschiedlichen Prozessmodulen vorgenommen werden kann. Situationskriterien können z.B. die Anzahl zu fertigender Produkte der unterschiedlichen Typen, Aufwandsminimierung für Rüsten, Verfügbarkeit von Material, Umbau / Wartung einer Maschine etc. sein.⁵⁹ Die Produktion steuert und optimiert sich also in Echtzeit eigenständig und dezentral.⁶⁰

Durch die Mobilität der Prozessmodule kann mit wenig Aufwand jederzeit eine Änderung des Fabriklayouts durchgeführt werden und die Anordnung der Prozessmodule im Produktionsraum verändert werden. Diese Flexibilität und die Selbststeuerung durch die Produkte ermöglichen, dass jede Produktvariante einen anderen Weg durch den Produktionsraum nehmen und je nach Produktvariante und

⁵⁴ Vgl. Gorecky / Schmitt / Loskyll, 2014, S. 528.

⁵⁵ Vgl. Ebenda, S. 530.

⁵⁶ Vgl. Steegmüller / Zürn, 2014, S. 110.

⁵⁷ Vgl. Ebenda, S. 118.

⁵⁸ Vgl. Ebenda, S. 116.

⁵⁹ Vgl. Büttner, 2014, S. 131f.

⁶⁰ Vgl. Bauernhansl, 2014, S. 16.

Situation unterschiedliche Prozessmodule anfahren kann.⁶¹ So kann die Produktion sich auch bei Störungen und Änderungen der Randbedingungen kurzfristig in der Laufzeit anpassen.⁶²

2.3.4 Potenziale der Smart Factory

Durch die digitale Vernetzung der Produkte und Prozessmodule und deren Universalität, Kompatibilität, Modularität, Skalierbarkeit und Mobilität ist die Produktion wandlungsfähig und lässt sich so schnell und unkompliziert an geänderte Rahmenbedingungen anpassen. Die Wandlungsfähigkeit wird nur durch produkt-, prozessspezifische und organisatorische Anforderungen beschränkt.⁶³

Die dezentrale Selbststeuerung und –optimierung der Produktion macht es möglich, sehr stark individualisierte Produkte in kleinen Losgrößen bis hin zur Losgröße 1 in kurzen Durchlaufzeiten und mit hoher Ressourcenproduktivität und -effizienz zu produzieren.⁶⁴ Die Mensch-Maschine-Kooperation zwischen Menschen und Robotern erhöht die Produktivität in der Produktion zusätzlich.⁶⁵ Damit ist das Ziel der Mass Customization erfüllt und individualisierte Produkte können zu den Kosten einer Massenproduktion hergestellt und zu konkurrenzfähigen Preisen am Markt angeboten werden.⁶⁶ Des Weiteren ermöglicht die Erhebung und Speicherung einer Vielzahl von Daten aus der Produktion eine erhöhte Transparenz des Wertschöpfungsprozesses.⁶⁷

⁶¹ Vgl. Bauernhansl, 2014, S. 21.

⁶² Vgl. Ebenda, S. 18.

⁶³ Vgl. Steegmüller / Zürn, 2014, S. 114.

⁶⁴ Vgl. Kagermann, 2014, S. 607.

⁶⁵ Vgl. Steegmüller / Zürn, 2014, S. 118.

⁶⁶ Vgl. Kagermann, 2014, S. 607.

⁶⁷ Vgl. Bauernhansl, 2014, S. 18.

3 Materialflusssysteme in Smart Factories

Die physische Vernetzung der digital vernetzten Produktionsfraktale und Produkte untereinander muss weiterhin über Materialflusssysteme gewährleistet werden.⁶⁸ Welche konkreten Anforderungen an die Materialflusssysteme in Smart Factories gestellt werden, wie diese also charakterisiert sein müssen und über welche Konzepte die Anforderungen erfüllt werden könnten, zeigt dieses Kapitel auf. Zunächst werden die Aufgaben und der klassische Aufbau eines Materialflusssystems beschrieben.

3.1 Materialflusssysteme

Laut VDI-Richtlinie 3300 ist der Materialfluss die räumliche, zeitliche und organisatorische Verkettung aller Vorgänge bei der Gewinnung, Bearbeitung und Verteilung von Gütern innerhalb festgelegter Bereiche. Er hat also die Aufgabe, die Fertigungs- und Montageeinheiten zu verknüpfen sowie die Versorgung und Entsorgung zu gewährleisten. Dabei ist bezüglich der Bereiche zwischen dem externen Güterfluss außerhalb der Betriebs- und Grundstücksgrenzen und dem innerbetrieblichen Materialfluss innerhalb der Betriebs- und Grundstücksgrenzen, der Intralogistik, zu unterscheiden.⁶⁹ In dieser Arbeit wird ausschließlich der innerbetriebliche Materialfluss betrachtet.

Neben Bearbeiten, Prüfen und Aufenthalt sind Fördern, Handhaben und Lagern von Objekten die Hauptfunktionen des Materialflusses, die in dieser Arbeit betrachtet werden sollen.⁷⁰ Ein Materialflusssystem übernimmt die Ver- und Entsorgung der Produktion durch Erfüllung dieser Hauptfunktionen für den Werkstückfluss (Objekte: Werkstücke, Montageteile, Fertigwaren), den Werkzeugfluss (Objekte: Werkzeuge, Vorrichtungen, Prüfmittel) und für Hilfsstoffe und Abfälle. Damit ist das Materialflusssystem ein integraler Bestandteil des Produktionssystems.⁷¹

Im Folgenden werden die Hauptfunktionen näher beschrieben.

⁶⁸ Vgl. Günthner / Klenk / Tenerowicz-Wirth, 2014, S. 298.

⁶⁹ Vgl. Martin, 2011, S. 22.

⁷⁰ Vgl. Günthner, 2006, S. 14.

⁷¹ Vgl. Martin, 2011, S. 24.

3.1.1 Hauptfunktionen des Materialflusssystems

3.1.1.1 Funktion Fördern

Die Funktion Fördern bzw. Transportieren ist eine der wichtigsten Aufgaben eines Materialflusssystems. Dabei transportiert ein Transportmittel eine Transporteinheit im Rahmen eines Transportprozesses.

Die Transporteinheit ist das zu transportierende Element. Es besteht aus dem Beladungsgut und einem Ladungsträger (z.B. Paletten, Behälter, Gitterbox).⁷² Das Beladungsgut wird auf einem Ladungsträger befördert, um uniforme logistische Einheiten zu schaffen und damit eine Mechanisierung und Automatisierung des Materialflusses zu ermöglichen. Die Ladungsträger sind entweder unterfahrbar oder nicht unterfahrbar. Unterfahrbare Ladungsträger sind Großladungsträger mit einer Grundfläche von über 400 x 600 mm bis 1200 x 1200 mm, einer maximalen Tragkraft von einer Tonne und tragender, umschließender oder geschlossener Plattform. Sie werden entweder mit dem Beladungsgut oder mit nicht unterfahrbaren Ladungsträgern beladen, um ein rationelles Transportieren und Lagern zu ermöglichen. Sie können aus unterschiedlichen Materialien bestehen, schachtel-, stapel- oder zusammenklappbar sein, sind teilweise genormt und standardisiert und manchmal dem Transportgut angepasst. Sie können einfach oder mehrfach verwendbar sein. Die wichtigsten unterfahrbaren Ladungsträger sind Flachpaletten und Boxpaletten.⁷³

Nicht unterfahrbare Ladungsträger sind Kleinladungsträger (KLT) mit einer Grundfläche von maximal 400 x 600 mm, die modular auf die Europalette aufbaut und einer maximalen Tragkraft von 50 kg. Sie können aus unterschiedlichen Materialien bestehen, schachtel- oder faltbar sein, spezielle Vorrichtungen wie Abdeckungen oder Unterteilungen besitzen und mechanisch oder automatisch entleert werden.⁷⁴ Durch die Kombination der beschriebenen Merkmale der Ladungsträger ist eine Vielzahl an speziellen Ausführungen möglich. Um die Anzahl der Ausführungsvarianten zu reduzieren, werden z.B. vom Deutschen Institut für Normung Normungen erstellt.⁷⁵

⁷² Vgl. Günthner, 2006, S. 14.

⁷³ Vgl. Ebenda, S. 17f.

⁷⁴ Vgl. Martin, 2011, S. 63ff.

⁷⁵ Vgl. Günthner, 2006, S. 17f.

Die Transportmittel erfüllen die Funktion der innerbetrieblichen Raumüberbrückung der Beladungsgüter, d. h. deren horizontale und vertikale Ortsveränderung. Sie werden unterteilt nach stetiger Förderung bei kontinuierlichem Fördergutstrom (Stetigförderer) sowie nach unstetiger Förderung bei intermittierendem Fördergutstrom (Unstetigförderer).⁷⁶ Stetigförderer arbeiten über einen längeren Zeitraum ununterbrochen und benötigen kein Bedienpersonal. Be- und Entladung kann meist an allen Stellen der Transportstrecke erfolgen. Sie sind entweder flurgebunden oder flurfrei, dann aber i.d.R. schienengebunden. Dabei sind sie häufig ortsfest installiert und benötigen viel Bodenfläche. Stetigförderer lassen sich einfach automatisieren, aber die Erweiterung der Leistungsfähigkeit und Anpassung an geänderte Aufgaben ist kompliziert.⁷⁷ Unstetigförderer dahingegen arbeiten in Arbeitsspielen und werden häufig manuell bedient. Be- und Entladung geschieht im Stillstand. Sie sind entweder flurgebunden oder flurfrei, schienengebunden oder schienenfrei. Unstetigförderer lassen sich besser anpassen, sind aber kaum oder nur unter hohem Aufwand zu automatisieren.⁷⁸

Abhängig vom geplanten auszuführenden Transportvorgang, den Anforderungen des Förderortes, den Eigenschaften der Transporteinheit und den Vorgaben des Anwenders hinsichtlich Automatisierungsgrad und Flexibilität, ist das richtige Transportmittel zu wählen.⁷⁹ Damit wird eine langjährige Investition in ein Transportmittel für eine relativ spezifische Verwendung getätigt.

⁷⁶ Vgl. Günthner, 2006, S. 18.

⁷⁷ Vgl. Martin, 2011, S. 132.

⁷⁸ Vgl. Ebenda, S. 214.

⁷⁹ Vgl. Günthner, 2006, S. 19.

3.1.1.2 Funktion Handhaben

Der VDI-Richtlinie 2860 zufolge wird unter Handhaben das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen, räumlichen Anordnung von bestimmten Körpern in einem Bezugskordinatensystem verstanden. Durch Handhabungsprozesse soll also die Lage und/oder Richtung eines Transportgutes ohne größeren Transportweg geändert werden. Dabei wird im Materialfluss zwischen den Elementarfunktionen Speichern, Mengen verändern (Teilen, Vereinigen) und Bewegen (Drehen, Verschieben) unterschieden. In einem Handhabungsprozess werden Handhabungsaufgaben durch Erfüllung dieser Handhabungsfunktionen durch Handhabungsmittel erfüllt. Handhabungsmittel sind aufgrund ihrer i.d.R. hohen Personalintensität häufig automatisiert. Ein Beispiel für ein Handhabungsmittel ist eine Palettiermaschine, die eine Menge von Transportgütern auf einer Palette vereinigt.⁸⁰

3.1.1.3 Funktion Lagern

Laut VDI-Richtlinie 2411 bedeutet Lagern jedes geplante Liegen des Arbeitsgegenstandes im Materialfluss. Dies geschieht in einem Lager, einem Raum zum Aufbewahren von Stück- und/oder Schüttgut, das mengen- und/oder wertmäßig erfasst wird. Das Lager besteht aus der Lagereinrichtung, der Lagerbedienung und der Lagereinheit. Aufgaben des Lagers sind das Bevorraten, Puffern und Verteilen von Gütern. Dementsprechend gibt es Vorrats-, Puffer- und Verteillager.⁸¹

⁸⁰ Vgl. Martin, 2011, S. 323.

⁸¹ Vgl. Günthner, 2006, S. 20f.

In Vorrats- und Pufferlagern werden Rohmaterialien, Halb- oder Fertigfabrikate gelagert, um u.a. kurzfristige (Puffern) bzw. lang- und mittelfristige (Bevorraten) Liefermengen- und Lieferzeitschwankungen und zeitliche und/oder mengenmäßige Bedarfsschwankungen in der Produktion oder dem Absatz auszugleichen, u.a. damit eine kontinuierliche, reibungslose Produktion oder hohe Lieferbereitschaft gewährleistet werden kann.⁸² In Verteillagern werden Güter zur Kommissionierung bevorratet. Hier ändert sich also die Zusammensetzung der Ladeinheit zwischen Lagerzu- und Lagerabgang.⁸³

3.1.2 Steuerung eines Materialflusssystems

Die Steuerung des Materialflusses erfolgt über eine Materialflusssteuerung, die meist zentral von einem oder mehreren Materialflussrechnern übernommen wird. Die Verarbeitung echtzeitkritischer, aber logisch nicht sehr komplexer Aufgaben wird auf mehrere SPS verteilt, die dann die Fördertechnik steuern.⁸⁴ Die Steuerungspyramide ist in Abbildung 8 veranschaulicht.

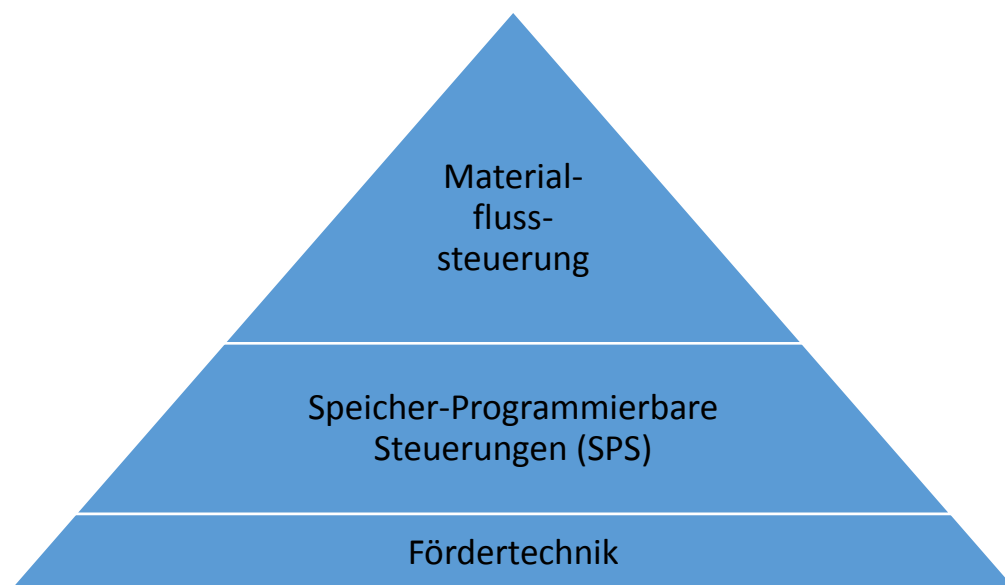


Abbildung 8: Hierarchie der klassischen Materialflusssteuerung

⁸² Vgl. Martin, 2011, S. 330.

⁸³ Vgl. Günthner, 2006, S. 21.

⁸⁴ Vgl. Günthner / Chisu / Kuzmany, S. 43.

3.1.3 Planung eines Materialflusssystemes

Aus der Kombination der verschiedenen Funktionselemente der Materialflusstechniken wird im Rahmen der Logistikplanung eines Standortes ein Materialflusssystem gestaltet. Dieses unterteilt sich anhand der Materialflussfunktionen in ein Lager- und Kommissioniersystem und ein Transport- und Handhabungssystem.

Ähnlich wie bei den Produktionsabläufen, die bisher nur hochproduktiv und automatisiert oder flexibel und manuell geplant werden konnten, besteht hier die Wahl zwischen Automatisierung einerseits, die durch leistungsfähige Stetigförderer und automatisierte Lagerbediengeräte und Handhabungsmittel erreicht werden kann oder Flexibilität durch Einsatz weniger leistungsfähiger Unstetigförderer und manueller Lagerbedienung und Handhabung andererseits. Im Planungsprozess wird die Grenzleistung des Materialflusssystemes auf Basis von statistischen Auswertungen und unter zu Hilfenahme von Simulationen analysiert und festgeschrieben.⁸⁵ Dabei wird unterstellt, dass sich die Rahmenbedingungen in der Produktion, die sich selber dem Markt anpassen muss, auf mehrere Jahre nicht ändern und sich so über die Jahre eine Amortisation der Investitionen in unflexible Materialflusskomponenten ergibt.⁸⁶ Eine dynamische Anpassung der Leistungsfähigkeit des Materialflusssystemes ist nur in Grenzen möglich. Eine Neuplanung, Erweiterung oder ein Komponententausch zieht i.d.R. einen hohen Aufwand in der Anpassung der Steuerung nach sich, die zu Stillstandzeiten führt.⁸⁷ Damit ist ein unter der Prämisse der Kontinuität geplantes Materialflusssystem in keiner Weise flexibel und für den Einsatz in einer wandlungsfähigen Produktionsumgebung geeignet.⁸⁸

In welchen Dimensionen sich die Leistungsfähigkeit des Materialflusssystemes allerdings anpassen lassen muss, um den Anforderungen einer Smart Factory zu genügen, wird im nächsten Kapitel dargestellt.

⁸⁵ Vgl. Ten Hompel / Henke, 2014, S. 617.

⁸⁶ Vgl. Günthner, 2006, S. 30.

⁸⁷ Vgl. Lieberoth-Leden, 2015, S. 1.

⁸⁸ Vgl. Ten Hompel / Henke, 2014, S. 617.

3.2 Anforderungen an Materialflusssysteme in Smart Factories

Da das Materialflusssystem integraler Bestandteil des Produktionssystems ist und das topologieflexible Wertschöpfungsnetz einer Smart Factory physisch verkettet muss, kann die Smart Factory nur so flexibel und wandlungsfähig sein, wie es auch ihr Materialflusssystem ist.⁸⁹ Daher muss das Materialflusssystem dieselben Anforderungen wie die Prozessmodule der Smart Factory erfüllen. Demzufolge stellen sich auch an das Materialflusssystem einer Smart Factory die Anforderungen der Flexibilität, Wandlungsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und Komplexitätsreduktion. Im Folgenden werden diese Anforderungen näher erläutert.

3.2.1 Flexibilität

Ein System ist eine Menge von geordneten Elementen, die durch Relationen verknüpft sind. Die Struktur eines Systems bezeichnet die Menge der Relationen zwischen den Elementen eines Systems.⁹⁰ Die Elemente eines Materialflusssystems sind sowohl seine Förder-, Lager- und Handhabungsmittel als auch die Ladeeinheiten und Mitarbeiter. Es kann – wie jedes andere System – grundsätzlich durch zwei Aktionen verändert werden: Strukturkopplung und Transformation. Eine Strukturkopplung meint eine Neuvernetzung der Relationen zwischen den Systemelementen und damit eine Veränderung der Systemeigenschaften. Im Rahmen der im System bereits vorhandenen Potenziale kann somit eine Anpassung an geänderte Randbedingungen stattfinden. Eine Transformation meint dahingegen den Austausch oder das Hinzufügen von Systemelementen. Damit findet eine Erhöhung des Systempotenzials statt, um eine Anpassung an geänderte Randbedingungen zu ermöglichen, die mit dem ursprünglichen Systempotenzial nicht möglich gewesen wären.⁹¹

Wie weiter oben schon beschrieben, beschreibt die Flexibilität die Fähigkeit eines Systems, sich in einem vorgeplanten Handlungsspielraum ohne jegliche Umbaumaßnahme und nur durch Änderung der Verknüpfung der Materialflusselemente – also Strukturkopplung – an Veränderungen der

⁸⁹ Vgl. Günthner / Klenk / Tenerowicz-Wirth, 2014, S. 321.

⁹⁰ Vgl. Alisch / Winter / Arentzen, 2004, S. 2874f.

⁹¹ Vgl. Günthner, 2006, S. 74.

Randbedingungen anzupassen.⁹² Die sich ändernden Randbedingungen werden auch Wandlungstreiber genannt.⁹³ Die Wandlungstreiber, an die sich ein Materialflusssystem anpassen muss, stammen aus dem Produktionssystem. In dem dynamischen Produktionssystem einer Smart Factory ändern sich die Produktspektren, die Materialflüsse zwischen den mobilen Prozessmodulen und die Produktionsleistung und –schwankung schnell und unerwartet. Die notwendige Anpassung des Materialflusssystems geschieht in den Dimensionen des Wandels, die für die Materialflussfunktion „Fördern“ in Tabelle 1 aufgeführt und den Wandlungstreibern zugeordnet sind. Den Wandlungstreibern entsprechend wird die nötige Flexibilität des Materialflusssystems in Fördergut-, Layout- und Durchsatzflexibilität unterteilt.

Produktionssystem		Materialflusssystem	
Wandlungstreiber	Flexibilitätsart	Dimension des Wandels	
Produktspektren	Fördergutflexibilität	Anzahl von Ladeeinheiten	
		Größe von Ladeeinheiten	
Materialflüsse	Layoutflexibilität	Ort der Übergabepplätze	
		Verlauf der Förderstrecke	
Produktionsleistung und -schwankung	Durchsatzflexibilität	Durchsatz (Transporteinheiten / h)	

Tabelle 1: Wandlungstreiber und ihre Flexibilitätsarten und Dimensionen des Wandels

Es folgt eine Beschreibung der drei Flexibilitätsarten und derer möglichen Ausprägungen.

⁹² Vgl. Günthner, 2006, S. 31f.

⁹³ Vgl. Nyhuis / Deuse / Rehwald, 2013, S. 21.

3.2.1.1 Fördergutflexibilität

Die Fördergutflexibilität beschreibt die Fähigkeit eines Materialflusssystems sich in einem vorgeplanten Korridor ohne jegliche Umbaumaßnahme und nur durch Strukturkopplung an Veränderungen der Produktspektren anzupassen. Dies geschieht für die Materialflussfunktion Fördern durch die Änderung der Anzahl und Größe von Ladeeinheiten, die gleichzeitig gefördert werden können. Die Ausprägung der Fördergutflexibilität wird durch die Ausprägung der in Tabelle 2 aufgeführten Variablen bestimmt.⁹⁴ Die Verwendung von standardisierten Ladehilfsmitteln wie z.B. der Europalette garantieren Flexibilität bezüglich der auf ihnen transportierbaren Güter, d.h. innerhalb der Grenzen der ausgewählten Ladehilfsmittel ist das Materialflusssystem flexibel.⁹⁵ Umso höher die maximale Tragkraft und umso größer das Abmaß des Standardladehilfsmittel ist, desto mehr unterschiedliche Güter finden darauf Platz und desto höher ist die Fördergutflexibilität. Die in der Tabelle 2 aufgeführten Ausprägungen beziehen sich auf geschlossene Behälter.

Variable	Mögliche Ausprägungen	
	Wert	Bezeichnung
Verwendung von Standardladehilfsmitteln	1	KLT-Behälter 300 x 200 mm, 50 kg
	2	KLT-Behälter 400 x 300 mm, 50 kg
	3	KLT-Behälter 600 x 400 mm, 50 kg
	4	Gitterbox 1200 x 800 mm, 500 kg
	5	Paloxe 1200 x 1000 mm, 600 kg
Variabilität des Lastaufnahmemittels des Fördermittels	1	Anzahl und Größe von Ladeeinheiten fix
	2	Anzahl und Größe von Ladeeinheiten in einer Dimension variabel
	3	Anzahl und Größe von Ladeeinheiten in zwei Dimensionen variabel

Tabelle 2: Variablen und mögliche Ausprägungen der Fördergutflexibilität für die Materialflussfunktion „Fördern“

⁹⁴ Vgl. Günthner, 2006, S. 58ff.

⁹⁵ Vgl. Ebenda, S. 58.

Das Lastaufnahmemittel des Fördermittels beschränkt die Anzahl und Größe von Ladeeinheiten, die es aufnehmen kann. Die Ausprägung der Variabilität des Lastaufnahmemittels beeinflusst also auch die Fördergutflexibilität.

3.2.1.2 Layoutflexibilität

Die Layoutflexibilität beschreibt die Fähigkeit eines Materialflusssystems sich in einem vorgeplanten Korridor ohne jegliche Umbaumaßnahme und nur durch Strukturkopplung an Veränderungen der Materialflüsse in der Produktion anzupassen.⁹⁶ Dies geschieht für die Materialflussfunktion Fördern durch die Änderung des Ortes der Übergabeplätze und den Verlauf der Förderstrecke. Die Ausprägung der Layoutflexibilität wird durch die Ausprägung der in Tabelle 3 aufgeführten Variablen bestimmt.⁹⁷ Dabei sind die Übergabeplätze an das Fördermittel maßgeblich, da sie die Schnittstelle zwischen Fördermittel und Produktionsbereichen, Arbeitsplätzen oder anderen Fördersystemen darstellen und damit direkt von einem veränderten Materialfluss betroffen sind.

Variable	Mögliche Ausprägungen	
	Wert	Bezeichnung
Variabilität des Ortes der Übergabeplätze in der Höhe	1	Übergabeplätze in der Höhe fix
	2	Übergabeplätze in der Höhe variabel
Variabilität des Ortes der Übergabeplätze in der Ebene	1	Feste Förderstrecke und räumliche Fixierung der Übergabeplätze
	2	Übergabeplätze variabel innerhalb einer festen Förderstrecke
	3	Übergabeplätze variabel innerhalb einer variablen Förderstrecke (im Rahmen zur Verfügung stehender Transportwege)
	4	Übergabeplätze unabhängig vom Layout

Tabelle 3: Variablen und mögliche Ausprägungen der Layoutflexibilität für die Materialflussfunktion „Fördern“

⁹⁶ Vgl. Günthner, 2006, S. 46.

⁹⁷ Vgl. Tabelle modifiziert entnommen aus: Günthner, 2006, S. 52f.

Haben beispielsweise die Planer eines Materialflusssystem in Erwartung zukünftiger Änderungen der Transportbeziehungen zwischen einzelnen Fertigungseinrichtungen aufgrund geänderter Produktionstechniken eine feste Förderstrecke mit variabel verteilbaren Übergabeplätzen installiert und es tritt zum Zeitpunkt n tatsächlich eine Umstellung der Produktionstechnik in Kraft, die einen veränderten Materialfluss zwischen an der Förderstrecke befindlichen Fertigungseinrichtungen nach sich zöge, könnte das Materialflusssystem ohne jegliche Umbaumaßnahme nur durch Verschiebung der Übergabeplätze entlang der Förderstrecke (Strukturkopplung) angepasst werden. Die Layoutflexibilität wäre also ausreichend, um sich an die Veränderung der Materialflüsse anzupassen. Sorgt die Umstellung der Produktionstechnik allerdings für einen veränderten Materialfluss zwischen an der Förderstrecke befindlichen Fertigungseinrichtungen und anderen Fertigungseinrichtungen, die nicht an der Förderstrecke liegen, kann das Materialflusssystem nicht mit dem verfügbaren Flexibilitätspotenzial angepasst werden.

3.2.1.3 Durchsatzflexibilität

Die Durchsatzflexibilität beschreibt die Fähigkeit eines Materialflusssystem sich in einem vorgeplanten Korridor ohne jegliche Umbaumaßnahme und nur durch Strukturkopplung an Veränderungen der Produktionsleistung und -schwankung anzupassen. Dies geschieht für die Materialflussfunktion Fördern durch die Änderung des möglichen Durchsatzes. Zunächst ist die relative Leistungsreserve des Materialflusssystem in Transporteinheiten (TE) pro Zeiteinheit zu betrachten. Sie ergibt sich aus dem Quotient aus dem Ist-Durchsatz zum Bewertungszeitpunkt und dem maximal möglichen Durchsatz des Systems: ⁹⁸

$$\text{Leistungsreserve} = \frac{\text{Ist - Durchsatz [TE/h]}}{\text{Maximaler Durchsatz [TE/h]}}$$

⁹⁸ Vgl. Günthner, 2006, S. 54.

Damit ist aber nur eine Aussage über die quantitative Durchsatzflexibilität des Materialflusssystemes getroffen, die alleine nicht ausreicht, um eine Aussage über die Durchsatzflexibilität zu treffen. Das Materialflusssystem muss auch den qualitativen layouttechnischen Anforderungen von veränderten Materialflüssen im Produktionsraum genügen, damit die Durchsatzleistung auch effektiv genutzt werden kann. Einige die Ausprägung der Durchsatzflexibilität beeinflussende Variablen werden in Tabelle 4 aufgeführt.⁹⁹ Die Auflistung ist nicht abschließend. Die die Durchsatzflexibilität beeinflussenden Variablen differieren zwischen den Fördermitteln.

Variable	Mögliche Ausprägungen	
	Wert	Bezeichnung
Variabilität der Materialflussrichtung	1	Materialfluss in einer Richtung
	2	Materialfluss richtungsunabhängig
Variabilität der Fördermittelfahrgeschwindigkeit	1	Fördermittelfahrgeschwindigkeit fix
	2	Fördermittelfahrgeschwindigkeit variabel
Variabilität der Fördermittelhubgeschwindigkeit	1	Fördermittelhubgeschwindigkeit fix
	2	Fördermittelhubgeschwindigkeit variabel
Variabilität der Fördermittelanzahl	1	Fördermittelanzahl fix
	2	Fördermittelanzahl variabel
Variabilität der Zahl der Übergabepplätze	1	Zahl der Übergabepplätze fix
	2	Zahl der Übergabepplätze variabel
Variabilität der Förderstrecke	1	Hinzufügen neuer / Veränderung bestehender Förderstrecken nicht möglich
	2	Hinzufügen neuer / Veränderung bestehender Förderstrecken möglich
Variabilität der Anzahl der gleichzeitig zu befördernden Transporteinheiten	1	Anzahl der gleichzeitig zu befördernden Transporteinheiten fix
	2	Anzahl der gleichzeitig zu befördernden Transporteinheiten variabel

Tabelle 4: Variablen und mögliche Ausprägungen der Durchsatzflexibilität für die Materialflussfunktion „Fördern“

⁹⁹ Vgl. Günthner, 2006, S. 54ff.

Hierbei wird ersichtlich, dass die Durchsatzflexibilität abhängig ist von der Layout- und Fördergutflexibilität. So ist beispielsweise die Ausprägung der Variable „Variabilität der Zahl der Übergabepplätze“ abhängig von der Ausprägung der Variable „Variabilität des Ortes der Übergabepplätze in der Ebene“ der Layoutflexibilität. Eine feste Förderstrecke und räumliche Fixierung der Übergabepplätze im Layout lässt auch keine Erweiterung der Zahl der Übergabepplätze zu. Die Ausprägung der Variable „Variabilität der Anzahl der gleichzeitig zu befördernden Transporteinheiten“ ist abhängig von der Ausprägung der Variable „Variabilität des Lastaufnahmemittels des Fördermittels“ der Fördergutflexibilität. Eine Erhöhung der Anzahl der gleichzeitig zu befördernden Transporteinheiten ist nur durch einen Austausch des Lastaufnahmemittels möglich, was nur möglich ist, wenn das Lastaufnahmemittel des Fördermittels variabel ist.

Der Handlungsspielraum eines Materialflusssystem ergibt sich aus der Ausprägung der drei Flexibilitätsarten Fördergutflexibilität, Layoutflexibilität und Durchsatzflexibilität und ist in Abbildung 9 veranschaulicht.¹⁰⁰

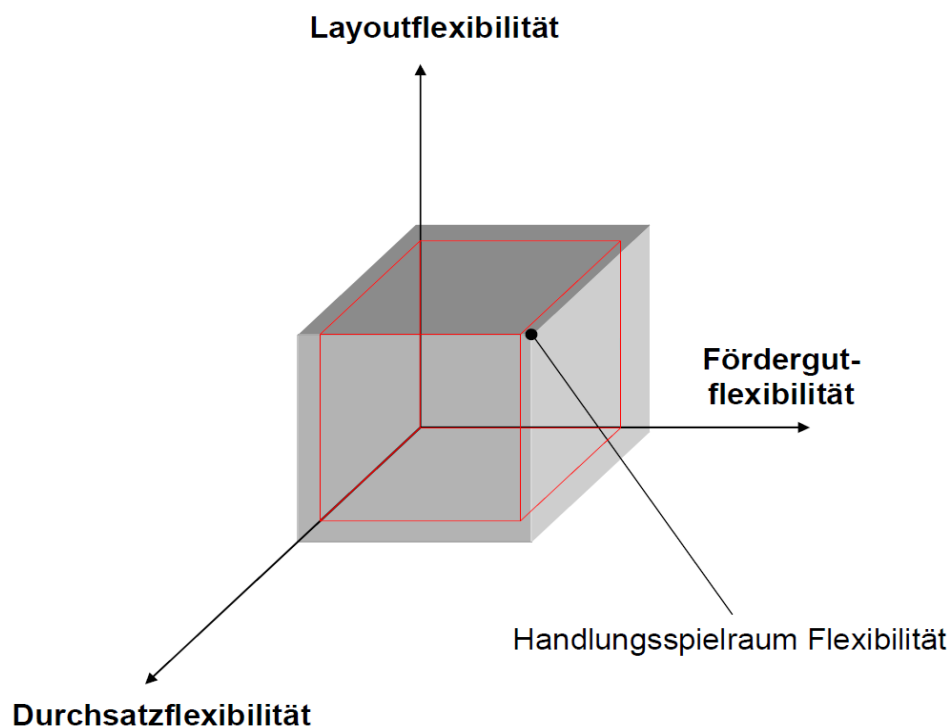


Abbildung 9: Handlungsspielraum durch Flexibilität

¹⁰⁰ Vgl. Abbildung modifiziert entnommen aus: Günthner, 2006, S. 46.

Der Handlungsspielraum und damit auch die Flexibilität eines Materialflusssystems wird schon in der Planungsphase auf Basis von zu diesem Zeitpunkt von den Planern zukünftig erwarteten Veränderungen der Produktspektren, Materialflüsse und Produktionsleistung und -schwankung definiert.¹⁰¹ An Veränderungen der Ausprägungen dieser Dimensionen im erwarteten Handlungsspielraum kann sich das flexible Materialflusssystem ohne Umbaumaßnahmen durch Strukturkopplung anpassen.

Wie in der Einleitung dargestellt sind die Absatzmärkte der Zukunft höchst volatil, weswegen die Prognostizierbarkeit von Markt- und Nachfrageentwicklungen in den letzten Jahren immer weiter gesunken ist.¹⁰² Die bei Planung des Materialflusssystems eingeplante Flexibilität wird also zu einem Zeitpunkt, an dem unerwartete Ereignisse zu stärkeren als den erwarteten Veränderungen führen, nicht mehr ausreichen, um die für die bedarfsgerechte Leistungserbringung nötige Anpassung des Materialflusssystems an das Produktionssystem zu gewährleisten. Dann muss das System transformiert werden, um das Systempotenzial zu erhöhen und die Anpassung an geänderte Randbedingungen zu ermöglichen. Geschieht das, sprechen wir von einem Wandel. Das Materialflusssystem muss also zusätzlich wandlungsfähig sein, um sich auch einem unerwartet veränderten Produktionssystem anpassen zu können.

3.2.2 Wandlungsfähigkeit

Die Wandlungsfähigkeit beschreibt in Erweiterung der Flexibilität die Fähigkeit eines Systems (Unternehmen, Produktion etc.), über den vordefinierten Handlungsspielraum hinaus auf unerwartete Veränderungen der Randbedingungen mit relativ geringem Aufwand reagieren und das zu diesem Zeitpunkt benötigte Flexibilitätspotenzial zur Verfügung stellen zu können. Die Flexibilität ist dabei integraler Bestandteil der Wandlungsfähigkeit.¹⁰³ Ihre Eigenschaften werden um die Anforderungen der Erweiterungsfähigkeit und Integrationsfähigkeit erweitert.

Die Erweiterungsfähigkeit beschreibt die Möglichkeit, ein bestehendes Materialflusssystem durch Hinzufügen von systemeigenen Bauteilen und Fahrzeugen

¹⁰¹ Vgl. Günthner, 2006, S. 32.

¹⁰² Vgl. Kuzmany, 2010, S. 5.

¹⁰³ Vgl. Günthner, 2006, S. 36.

zu erweitern.¹⁰⁴ Die Integrationsfähigkeit dahingegen beschreibt die Möglichkeit, ein bestehendes Materialflusssystem durch Hinzufügen von verschiedenartigen Materialflusssystemen zu erweitern.¹⁰⁵ Es handelt sich bei beiden Möglichkeiten um eine Systemtransformation mit dem Ziel das Systempotenzial zu erhöhen, um eine Anpassung des Materialflusssystems an geänderte Randbedingungen zu ermöglichen, die den durch Flexibilität zur Verfügung stehenden Handlungsspielraum übersteigen. Die Transformation führt zu einer höheren Ausprägung mindestens einer der Flexibilitätsarten und damit zu einer Vergrößerung des Handlungsspielraums.

Führt beispielsweise eine unerwartete negative Berichterstattung über Produkteigenschaften eines Konkurrenzproduktes zu einer rapiden Erhöhung der Nachfrage für ein Produkt und damit zu einer ebenso rapiden Erhöhung der Produktionsleistung und kann die dafür erforderliche Durchsatzleistung des Materialflusssystems nicht durch das Aktivieren des im Flexibilitätskorridor der Durchsatzflexibilität zur Verfügung stehenden Flexibilitätspotenzials ausreichend zur Verfügung gestellt werden, kann die Durchsatzflexibilität durch das Hinzufügen systemeigener Fördermittel erhöht werden. Der in diesem Szenario erweiterte Handlungsspielraum ist in Abbildung 10 veranschaulicht.¹⁰⁶

¹⁰⁴ Vgl. Günthner, 2006, S. 48.

¹⁰⁵ Vgl. Günthner, 2006, S. 49f.

¹⁰⁶ Vgl. Abbildung modifiziert entnommen aus: Günthner, 2006, S. 49.

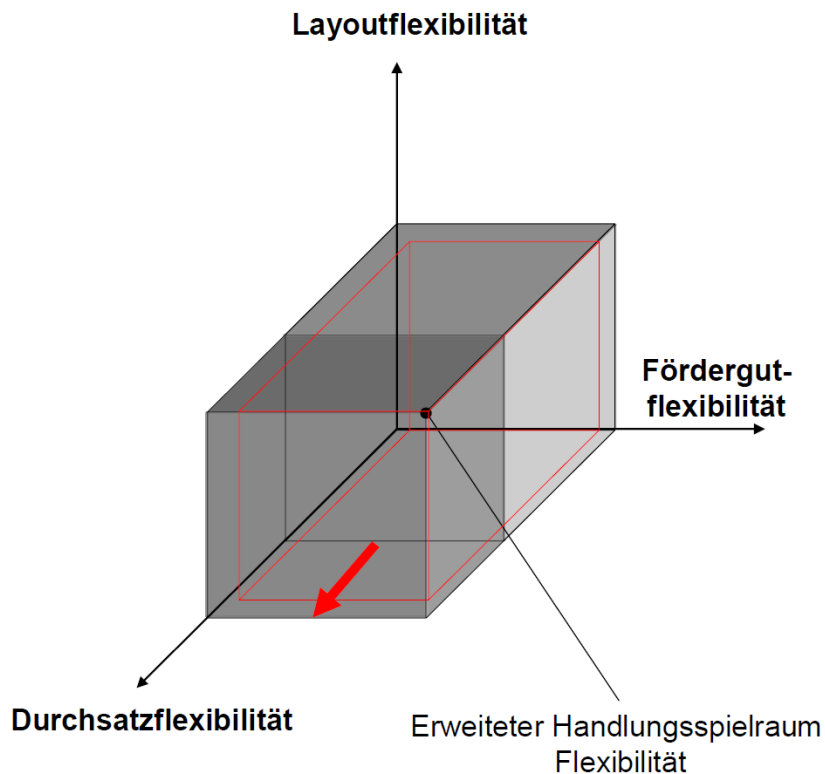


Abbildung 10: Erweiterter Handlungsspielraum durch Wandlungsfähigkeit

3.2.3 Wirtschaftlichkeit

Das Materialflusssystem muss aber auch wirtschaftlich betrieben werden, d.h. der Ertrag, den es durch seine Leistung ermöglicht, muss größer sein als die Aufwendungen, die nötig sind, um diesen Ertrag zu ermöglichen. Die Kennzahl Wirtschaftlichkeit beschreibt also das Verhältnis von Erträgen zu Aufwendungen bzw. bei Betriebszweckmäßigkeit Leistungen zu Kosten: ¹⁰⁷

$$\text{Wirtschaftlichkeit} = \frac{\text{Erträge}}{\text{Aufwendungen}} = \frac{\text{Leistung}}{\text{Kosten}}$$

Die Leistungserstellung erfolgt im Produktionsunternehmen im Produktionssystem. Das Materialflusssystem ist, wie oben beschrieben, integraler Teil des Produktionssystems und beeinflusst somit die Leistungserstellung. Um diese in der wandlungsfähigen Produktionsumgebung einer Smart Factory zu unterstützen, muss

¹⁰⁷ Vgl. Weber / Dommermuth / Hauer, 2012, S. 120.

das Materialflusssystem wandlungsfähig sein. Seine zu erbringende Leistung steht also fest, fraglich ist nur, zu welchen Kosten diese Wandlungsfähigkeit zur Verfügung gestellt wird. Hierfür ist zunächst die Betrachtung der Kosten der Wandlungsfähigkeit, im Weiteren Wandlungskosten genannt, nötig. Diese setzen sich zusammen aus Investitionskosten und den Kosten für die im Betrieb anfallenden Wandlungsprozesse. Die Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Kostenstruktur.¹⁰⁸

Investitionskosten	Wandlungsprozesskosten	
	Direkte Kosten	Indirekte Kosten
<ul style="list-style-type: none"> • Anfangsinvestition • Erweiterungs- und Integrationsinvestitionen 	<ul style="list-style-type: none"> • Um- und Abbau • Wiederherstellung der Prozessfähigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Entgangener Gewinn durch Produktionsausfall • Mehrarbeit • Bestandskosten

Tabelle 5: Kostenstruktur wandlungsfähiger Materialflusssysteme

Die Anfangsinvestition fällt bei der Beschaffung des Materialflusssystems an. Sie ist umso höher desto flexibler das System ist. Diese Flexibilität, die dem Materialflusssystem von Anfang an innewohnt, nennt sich *Basisflexibilität*.¹⁰⁹ Erweiterungs- und Integrationsinvestitionen entstehen, wenn zusätzliche systemeigene bzw. –fremde Systemelemente beschafft werden müssen, um den durch die Basisflexibilität zur Verfügung gestellten Handlungsspielraum zu vergrößern. Geschieht eine solche Investition geplant aufgrund erwarteter Veränderungen der Wandlungstreiber, nennt sich die so geschaffte Flexibilität *Erweiterte Flexibilität*.¹¹⁰ Geschieht sie ungeplant aufgrund unerwarteter Veränderungen der Wandlungstreiber, entspricht dies der Definition von Wandlungsfähigkeit. In beiden Fällen sind die Gesamtkosten für Erweiterungs- und Integrationsinvestitionen im Lebenszyklus der Fabrik umso kleiner desto höher die Basisflexibilität ist.

¹⁰⁸ Vgl. Günthner, 2006, S. 39.

¹⁰⁹ Vgl. Ebenda, S. 32.

¹¹⁰ Vgl. Ebenda.

Die Wandlungsprozesskosten entsprechen dem variablen Teil der Wandlungskosten.¹¹¹ Sie entstehen nur bei Erweiterung oder Integration des Materialflusssystem, also wenn der Handlungsspielraum vergrößert werden muss. Sie werden unterteilt in direkte und indirekte Kosten. Direkte Kosten entstehen unmittelbar durch den nötigen Um- und Abbau und die darauf folgende Wiederherstellung der Prozessfähigkeit durch Personal. Diese Maßnahmen benötigen Zeit und Energie und führen damit zu indirekten Kosten wie entgangenem Gewinn durch den vorübergehenden Produktionsausfall, Mehrarbeit und Bestandskosten für liegen gebliebene und zu lagernde Transporteinheiten. Auch die Wandlungsprozesskosten sind umso kleiner desto höher die Basisflexibilität ist.

Es lässt sich also feststellen, dass es mehrere Wege gibt, ein wandlungsfähiges Materialflusssystem zu planen. Die zwei wichtigsten Faktoren sind dabei die Basisflexibilität und Erweiterungs- bzw. Integrationsinvestitionen.

So ist es beispielsweise möglich, ein Materialflusssystem mit höchstmöglicher Basisflexibilität zu planen. Dies würde dazu führen, dass das System auch ohne Erweiterungs- und Integrationsfähigkeit wandlungsfähig wäre, würde allerdings immense Kosten für die Anfangsinvestition nach sich ziehen und dazu führen, dass große Teile des installierten Flexibilitätspotenzials für die meiste Zeit ungenutzt sein würde (Vgl. Abbildung 12). Die Wandlungskosten für dieses System wären sehr hoch.

Das andere Extremum wäre ein Materialflusssystem mit einer sehr kleinen Basisflexibilität, das wegen seinem kleinen Handlungsspielraum sehr häufig erweitert oder integriert werden müsste. Die Kosten für Erweiterungs- und Integrationsinvestitionen und die Wandlungsprozesskosten wären über den Lebenszyklus der Fabrik sehr hoch. Auch die Wandlungskosten dieses Systems wären also sehr hoch.

Vielmehr ist es bei der Planung eines Materialflusssystem wichtig, die richtige Basisflexibilität zu identifizieren und den Handlungsspielraum des Systems bei Bedarf zu vergrößern. Dabei ermöglichen die Erweiterungsmöglichkeit und Integrationsmöglichkeit, das zum Zeitpunkt n benötigte Flexibilitätspotenzial durch eine Investition in Erweiterung oder Integration neuer Systemelemente bedarfsgerecht

¹¹¹ Vgl. Günthner, 2006, S. 38.

zur Verfügung zu stellen. Den Einfluss der Basisflexibilität auf die Wandlungskosten fast die Abbildung 11 schematisch zusammen.

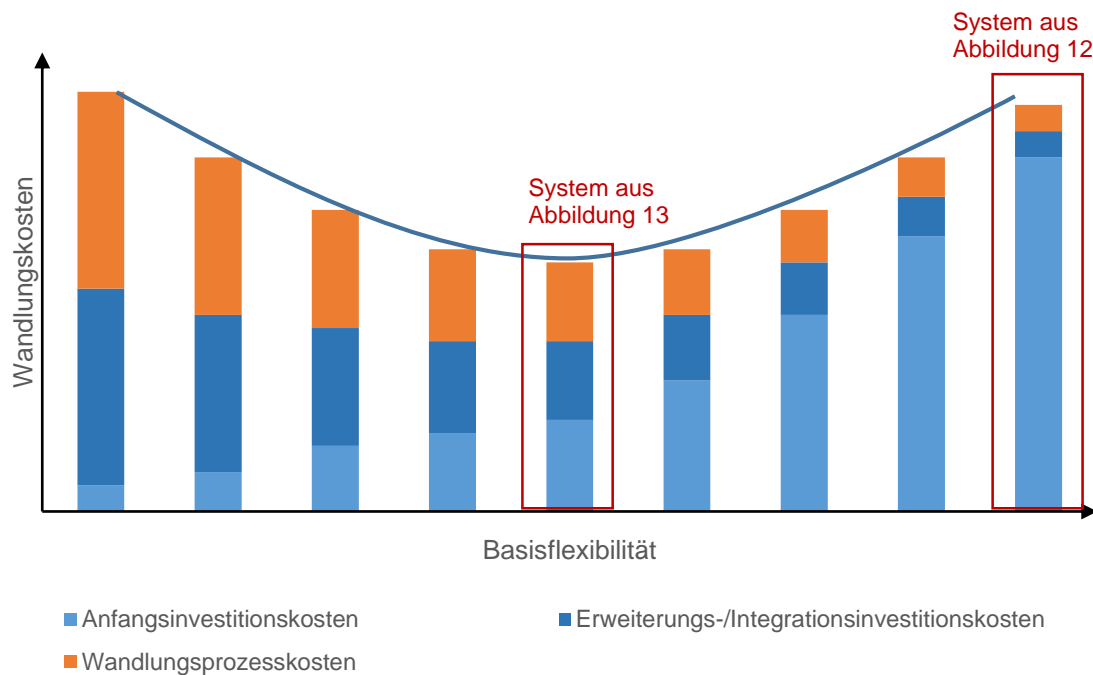


Abbildung 11: Einfluss der Basisflexibilität auf die Wandlungskosten

Es zeigt sich, dass Anfangsinvestitionskosten einerseits und Erweiterungs- bzw. Integrationsinvestitionskosten und Wandlungsprozesskosten andererseits im Zielkonflikt zueinander stehen. Ziel sollte es sein, eine optimale Basisflexibilität zu wählen, bei der die Wandlungskosten minimal sind. Diese ist abhängig vom Produktionssystem und muss für jedes Materialflusssystem spezifisch ermittelt werden. Einen möglichen zeitlichen Verlauf der Investitionen ausgehend von einer optimalen Basisflexibilität veranschaulicht Abbildung 13.¹¹² Abbildung 12 stellt den Vergleich zum weiter oben beschriebenen System mit höchstmöglicher Basisflexibilität her.¹¹³

¹¹² Vgl. Abbildung modifiziert entnommen aus: Günthner, 2006, S. 36.

¹¹³ Vgl. Abbildung modifiziert entnommen aus: Günthner, 2006, S. 36.

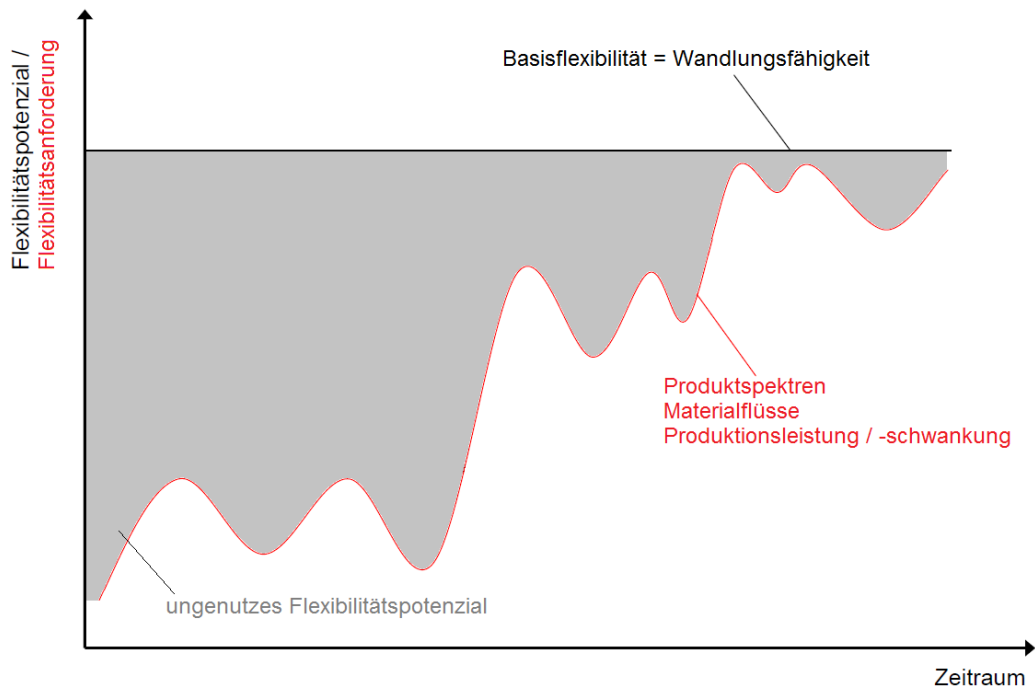


Abbildung 12: Investition in sehr hohe Basisflexibilität im Zeitverlauf

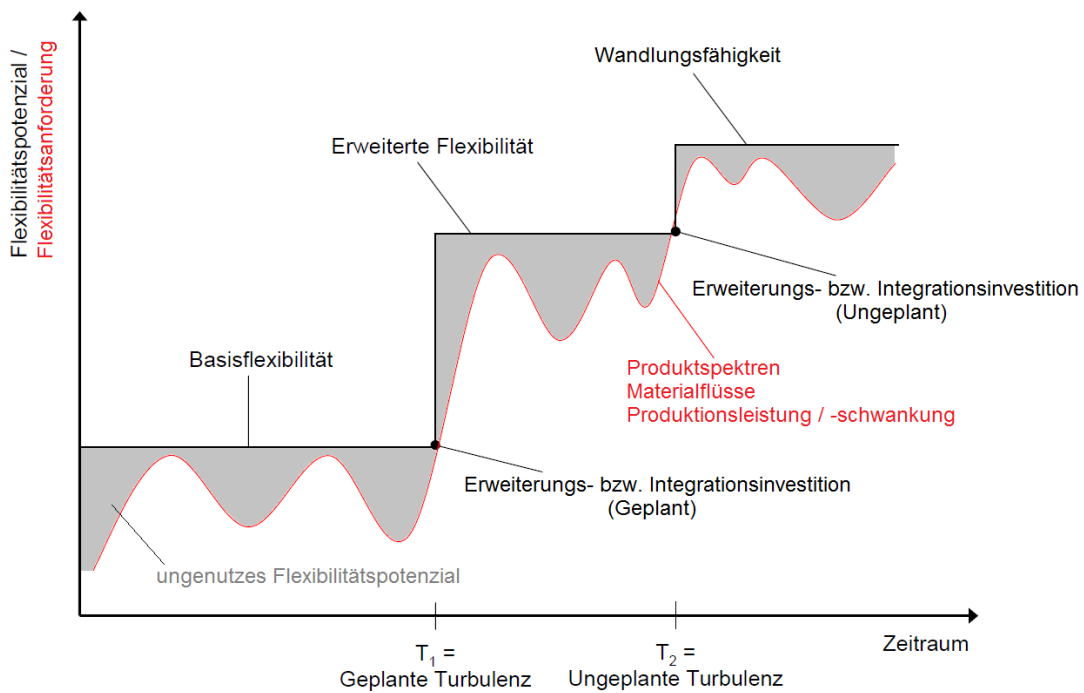


Abbildung 13: Bedarfsnahe Anpassung des Flexibilitätspotenzials durch Erweiterung bzw. Integration

3.2.4 Komplexitätsreduktion

Komplexität beschreibt die Eigenschaft eines Systems, durch eine hohe Zahl an Elementen, Verbindungen und Interdependenzen zwischen diesen Elementen nur noch schwer erfass- und beschreibbar zu sein. Diese Eigenschaft ist nicht objektiv wahrnehmbar sondern abhängig vom Beobachter, dem Detaillierungsgrad der Beobachtung und der zur Beschreibung genutzten Sprache.¹¹⁴ Bei der Komplexitätsreduktion geht es darum, die bestehende Systemstruktur zu entzerren und auf das Wesentliche zu beschränken, um die Transparenz der Vorgänge im System zu erhöhen und dazu beizutragen, die Dynamik beherrschbar zu machen.¹¹⁵

Das Produktionssystem der Smart Factory ist durch die Vernetzung aller an der Wertschöpfung beteiligten Instanzen solch ein System mit sehr vielen Elementen und Verbindungen und Interdependenzen zwischen ihnen. Damit reagiert die Produktion auf die gestiegene Marktkomplexität. Durch die Fraktalisierung der Prozesse wird in der Smart Factory die Komplexität des Produktionssystems gekapselt und damit für den Beobachter reduziert.

Da das Materialflusssystem integraler Teil des Produktionssystems ist, wird es in der Smart Factory auch komplexer werden. Um die Anforderungen an Wandlungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit zu erfüllen, muss daher auch im Materialflusssystem die Komplexität reduziert werden.

¹¹⁴ Vgl. Bandte, 2007, S. 1.

¹¹⁵ Vgl. Klaus / Krieger / Krupp, 2012, S. 284.

3.3 Charakteristiken cyber-physischer Materialflusssysteme

Das Materialflusssystem einer Smart Factory soll also wirtschaftlich wandlungsfähig und in seiner Komplexität erfassbar sein. Um diese Anforderungen zu erfüllen, müssen seine Elemente Wandlungsfähigkeit fördernde Eigenschaften aufweisen. Diese Elementeigenschaften werden Wandlungsbefähiger genannt. Sie sind einem Element inhärent, individuell und abrufbar und unterstützen das Materialflusssystem bei der Erfüllung eines Wandlungsprozesses. Es gibt fünf Wandlungsbefähiger, die ein wirtschaftlich wandlungsfähiges, in seiner Komplexität erfassbares Materialflusssystem charakterisieren: Modularität, Skalierbarkeit, Universalität, Mobilität und Kompatibilität.¹¹⁶ Diese werden im Folgenden näher beschrieben.

Modularität

Einer der wichtigsten Wandlungsbefähiger ist die Modularität der Systemelemente. Sie ist die Grundlage für die geforderte Komplexitätsreduktion und Voraussetzung für den Wandlungsbefähiger Skalierbarkeit.¹¹⁷ Durch die Modularisierung eines Systems wird die Anzahl der Systemelemente sowie die Anzahl und Intensität der Beziehungen zwischen diesen Elementen reduziert. Dies geschieht durch Zusammenfassen von Elementen zu Einheiten, die nur wenige und schwache Beziehungen zu anderen Einheiten haben und dadurch unabhängig sind. Die so gebildeten Einheiten nennen sich Module.¹¹⁸

¹¹⁶ Vgl. Nyhuis / Deuse / Rehwald, 2013, S. 49.

¹¹⁷ Vgl. Günthner / Klenk / Tenerowicz-Wirth, 2014, S. 299.

¹¹⁸ Vgl. Göpfert / Steinbrecher, 2000, S. 22.

Bei der Setzung der Modulgrenzen spielen zwei Dimensionen der Unabhängigkeit eine Rolle: funktionale Unabhängigkeit und physische Unabhängigkeit. Funktionale Unabhängigkeit beschreibt die Eigenschaft eines Systemelements der Funktionsausführung unabhängig von anderen Elementen. Physische Unabhängigkeit beschreibt die Eigenschaft der physischen Trennbarkeit eines Systemelements von anderen Elementen. Je höher die Unabhängigkeit der Elemente eines Systems hinsichtlich beider Dimensionen ausgeprägt ist, desto größer ist das Maß an Modularität.¹¹⁹

Durch die Schaffung von Modulen, deren internen Beziehungen sehr viel stärker ausgeprägt sind als die Beziehungen zu anderen Modulen, entstehen „Inseln der Komplexität“.¹²⁰ Die Beziehungen zu anderen Modulen nennen sich Schnittstellen. Ein aus solchen Modulen entstandenes modulares System ist in Abbildung 14 schematisch dargestellt.¹²¹

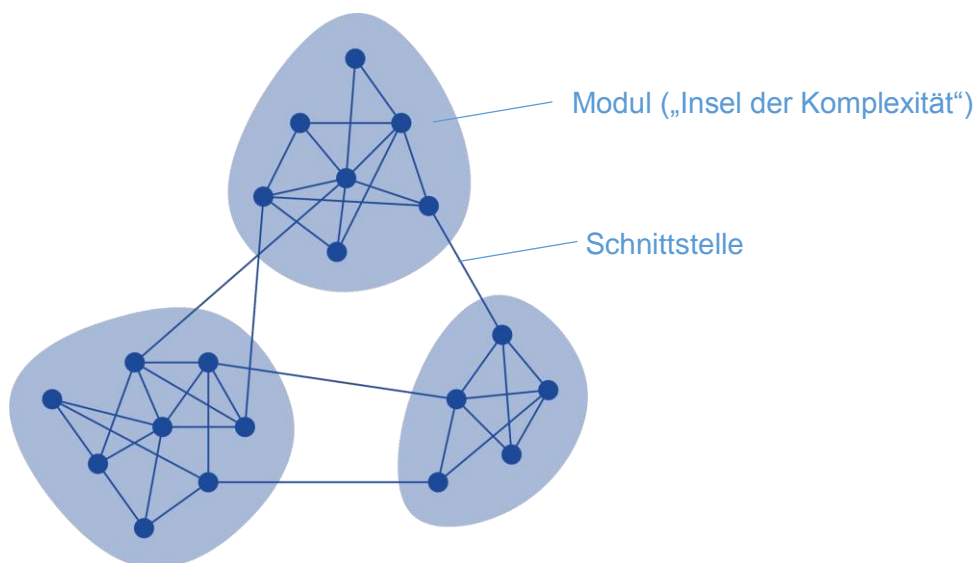


Abbildung 14: Schematische Darstellung eines modularen Systems

¹¹⁹ Vgl. Göpfert / Steinbrecher, 2000, S. 22.

¹²⁰ Vgl. Ebenda, S. 23.

¹²¹ Vgl. Abbildung modifiziert entnommen aus: URL:
<http://www.pnas.org/content/103/23/8577/F1.large.jpg> [25.06.2015].

Durch die Modularisierung ist die Zahl an Systemelementen überschaubar und erfassbar und damit die Gesamtkomplexität des Systems reduziert, indem sie auf verschiedene unabhängige Module verteilt ist („Insel der Komplexität“).¹²² Dieser Vorteil kann noch verstärkt werden, wenn die Module und ihre Schnittstellen auf technischer und organisatorischer Ebene standardisiert werden, also über das ganze System vereinheitlicht werden (Vgl. Kompatibilität).¹²³ Damit ist auch die Grundlage für eine aufwandsarme Strukturkopplung bzw. Transformation des Systems gegeben, bei der nur noch die Beziehungen zwischen den Modulen verändert bzw. Module ausgetauscht oder ergänzt werden müssen, ohne dabei die Funktion des Systems zu behindern.¹²⁴

Ein modulares Materialflusssystem besteht also aus physisch und funktional unabhängigen, standardisierten Modulen, die eine Funktion ausführen und über eindeutig definierte, standardisierte Schnittstellen untereinander kommunizieren und Güter austauschen.

Skalierbarkeit

Durch die standardisierten Module und Schnittstellen ist eine Skalierung, also eine Erweiterung oder Reduzierung der Systemelemente möglich. Ein so definiertes modulares Materialflusssystem ist skalierbar und kann aufwandsarm an Wandlungstreiber angepasst werden.¹²⁵ Skalierbare Module sind die Grundlage für die Durchsatzflexibilität eines Materialflusssystems.

¹²² Vgl. Göpfert / Steinbrecher, 2000, S. 24.

¹²³ Vgl. Ebenda, S. 27.

¹²⁴ Vgl. Nyhuis / Deuse / Rehwald, 2013, S. 50.

¹²⁵ Vgl. Ebenda, S. 50.

Universalität

Universelle Elemente sind so dimensioniert und gestaltet, dass sie verschiedene Anforderungen erfüllen können und nicht nur für einen spezifischen Anwendungsfall geeignet sind.¹²⁶ Im Materialflusssystem bedeutet das, dass ein Modul verschiedenste Fördergüter transportieren kann. Universelle Elemente sind damit die Grundlage für die Fördergutflexibilität eines Materialflusssystems.

Mobilität

Mobile Elemente sind ohne erheblichen Kosten- und Zeitaufwand örtlich uneingeschränkt bewegbar.¹²⁷ Ein Materialflusssystem aus mobilen Elementen kann sich so an Layout- und Strukturänderungen des Produktionssystems anpassen. Mobile Elemente sind damit die Grundlage für die Layoutflexibilität eines Materialflusssystems.

Kompatibilität

Kompatibilität meint die Vernetzungsfähigkeit von Systemelementen bezüglich Material- und Informationsaustausch.¹²⁸ Die physische Vernetzungsfähigkeit wird über standardisierte mechanische Schnittstellen zwischen den Elementen gewährleistet und ermöglicht einen problemlosen Materialaustausch zwischen ihnen. Die digitale Vernetzungsfähigkeit wird über standardisierte Softwareschnittstellen gewährleistet und ermöglicht einen problemlosen Informationsaustausch zwischen Systemelementen.¹²⁹

Dem Wandlungsbefähiger Kompatibilität kommt eine entscheidende Rolle zu, denn Kompatibilität ist eine Voraussetzung, um die Vorteile der Modularität, Skalierbarkeit und Mobilität von Systemelementen nutzen zu können. Die digitale Vernetzungsfähigkeit kann in Smart Factories geschaffen werden, in dem die Materialflusssysteme analog den Produktionsfraktalen mit eingebetteten Systemen,

¹²⁶ Vgl. Nyhuis / Deuse / Rehwald, 2013, S. 50.

¹²⁷ Vgl. Ebenda.

¹²⁸ Vgl. Ebenda.

¹²⁹ Vgl. Ebenda.

Sensoren und Aktoren ausgestattet werden und über das Internet der Dinge vernetzt werden. Damit werden auch sie zu CPS und sind in der Lage, untereinander und mit den anderen CPS im CPPS zu kommunizieren und Informationen auszutauschen.¹³⁰ So wird das Materialflusssystem zu einem Cyber-physischen Materialflusssystem (CPMS), das sich u.a. durch die oben beschriebenen Eigenschaften der Wandlungsbefähiger auszeichnet. Im Folgenden werden die Elemente und die Steuerung eines CPMS erläutert.

3.3.1 Entitäten eines CPMS

Die Systemelemente eines CPMS werden Entitäten genannt. Entitäten sind die kleinsten, nicht weiter zerlegbaren Funktionseinheiten im Internet der Dinge. Im CPMS sind dies die Fördertechnikelemente, die Transporteinheiten und Softwaredienste. Sie erfüllen autonom eine bestimmte logistische Funktion und tragen dadurch dazu bei, dass das Systemziel, nämlich der Transport von Lastobjekten zu ihren Bestimmungsorten, erreicht wird.¹³¹ Da sie das Systemziel wegen ihrer lokalen Beschränktheit nicht alleine erreichen können, müssen sie mit anderen Entitäten kooperieren und kommunizieren. Um diese Kooperation und Kommunikation zu ermöglichen, wird jeder Entität ein Softwareagent zugeordnet.¹³²

Ein Softwareagent ist ein Programm, das eigenständige Aktionen in seiner Umgebung durchführt, um das Systemziel zu erreichen und dabei mit anderen Softwareagenten im System kooperiert. Um das Systemziel zu erreichen, handelt er autonom ohne Benutzereingriff und kann die Ausführung seines Verhaltens und seine Programmierung selber bestimmen. Der Softwareagent reagiert auf Veränderungen seiner Umwelt, welche über die Sensorik der Fördertechnik oder Eingaben eines menschlichen Bedieners vermittelt werden und passt sein Verhalten daraufhin an. Des Weiteren handelt er proaktiv, führt also initiativ eigene Aktionen aus, und adaptiv, d.h. er ändert seine eigenen Einstellungen und Struktur in Reaktion auf Erfahrungswerte.¹³³

¹³⁰ Vgl. Günthner / Klenk / Tenerowicz-Wirth, 2014, S. 298.

¹³¹ Vgl. Kuzmany / Luft / Chisu, 2010, S. 54.

¹³² Vgl. Ebenda.

¹³³ Vgl. Alisch / Winter / Arentzen, 2004, S. 54.

Zur Durchführung der Materialflussfunktion „Fördern“ werden die Entitäten Fördertechnikmodule als CPS, Transporteinheiten und Softwaredienste benötigt. Es folgt eine Beschreibung dieser Entitäten und der Steuerung des CPMS.

3.3.1.1 Fördertechnikmodule

Die Fördertechnik eines Materialflusssystems wird in ihrer Mechanik, Energietechnik und Steuerungssoftware funktionsorientiert modularisiert. Dadurch entstehen Fördertechnikmodule als mechatronische Einheiten, die mechanisch, energetisch und steuerungstechnisch unabhängig sind und über eine einzige mechatronische Schnittstelle verfügen.¹³⁴ Dabei sind die Systemgrenzen von Mechanik, Energie und Steuerungstechnik identisch. Über die Schnittstelle lassen sich die Module frei und unabhängig voneinander miteinander kombinieren.¹³⁵ Sie erfüllen eine logistische Funktion (z.B. Sortieren oder Transportieren) und bieten den Transporteinheiten ihren Transportdienst im Internet der Dinge und Dienste an, damit diese ihren Arbeitsablauf erfüllen können.¹³⁶ An ihnen ist ein eingebettetes System verortet, auf dem ihr Softwareagent läuft, der die Steuerung des Moduls übernimmt.¹³⁷ Hierzu mehr im Kapitel 3.3.2. Das Fördertechnikmodul stellt demnach ein CPS dar.

¹³⁴ Vgl. Günthner / Klenk / Tenerowicz-Wirth, 2014, S. 299.

¹³⁵ Vgl. Wilke, 2006, S. 49.

¹³⁶ Vgl. Kuzmany / Luft / Chisu, 2010, S. 56.

¹³⁷ Vgl. Günthner / Klenk / Tenerowicz-Wirth, 2014, S. 300.

Die Fördertechnikmodule sind fahrerlos und nicht ortsfest sondern mobil. Sie können sich frei im Produktionsraum bewegen.¹³⁸ Die Navigation und Lokalisierung kann z.B. über Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)-Verfahren erfolgen. Dabei wird die Umgebung gleichzeitig z.B. auf Basis von Echtzeitdaten eines integrierten 3D- oder 2D-Laserscanners kartiert und die Position des Moduls lokalisiert. Damit kann sich das Modul auch in dem dynamischen Produktionsraum einer Smart Factory frei bewegen ohne zu kollidieren. Die Routenplanung erfolgt dynamisch anhand der ständig aktualisierten Karte der Umgebung. Dabei werden auf dem Transportweg etwaige Hindernisse umfahren und sich bewegende Gegenstände und Personen berücksichtigt. Dieses Verfahren schließt einen Stillstand wegen blockierten vorgeplanten Routen oder unvorhergesehenen Situationen aus und minimiert so die Ausfallwahrscheinlichkeit.¹³⁹

Die Fördertechnikmodule sind stark in die Fertigung integriert. Neben ihrer Transportaufgabe greifen sie auch aktiv in die Produktion ein, indem Fertigungsschritte am Werkstück durchgeführt werden, während dieses auf dem Modul ist.¹⁴⁰

3.3.1.2 Transporteinheiten

Die Transporteinheiten sind die zu transportierenden logistischen Objekte. Dies sind entweder Smart Products oder Werkstückträger mit eingebetteten Systemen, auf denen ein Softwareagent läuft. Sind weder Produkt noch Werkstückträger entsprechend ausgestattet, werden sie mittels Autoident-Technologien wie Barcodes oder RFID-Transpondern ausgestattet und sind so, entsprechende Sensorik vorausgesetzt, jederzeit im Produktionsraum identifizierbar. Der zugeordnete Softwareagent wird in diesem Fall auf einem stationären Rechner ausgeführt.¹⁴¹

Über den Softwareagenten kommuniziert die Transporteinheit mit anderen Entitäten, fordert die Ausführung von Funktionen an und tauscht Daten aus.¹⁴² Sie nutzt die Fördertechnikmodule als Dienstleister, um ihren Produktionsprozess zu durchlaufen.

¹³⁸ Vgl. Günthner / Klenk / Tenerowicz-Wirth, 2014, S. 304.

¹³⁹ Vgl. Bubeck et al., 2014, S. 230.

¹⁴⁰ Vgl. Ebenda, S. 225.

¹⁴¹ Vgl. Kuzmany / Luft / Chisu, 2010, S. 55.

¹⁴² Vgl. Ebenda.

3.3.1.3 Softwaredienste

Softwaredienste werden von einem Softwareagenten repräsentiert und haben keine physische Erscheinung. Sie übernehmen Aufgaben, die nicht einem einzelnen Fördertechnikmodul oder einer Transporteinheit zugeordnet werden können.¹⁴³ Dies sind Funktionen zur Unterstützung der Koordination und Kooperation zwischen den Transporteinheiten und Fördertechnikmodulen und mit den menschlichen Bedienern.¹⁴⁴ Über sie kann der Bediener einen transparenten Einblick in den Materialfluss erhalten und manuelle Eingriffe auslösen.

3.3.2 Steuerung eines CPMS

Die Steuerung des CPMS erfolgt dezentral über ein Multiagentensystem. Ein Multiagentensystem ist ein System, das aus mehreren Softwareagenten besteht, die miteinander kooperieren und kommunizieren. Die einzelnen Softwareagenten sind dabei den soeben beschriebenen Entitäten zugeordnet und verwalten ihre Daten lokal und führen auch ihre Berechnungen lokal aus. Aufgrund ihrer lokalen Wahrnehmung, haben sie beschränkte Fähigkeiten und können auch nur lokale Aktionen ausführen. Deswegen können sie das Systemziel nicht alleine erreichen sondern müssen dazu mit Softwareagenten anderer Entitäten zusammenarbeiten.¹⁴⁵ Die eigenständige Kooperation zwischen den Softwareagenten zur Zielerreichung ersetzt also die zentrale Steuerung durch einen Materialflussrechner.

Das zentrale Element der Selbststeuerung ist die Transporteinheit. Ihr Softwareagent kennt das Ziel der Transporteinheit und die notwendigen Arbeitsschritte zur Erreichung dessen. Er vergibt für jeden Arbeitsschritt Transportaufträge und definiert damit das Systemziel für die Fördertechnikmodule. Jeder Arbeitsschritt entspricht einer logistischen Funktion, deren Erfüllung wiederum bestimmte Fördertechnikmodule anbieten.¹⁴⁶ Die dezentrale Selbststeuerung eines CPMS ist in Abbildung 15 schematisch dargestellt.¹⁴⁷

¹⁴³ Vgl. Kuzmany / Luft / Chisu, 2010, S. 56.

¹⁴⁴ Vgl. Günthner / Klenk / Tenerowicz-Wirth, 2014, S. 308.

¹⁴⁵ Vgl. Roidl, 2010, S. 72.

¹⁴⁶ Vgl. Kuzmany / Luft / Chisu, 2010, S. 57.

¹⁴⁷ Vgl. Abbildung modifiziert entnommen aus: Günthner / Klenk / Tenerowicz-Wirth, 2014, S. 300.

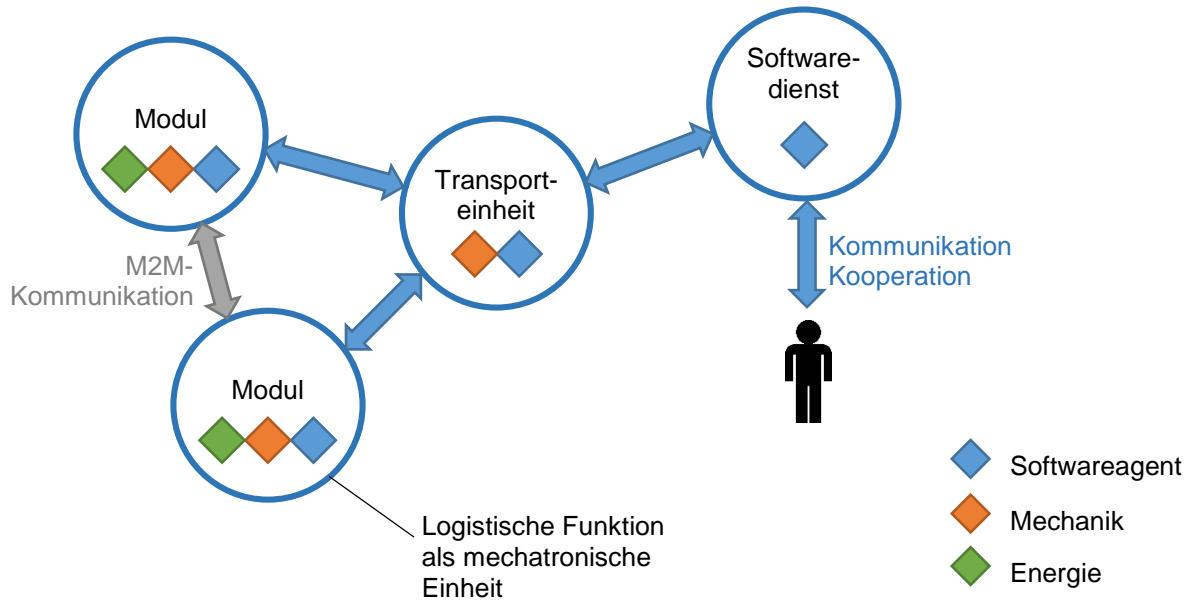


Abbildung 15: Schematische Darstellung der dezentralen Selbststeuerung eines CPMS

Es ist zu erkennen, dass es im Gegensatz zur klassischen Materialflusssteuerung keine Hierarchieebenen mehr gibt (Vgl. Abbildung 8). Stattdessen werden alle Funktionen, die sonst verschiedenen Hierarchieebenen (Materialflussrechner, SPS) zugeordnet wurden, von den Entitäten selbst übernommen. So steuert sich jede Entität autonom über ihren Softwareagenten und ist mechanisch, energetisch und steuerungstechnisch gekapselt.¹⁴⁸

Im Folgenden soll nun erläutert werden, wie der Softwareagent einer Transporteinheit (TE-Agent) die Durchführung eines Arbeitsschrittes an seiner Transporteinheit steuert.

¹⁴⁸ Vgl. Günthner / Klenk / Tenerowicz-Wirth, 2014, S. 300.

Vor einem Arbeitsschritt sucht der TE-Agent die Module, die die für die Ausführung des Arbeitsschrittes benötigte logistische Funktion anbieten. Bieten mehrere Module diese Funktion an, fragt der TE-Agent alle Module an.¹⁴⁹ Die Softwareagenten der Module kommunizieren dann untereinander über Machine-to-Machine (M2M)-Kommunikation, um zu verhandeln, welches Modul die Anforderung der Transporteinheit am besten erfüllen kann.¹⁵⁰ Der Softwareagent des ausgewählten Moduls sendet eine Bestätigung an die Transporteinheit und wird damit für diese zum aktuellen Transportziel.¹⁵¹

Der TE-Agent sucht nun ein Fördertechnikmodul, das seine Transporteinheit zum gewählten Ziel transportiert. Auch dabei werden die Softwareagenten aller Fördertechnikmodule angefragt und unter diesen verhandelt, wer den Transportdienst am besten durchführen kann. Dabei werden Attribute wie z.B. aktueller Zustand, aktueller Ort und Batterieladezustand berücksichtigt. Ein Transport über mehrere Fördertechnikmodule hinweg ist auch möglich. Das ausgewählte Fördertechnikmodul fährt zur Transporteinheit, nimmt sie auf und transportiert sie zum Ziel. Dabei wählt es die schnellste Route und umfährt Blockaden eigenständig. Dort angekommen, fordert der TE-Agent das Modul auf, die anfangs angefragte logistische Funktion durchzuführen. Nach der Durchführung der Funktion wählt der TE-Agent auf Basis des Ergebnisses der Durchführung und eventueller Fehler den nächsten Arbeitsschritt und der Zyklus beginnt von vorne.¹⁵²

Das vorgestellte Konzept eines CPMS ist durch den seinen Entitäten inhärenten Wandlungsbefähigern geeignet, um sich einem CPPS, das sich ungeplant in den Produktspektren, Materialflüssen und Produktionsleistung und -schwankung ändert, schnell und wirtschaftlich anzupassen und die physische Verknüpfung der Fertigungs- und Montageeinheiten jederzeit zu gewährleisten.

¹⁴⁹ Vgl. Kuzmany / Luft / Chisu, 2010, S. 57.

¹⁵⁰ Vgl. Günthner / Klenk / Tenerowicz-Wirth, 2014, S. 300.

¹⁵¹ Vgl. Kuzmany / Luft / Chisu, 2010, S. 57.

¹⁵² Vgl. Ebenda, S. 57f.

4 Lösungen für cyber-physische Materialflusssysteme

Basierend auf dem Konzept eines CPMS wurden bereits konkrete Lösungen für den Einsatz in einem CPMS entwickelt. Zwei von diesen sollen in diesem Kapitel vorgestellt werden.

4.1 MultiShuttle Move

Am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML) wurde im gleichnamigen Forschungs- und Entwicklungsprojekt das Fahrzeug „MultiShuttle Move“ (MS Move) entwickelt. Es ist ein Transportfahrzeug, das über ein Boden- und ein Regalfahrwerk verfügt und in der Fläche frei beweglich ist.¹⁵³ Es ist mit vier verschiedenen Arten von Sensoren ausgestattet: Sicherheitslaserscanner, drahtlose Sensorknoten, Inertialsensoren und Odometriesensoren des Differentialantriebs.¹⁵⁴ Die Steuerung erfolgt über einen Softwareagenten, der auf einem im MS Move integrierten kommunikationsfähigen eingebetteten System läuft.¹⁵⁵ Das MS Move stellt also ein CPS dar. Die Abbildung 16 zeigt das Fahrzeug.¹⁵⁶



Abbildung 16: MS Move Fahrzeug

¹⁵³ Vgl. Kirks et al., 2012, S. 3.

¹⁵⁴ Vgl. Ebenda, S. 5.

¹⁵⁵ Vgl. Ebenda, S. 4.

¹⁵⁶ Vgl. Abbildung modifiziert entnommen aus: URL:

http://mhwmagazine.co.uk/MHWMagazine/Dematic-at-CeMAT-2011-in-Hannover-total-solutions-for-flexibility-and-efficiency-in-intralogsitics_8854.png [30.06.2015].

Wie zu erkennen ist, ist das MS Move zum Transport von KLTs ausgelegt. Deren maximale Größe ist 600 mm x 400 mm bei einem maximalen Gewicht von 40 kg.¹⁵⁷ Für das Projekt wurde eine modulare Softwareplattform entwickelt, das Energiekonzept ist mit eingebauten Akkumulatoren modular und mechanisch ist es ebenfalls modularisiert.¹⁵⁸ Damit entspricht das MS Move einem autonomen mechatronischen Modul. Die Navigation und Lokalisierung erfolgt über Sensorfusion aus den Daten der eingebauten Sensoren. Dafür wird ein spezieller Lokalisierungsalgorithmus genutzt.¹⁵⁹

Da das MS Move erweiterungsfähig ist, kann aus mehreren MS Move Fahrzeugen ein Transportsystem geformt werden. Dies bietet die Möglichkeit zur bedarfsgerechten Skalierung des Systems durch Transformation. Die Steuerung dieses Systems erfolgt dezentral über ein Multiagentensystem. Der Softwareagent eines MS Move steuert das Fahrzeug autonom, kooperiert und kommuniziert aber für die Zieldefinierung mit den Softwareagenten anderer MS Move Fahrzeuge, um die optimale Erreichung des übergeordneten, für ihn selber nicht erreichbaren Systemziels zu gewährleisten. So wird ein von einer Transporteinheit ausgegebener Transportauftrag an alle Fahrzeuge geschickt und deren Softwareagenten kommunizieren untereinander, um die optimale Aufteilung des Transportauftrages in Unteraufträge und deren Zuteilung zu eruiieren. Dabei werden Auftragseigenschaften wie Sequenz und Ziel und Fahrzeugeigenschaften wie die aktuelle Position, der Ladungszustand und die aktuelle Geschwindigkeit berücksichtigt. Diese dezentrale, selbstgesteuerte Verwaltung der Aufgabenentgegennahme und –organisation wird auch Schwarmintelligenz genannt.¹⁶⁰

Die Steuerung eines MS Move ist in die drei Ebenen Sensor- und Aktorebene, operative Ebene und strategische Ebene unterteilt.¹⁶¹ Die Steuerungsarchitektur, die sich in jedem MS Move wiederfindet, ist in Abbildung 17 dargestellt.¹⁶²

¹⁵⁷ Vgl. Kirks et al., 2012, S. 3.

¹⁵⁸ Vgl. Ebenda, S. 3ff.

¹⁵⁹ Vgl. Ebenda, S. 4.

¹⁶⁰ Vgl. Ebenda, S. 5.

¹⁶¹ Vgl. Ebenda, S. 4.

¹⁶² Vgl. Abbildung entnommen aus: Kirks et al., 2012, S. 5.

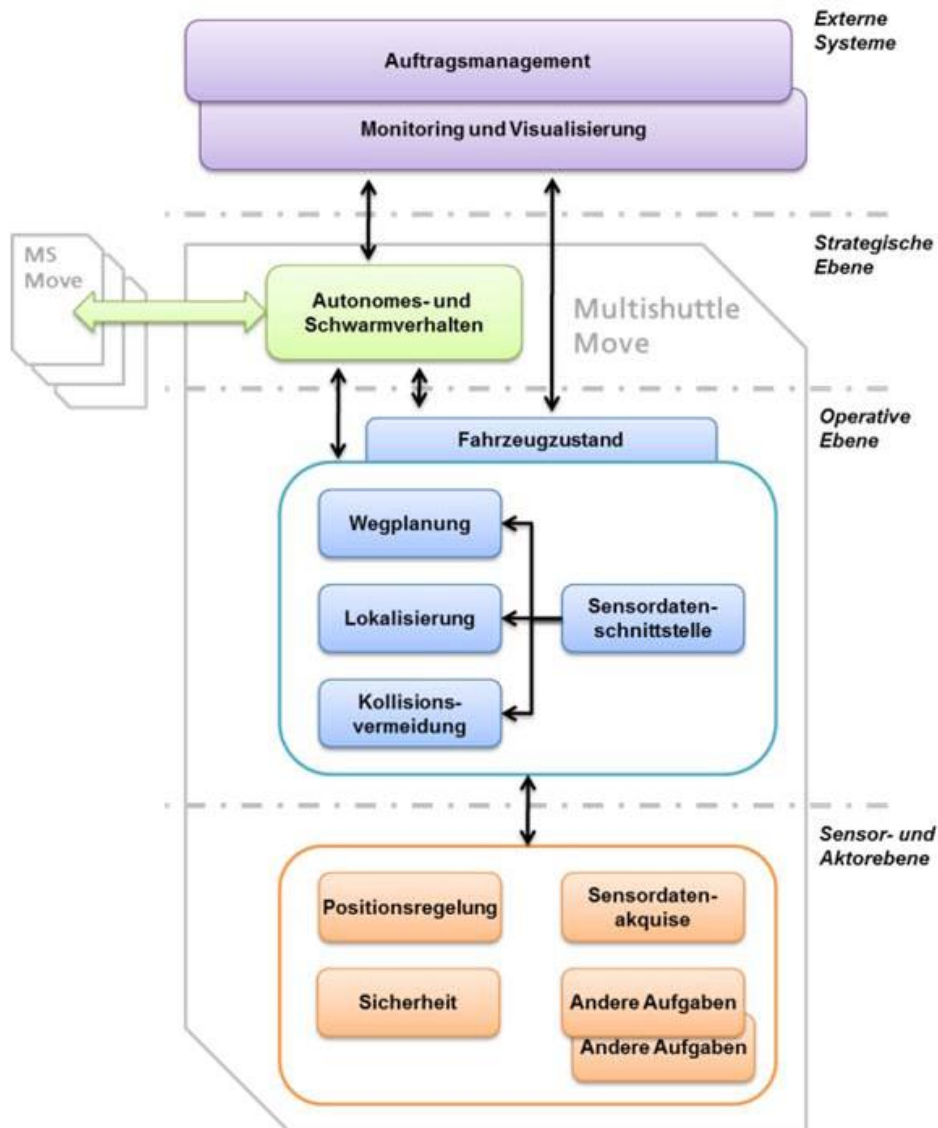


Abbildung 17: Steuerungsarchitektur eines MS Move

In der Sensor- und Aktorebene werden die Sensordaten akquiriert und auf deren Basis echtzeitkritische Funktionen wie das Positionieren, die Bedienung des Lastaufnahmemittels, allgemeine Steuerungsaufgaben und sicherheitskritische Aufgaben ausgeführt. Über eine Sensordatenschnittstelle werden die Sensordaten auch der operativen Ebene zur Verfügung gestellt. Dort werden weniger zeitkritische Funktionen wie die Wegplanung, Lokalisierung oder Kollisionsvermeidung ausgeführt. Parameter wie die aktuelle Position, die sich aus der Ausführung dieser Funktionen ergeben, werden der strategischen Ebene bereitgestellt.

Die strategische Ebene steuert das MS Move über den dort integrierten Softwareagenten, indem es die Parameter der operativen Ebene ändert. Entscheidungen über das autonome Verhalten oder das Verhalten im Schwarm werden durch den Softwareagenten auf Basis des Fahrzeugzustandes, der sich aus den von der operativen Ebene zur Verfügung gestellten Parametern ergibt, gefällt. Aus diesem Grund wird diese Ebene auch die Schwarmebene genannt. Diese Ebene steht auch im direkten Kontakt zu externen Systemen wie den Auftraggebern oder etwaigen Monitoring- oder Visualisierungsdiensten.¹⁶³

Das soeben vorgestellte MS Move entspricht in Aufbau, Funktionalität und Steuerung einem Fördertechnikmodul und kann daher in einem CPMS eingesetzt werden. Seine Modularität, Universalität, Kompatibilität, Mobilität und Skalierbarkeit befähigen es zu einem Einsatz in einem solchen wirtschaftlich wandlungsfähigen Materialflusssystem. Dabei müssen allerdings einige Einschränkungen gemacht werden. Die Mobilität ist eingeschränkt, da die Layoutflexibilität durch die fehlende Variabilität des Ortes der Lastübergabe in der Höhe begrenzt ist. Die Fördergutflexibilität ist durch die fehlende Unterstützung größerer Ladehilfsmittel als KLT und Ladeeinheitsgewichten begrenzt, wodurch die Universalität des MS Move eingeschränkt ist.

Die besonderen Stärken des MS Move liegen in seiner selbstorganisierten Auftragsentgegennahme und -organisation nach dem Prinzip der Schwarmintelligenz und hohen Durchsatzflexibilität und Erweiterungsfähigkeit, die zu einer sehr guten Skalierbarkeit eines aus vielen MS Move Fahrzeugen bestehenden Transportsystems führen.

¹⁶³ Vgl. Kirks et al., 2012, S. 5.

4.2 KARIS PRO

Das „KARIS PRO“ ist ein am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entwickeltes Fördersystem, das aus mehreren Systemfahrzeugen besteht. „KARIS PRO“ steht dabei für „Kleinskaliges Autonomes Redundantes Intralogistik-System in der Produktion“. Die Fahrzeuge haben eine Fläche von 0,25 m² und eine Höhe von 40 cm.¹⁶⁴ Sie verfügen über einen aufgebauten Rollenförderer und sind frei in der Fläche beweglich.¹⁶⁵ Durch die spezielle Form der Räder des Fahrantriebs auf der Unterseite ist dies ohne Wenden möglich. Abbildung 18 zeigt ein KARIS PRO Systemfahrzeug.¹⁶⁶



Abbildung 18: KARIS PRO Systemfahrzeug

Das Fahrzeug ist mit Lasersensoren ausgestattet, die der Lokalisierung und Navigation dienen.¹⁶⁷ Die Steuerung, Mechanik und Energetik ist modular, sodass das Fahrzeug einem autonomen mechatronischen Modul entspricht.¹⁶⁸ Die Steuerung des Systems erfolgt wie beim MS Move vom IML dezentral durch ein Multiagentensystem und die Nutzung des Prinzips der Schwarmintelligenz. Die Fahrzeuge kooperieren und formen sich je nach Bedarf zu verschiedenen Systemstrukturen bzw. Clustern zusammen, um einen Transportauftrag abzuwickeln. Dabei werden Faktoren wie der benötigte Durchsatz und die Größe des Fördergutes berücksichtigt.¹⁶⁹

¹⁶⁴ Vgl. Kirks et al., 2012, S. 2.

¹⁶⁵ Vgl. KIT Karlsruher Institut für Technologie, 2010, 2:15.

¹⁶⁶ Vgl. Abbildung entnommen aus: Kirks et al., 2012, S. 2.

¹⁶⁷ Vgl. KIT Karlsruher Institut für Technologie, 2010, 3:40.

¹⁶⁸ Vgl. Ebenda, 2:05.

¹⁶⁹ Vgl. Ebenda, 3:00.

Die möglichen Systemstrukturen, die aus mehreren Fahrzeugen gebildet werden können, sind in Abbildung 19 illustriert.¹⁷⁰

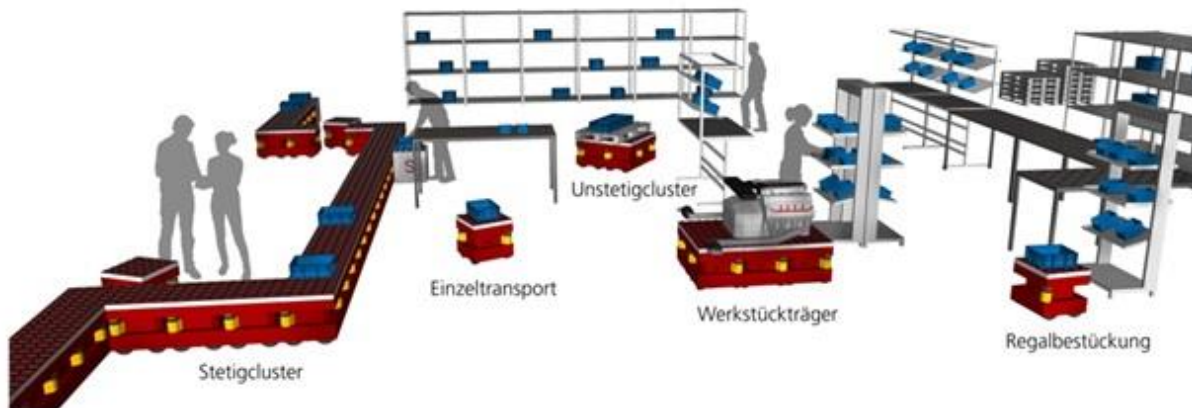


Abbildung 19: Mögliche Strukturen eines KARIS PRO Fördersystems

So kann ein Fahrzeug in einem Einzeltransport einen maximal 0,25 m² großen Ladungsträger (z.B. KLT) transportieren. Sollte eine größere oder schwerere Transporteinheit wie z.B. ein Werkstück transportiert werden, ändern die Fahrzeuge die Systemstruktur und setzen sich zu einem Cluster zusammen, der groß oder tragfähig genug ist, um die Transporteinheit aufzunehmen. Wird zwischen bestimmten Fertigungs- oder Montageeinheiten in der Produktion ein hoher Durchsatz benötigt, können sich die Fahrzeuge zu einem Stetigcluster zusammensetzen und so eine Förderstrecke zur Verfügung stellen, auf der wie auf einer klassischen Rollenbahn eine hohe Zahl an Transporteinheiten transportiert werden können. Nach Beendigung des Transportauftrages lösen sich die Cluster auf und die Fahrzeuge stehen wieder zum Einzeltransport oder zur Clusterung zur Verfügung.¹⁷¹ Diese Funktion des Fahrzeuges ist eine Manifestierung des Wandlungsbefähigers Universalität.

Ein KARIS PRO Fahrzeug entspricht in Aufbau, Funktionalität und Steuerung einem Fördertechnikmodul und kann daher wie das MS Move in einem CPMS eingesetzt werden. Auch dieses Fahrzeug hat die Eigenschaften Modularität, Universalität,

¹⁷⁰ Vgl. Abbildung modifiziert entnommen aus: URL: http://www.ifl.kit.edu/projekte_karispro.php [01.07.2015].

¹⁷¹ Vgl. KIT Karlsruher Institut für Technologie, 2010, 3:00.

Kompatibilität, Mobilität und Skalierbarkeit, welches es zu einem Einsatz in einem CPMS befähigt. Lediglich die Einschränkung der Mobilität durch die wegen fehlender Variabilität des Ortes der Lastübergabe in der Höhe begrenzte Layoutflexibilität schränkt die Systemflexibilität ein. Die Fähigkeit des Zusammenschlusses einzelner Fahrzeuge zu einem Clustern befähigt das KARIS PRO Fördersystem zu einer maximalen Fördergut- Durchsatzflexibilität. Die Erweiterungsfähigkeit des Systems macht das es skalierbar und wandlungsfähig. Damit unterstützt es das dynamische Produktionssystem der Smart Factory.

Die vorgestellten Lösungen für den Einsatz in CPMS erfüllen in hohem Maße die Anforderungen, die an die Elemente eines wirtschaftlich wandlungsfähigen Materialflusssystem gestellt werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Wandlungstreiber wie die steigenden Kundenanforderungen in gesättigten Märkten hinsichtlich Lieferflexibilität, Funktionalität und Individualität und der Anstieg des globalen Konsums formen eine höchst volatile Unternehmensumwelt und stellen Produktionsunternehmen vor Herausforderungen, die sie mit einer reinen Fokussierung auf die Erfolgsfaktoren Qualität und Kosten und einem Produktionssystem mit festen Verkettungen und Takt und zentraler Planung und Steuerung nicht bewältigen können. Um die innere Leistungskomplexität eines Unternehmens an die gestiegene Marktkomplexität anzupassen, muss das Produktionssystem wandlungsfähig sein, also in der Lage sein, sich mit relativ geringem Aufwand an unerwartete Veränderungen von Randbedingungen anzupassen.

Industrie 4.0 – die vierte industrielle Revolution – adressiert diese Anforderung über ein neues Produktionsparadigma und eine Reorganisation der gesamten Wertschöpfungskette über den Lebenszyklus von Produkten. Nach dieser Vision findet die Produktion in einer Smart Factory statt, in der die Produktionsprozesse dezentral durch die Produkte gesteuert und selbstoptimiert werden. Durch die freie Anordnung von fraktalisierten Prozessmodulen im Produktionsraum ist die Smart Factory höchst wandlungsfähig. Diese Wandlungsfähigkeit wird dadurch verstärkt, dass die Produkte, Prozessmodule und Mitarbeiter digital miteinander vernetzt sind. Die physische Vernetzung dieser Komponenten wird nach wie vor über Materialflusssysteme bewerkstelligt.

Das Materialflusssystem übernimmt die Ver- und Entsorgung der Produktion mit Werkstücken, Werkzeugen, Hilfsstoffen und Abfällen und ist somit ein integraler Bestandteil des Produktionssystems. Daher kann die Smart Factory nur so wandlungsfähig sein, wie es auch ihr Materialflusssystem ist. Es muss sich mit geringem Aufwand an Veränderungen des Produktionssystem hinsichtlich der Produktspektren, Materialflüsse und Produktionsleistung und –schwankung anpassen können. Um sich an erwartete Veränderungen anzupassen, muss ein Materialflusssystem fördergut-, layout- und durchsatzflexibel sein. Die Ausprägung dieser drei Flexibilitätsarten formen einen Handlungsspielraum, innerhalb dessen sich

das Materialflusssystem nur durch Strukturkopplung an Veränderungen des Produktionssystems anpassen kann. Führen unerwartete Ereignisse zu stärkeren als den bei der Planung erwartete Veränderungen, muss sich das System durch Transformation auch diesen anpassen können. Diese Fähigkeit nennt sich Wandlungsfähigkeit und wird durch die Erweiterungs- und Integrationsfähigkeit des Materialflusssystems bewerkstelligt. Damit ein wirtschaftliches Betreiben eines wandlungsfähigen Materialflusssystems möglich ist, muss bei dessen Planung die optimale Basisflexibilität gewählt werden. Schließlich muss es für den Betrachter die Komplexität reduzieren.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, müssen die Elemente des Materialflusssystems die Wandlungsbefähiger Modularität, Skalierbarkeit, Universalität, Mobilität und Kompatibilität aufweisen. Durch Modularisierung ist die Zahl an Systemelementen überschaubar erfassbar und somit die Gesamtkomplexität des Systems reduziert. Skalierbare Module schaffen die Grundlage für die Durchsatzflexibilität, universelle Elemente für die Fördergutflexibilität und mobile Elemente für die Layoutflexibilität des Materialflusssystems. Die Kompatibilität der Elemente wird durch ihre physische und digitale Vernetzungsfähigkeit möglich. Um letztere bereitzustellen, können die Materialflusselemente als CPS mit kommunikationsfähigem eingebettetem System, Sensoren und Aktoren ausgestattet werden und so ein CPMS formen.

CPMS bestehen aus Fördertechnikmodulen, Transporteinheiten und Softwarediensten, die über ein Multiagentensystem miteinander kommunizieren und kooperieren, um das Systemziel – der Transport von Lastobjekten zu Bestimmungsorten – gemeinsam zu erreichen. Fördertechnikmodule sind CPS, die eine bestimmte logistische Funktion erfüllen und diese den Transporteinheiten anbieten. Die Transporteinheit steuert autonom ihren Transport, indem es die logistischen Funktionen der Fördertechnikmodule nutzt. Damit wird zur Materialflussteuerung kein zentraler Rechner mehr benötigt sondern die Steuerung erfolgt wie in einem CPPS dezentral.

So geprägte CPMS sind in der Lage, sich schnell und wirtschaftlich auch an ungeplante Veränderungen des CPPS einer Smart Factory anzupassen. Das MS Move des IML und das KARIS PRO des KIT sind zwei konkrete Lösungen, die die Anforderungen an Systemelemente eines CPMS erfüllen und für den Einsatz in einem CPMS geeignet wären. Weltweit wird an weiteren geeigneten Projekten gearbeitet.

Der Einsatz solcher Lösungen in den Unternehmen hängt stark vom Entwicklungsstand dessen Produktionssystems ab, da CPMS-Lösungen ein digitales Netz und intelligente Produkte als CPS voraussetzen. Wie bei CPPS wird die Migration von CPMS in Produktionssysteme eher evolutionär als revolutionär stattfinden. Bereits getätigte Investitionen in klassische Produktions- und Materialflusssysteme sollen sich zunächst amortisieren, bevor es zu inkrementellen Investitionen in CPPS- und darauf folgend in CPMS-Lösungen kommt.

Bisher stehen Entwicklungen zum Thema CPMS im Schatten von CPPS- und Smart Factory Projekten, die sich hoher Popularität erfreuen. Doch neben den genannten deutschen Forschungsinstituten haben auch große deutsche Intralogistikdienstleister wie Still die immense Wichtigkeit der Entwicklung von wandlungsfähigen Materialflusssystemen erkannt, die der Schlüssel zur vollkommenen Erschließung der Potenziale einer Smart Factory sind. Mit dem evolutionären Ausbau von Smart Factory Lösungen wird es in den nächsten Jahren und Jahrzehnten zu einer schrittweisen Migration von CPMS-Lösungen in die bestehenden Materialflusssysteme kommen.

IV Literaturverzeichnis

Acatech (Hrsg.): *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0*, 2013, online im Internet unter:

http://www.bmbf.de/pubRD/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_0.pdf [Stand: 13.06.2015].

Alisch, Katrin / Winter, Eggert / Arentzen, Ute (Hrsgg.): *Gabler Wirtschafts Lexikon*, Wiesbaden (Gabler Verlag), 2004.

Bandte, Henning: *Komplexität in Organisationen. Organisationstheoretische Betrachtungen und agentenbasierte Simulation*, Wiesbaden (Deutscher Universitäts-Verlag), 2007.

Bauernhansl, Thomas: *Die vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma*, in: Bauernhansl, Thomas / ten Hompel, Michael / Vogel-Heuser, Birgit (Hrsgg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, Wiesbaden (Springer Vieweg Verlag), 2014, S. 5 – 35.

Baum, Gerhard: *Innovation als Basis der nächsten Industrierevolution*, in: Sandler, Ulrich (Hrsg.) et al.: *Industrie 4.0. Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM*, Heidelberg (Springer-Vieweg), 2013, S. 37-53.

BDI / Z_punkt (Hrsgg.): *Deutschland 2030. Zukunftsperspektiven der Wertschöpfung*, Berlin (BDI), 2011, online im Internet:

http://www.bdi.eu/download_content/Marketing/Deutschland_2030.pdf [Stand: 13.06.2015].

Broy, Manfred: *Cyber-physical Systems – Wissenschaftliche Herausforderungen bei der Entwicklung*, in: Broy, Manfred (Hrsg.): *Cyber-physical Systems. Innovationen durch softwareintensive eingebettete Systeme*, Heidelberg, 2010, S. 17-31.

BSH Bosch und Siemens Hausgeräte GmbH: *Konzern-Geschäftsbericht 2013*, München, 2014, online im Internet unter: https://www.bsh-group.de/presse/fileadmin/publication/2014/Deutsch/BSH_Geschaeftsbericht_2013_DE_lowres.pdf [Stand: 13.06.2015].

Bubeck, Alexander et al.: *Vom fahrerlosen Transportsystem zur intelligenten mobilen Automatisierungsplattform*, in: Bauernhansl, Thomas / ten Hompel, Michael / Vogel-Heuser, Birgit (Hrsgg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, Wiesbaden (Springer Vieweg Verlag), 2014, S. 221 – 233.

Büttner, Karl-Heinz: *Use Case Industrie 4.0-Fertigung im Siemens Elektronikwerk Amberg*, in: Bauernhansl, Thomas / ten Hompel, Michael / Vogel-Heuser, Birgit (Hrsgg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, Wiesbaden (Springer Vieweg Verlag), 2014, S. 120 – 144.

Freund, Robert: *Kundenindividuelle Massenproduktion (Mass Customization)*, Eschborn, 2009, online im Internet unter: http://www.rkw-kompetenzzentrum.de/uploads/media/2009_FB_Mass-Customization.pdf [Stand: 07.06.2015].

Göpfert, Jan / Steinbrecher, Michael: *Modulare Produktentwicklung leistet mehr. Warum Produktarchitektur und Projektorganisation gemeinsam gestaltet werden müssen*, in: Harvard Business Manager, 3/2000, S. 20 – 31.

Gorecky, Dominic / Schmitt, Mathias / Loskyll, Matthias: *Mensch-Maschine-Interaktion im Industrie 4.0-Zeitalter*, in: Bauernhansl, Thomas / ten Hompel, Michael / Vogel-Heuser, Birgit (Hrsgg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, Wiesbaden (Springer Vieweg Verlag), 2014, S. 525 – 542.

Günthner, Willibald: *Abschlussbericht. Modulare Materialflusssysteme für wandelbare Fabrikstrukturen*, Garching bei München, 2006, online im Internet unter: http://www.fml.mw.tum.de/fml/images/Publikationen/Abschlussbericht_14021_Modulare_Materialflusssysteme.pdf [Stand: 14.06.2015].

Günthner, Willibald / Chisu, Razvan / Kuzmany, Florian: *Die Vision vom Internet der Dinge*, in: Günthner, Willibald / ten Hompel, Michael (Hrsg.): *Internet der Dinge in der Intra-logistik*, Berlin Heidelberg (Springer Verlag), 2010, S. 43 – 51.

Günthner, Willibald / Klenk, Eva / Tenerowicz-Wirth, Peter: *Adaptive Logistiksysteme als Wegbereiter der Industrie 4.0*, in: Bauernhansl, Thomas / ten Hompel, Michael / Vogel-Heuser, Birgit (Hrsgg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, Wiesbaden (Springer Vieweg Verlag), 2014, S. 297 – 323.

- Huckemann, Matthias / Krug, Thorsten: *Umsetzungsmanagement von Preisstrategien*, Berlin Heidelberg (Springer Verlag), 2013.
- Kagermann, Henning: *Chancen von Industrie 4.0 nutzen*, in: Bauernhansl, Thomas / ten Hompel, Michael / Vogel-Heuser, Birgit (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, Wiesbaden (Springer Vieweg Verlag), 2014, S. 603 – 614.
- Klaus, Peter / Krieger, Winfried / Krupp, Michael (Hrsg.): *Gabler Lexikon Logistik: Management logistischer Netzwerke und Flüsse*, Wiesbaden (Gabler Verlag), 2012.
- Kirks, Thomas et al.: *Zellulare Transportfahrzeuge für flexible und wandelbare Intralogistiksysteme*, Dortmund, 2012, online im Internet unter: <https://www.logistics-journal.de/proceedings/2012/3454/19-kirks-wgtl2012.pdf> [Stand: 30.06.2015].
- KIT Karlsruher Institut für Technologie: *KARIS – von Ameisen lernen* [YouTube-Video], veröffentlicht am 19.11.2010 unter <https://www.youtube.com/watch?v=dKvB8PpPayA>, zugegriffen am 02.07.2015.
- Kuzmany, Florian / Luft, Arthur / Chisu, Razvan: *Die Bausteine des Internet der Dinge*, in: Günthner, Willibald / ten Hompel, Michael (Hrsg.): *Internet der Dinge in der Intralogistik*, Berlin Heidelberg (Springer Verlag), 2010, S. 53 – 64.
- Lieberoth-Leden, Christian: *iSiKon – Gesteigerte Flexibilität in heterogen aufgebauten Materialflusssystemen*, Garching, 2015, online im Internet unter: http://www.fml.mw.tum.de/fml/images/Forschung/iSiKon/Projektblatt_iSiKon_Lieberoth-Leden.pdf [Stand: 28.06.2015].
- Martin, Heinrich: *Transport- und Lagerlogistik. Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik*, Wiesbaden (Vieweg+Teubner Verlag), 2011.
- McKinsey Global Institute (Hrsg.): *Manufacturing the future. The next era of global growth and innovation*, New York, 2012, online im Internet unter: <http://www.nist.gov/mep/data/upload/Manufacturing-the-Future.pdf> [Stand: 07.06.2015].
- Nyhuis, Peter / Deuse, Jochen / Rehwald, Jürgen: *Wandlungsfähige Produktion. Heute für morgen gestalten*, Garbsen (PZH Verlag), 2013.

Plattform Industrie 4.0: *Industrie 4.0. Whitepaper FuE-Themen. Stand 7. April 2015*, 2015, online im Internet unter: <http://www.plattform-i40.de/sites/default/files/I40%20Whitepaper%20FuE%20Version%202015.pdf> [Stand: 01.05.2015].

Reichwald, Ralf et al.: *Service-Individualisierung*, Leipzig, online im Internet unter: <http://wi1.uni-erlangen.de/sites/wi1.uni-erlangen.de/files/3Service-Individualisierung-fin3.pdf> [Stand: 07.06.2015].

Roidl, Moritz: *Kooperation und Autonomie in selbststeuernden Systemen*, in: Günthner, Willibald / ten Hompel, Michael (Hrsg.): *Internet der Dinge in der Intralogistik*, Berlin Heidelberg (Springer Verlag), 2010, S. 65 – 78.

Schlick, Jochen et al.: *Industrie 4.0 in der praktischen Anwendung*, in: Bauernhansl, Thomas / ten Hompel, Michael / Vogel-Heuser, Birgit (Hrsgg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, Wiesbaden (Springer Vieweg Verlag), 2014, S. 56 – 84.

Steegmüller, Dieter / Zürn, Michael: *Wandlungsfähige Produktionssysteme für den Automobilbau der Zukunft*, in: Bauernhansl, Thomas / ten Hompel, Michael / Vogel-Heuser, Birgit (Hrsgg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, Wiesbaden (Springer Vieweg Verlag), 2014, S. 103 – 119.

Ten Hompel, Michael / Henke, Michael: *Logistik 4.0*, in: Bauernhansl, Thomas / ten Hompel, Michael / Vogel-Heuser, Birgit (Hrsgg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, Wiesbaden (Springer Vieweg Verlag), 2014, S. 615 – 624.

Veigt, Marius et al.: *Entwicklung eines Cyber-physischen Logistiksystems*, in: *Industrie Management*, 2013, 29 (1), S. 15 – 18.

Vogel-Heuser, Birgit: *Herausforderungen und Anforderungen aus Sicht der IT und Automatisierungstechnik*, in: Bauernhansl, Thomas / ten Hompel, Michael / Vogel-Heuser, Birgit (Hrsgg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, Wiesbaden (Springer Vieweg Verlag), 2014, S. 5 – 35.

Vogel-Heuser, Birgit / Bayrak, Gülden / Frank, Ursula: *Forschungsfragen in „Produktionsautomatisierung der Zukunft“*, München, 2012, online im Internet unter:

http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Publikationen/Materialien/acatech_Materialband_Nr15_WEB.pdf [Stand: 13.06.2015].

Voigt, Kai-Ingo / Schorr, Sascha: *Die Evolution des Flexibilitätsbegriffs hin zur Vision der Supra-Adaptivität*, in: Günthner, Willibald (Hrsg.): *Neue Wege in der Automobillogistik. Die Vision der Supra-Adaptivität*, Berlin Heidelberg (Springer Verlag), 2007, S. 41 – 52.

Warnecke, Hans-Jürgen: *Aufbruch zum Fraktalen Unternehmen. Praxisbeispiele für neues Denken und Handeln*, Berlin (Springer Verlag), 1995.

Weber, Manfred / Dommermuth, Thomas / Hauer, Michael: *Kaufmännisches Rechnen*, Freiburg (Haufe-Lexware Verlag), 2012.

Wilke, Michael: *Wandelbare automatisierte Materialflusssysteme für dynamische Produktionsstrukturen*, Technische Universität München, Diss., 2006, online im Internet unter: www.fml.mw.tum.de/fml/images/Publikationen/Diss_Wilke_online.pdf [Stand: 29.06.2015].

Sammelbände

Bauernhansl, Thomas / ten Hompel, Michael / Vogel-Heuser, Birgit (Hrsgg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, Wiesbaden (Springer Vieweg Verlag), 2014.

Broy, Manfred (Hrsg.): *Cyber-physical Systems. Innovationen durch softwareintensive eingebettete Systeme*, Heidelberg, 2010.

Günthner, Willibald (Hrsg.): *Neue Wege in der Automobillogistik. Die Vision der Supra-Adaptivität*, Berlin Heidelberg (Springer Verlag), 2007.

Günthner, Willibald / ten Hompel, Michael (Hrsg.): *Internet der Dinge in der Intralogistik*, Berlin Heidelberg (Springer Verlag), 2010.

V Eidesstattliche Versicherung

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

Hamburg, den 22.07.2015

Jean Philip Zimmermann

Einverständniserklärung

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

Hamburg, den 22.07.2015

Jean Philip Zimmermann