



Masterthesis

Vor- und Zuname:

Lukas Weber

██████████

█

██████████

██████████████████

██████████████

██████████████

Titel:

Industrie 4.0 in der Intralogistik

Prozessdarstellung der Intralogistik der Pfannenberg GmbH auf Basis der Industrie 3.0 und Darstellung des Entwicklungspotenzials in Richtung Industrie 4.0 unter Einbeziehung des Lean Management und cyber-physischer Systeme mit Empfehlung einer Handlungsoption

Abgabedatum: 23.06.2016

Betreuender Professor:

Herr Prof. Dr. Henning Kontny

Zweiter Prüfer:

Herr Prof. Dr. Axel Wagenitz

Fakultät Wirtschaft und Soziales

Department Wirtschaft

Studiengang:

International Logistics and Management

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis.....	6
Abkürzungsverzeichnis	7
Abstract.....	8
1 Einführung	9
1.1 Vorstellung der Kooperation JH und PF	9
1.2 Zielsetzung.....	10
1.3 Aufbau.....	11
2 Ist-Darstellung.....	12
2.1 Filterlüfter- und Kunststofffertigung bei Pfannenberg	12
2.2 Methodenwahl.....	13
2.3 Darstellung.....	15
2.3.1 Wertstromdesign.....	15
2.3.2 Ereignisgesteuerte Prozessketten (EPK).....	18
3 Soll-Szenario Industrie 4.0.....	19
3.1 Industrie 4.0	19
3.2 Anforderungen an die cyber-physischen Systeme	22
3.2.1 Heterarchische Organisation	23
3.2.2 Intelligente Prozessteilnehmer.....	25
3.2.3 Dynamik.....	26
3.2.4 Echtzeitfähigkeit.....	28
3.2.5 Zusammenspiel/Einordnung	29
3.3 Darstellung Planungsprozess Industrie 4.0	29
3.3.1 Methodenauswahl.....	29
3.3.2 Darstellung	32

3.4	Effizienzverbesserung	34
3.4.1	Definition Kennzahlen.....	34
3.4.2	Zielsystem	38
3.4.3	Vergleich und Priorisierung der Kennzahlen.....	39
3.5	Industrie 4.0 und Logistik	40
3.5.1	Phasen der Logistikentwicklung.....	40
3.5.2	Einordnung von Industrie 4.0	43
4	Soll-Szenario Pfannenberg (Industrie 4.P).....	45
4.1	Eingrenzung	45
4.2	Effizienzverbesserung	46
4.2.1	Definition Kennzahlen.....	46
4.2.2	Zielsystem	50
4.2.3	Vergleich und Priorisierung der Kennzahlen.....	51
4.3	Darstellung Materialfluss mit I4.P-Kennzahlen im Ist-Zustand	52
4.3.1	Gefahrene Strecke.....	52
4.3.2	Wandlungsfähigkeit des Systems	54
4.3.3	Dispositionsaufwand.....	56
4.3.4	Durchlaufzeit.....	56
4.3.5	Flexibilität.....	58
5	Handlungsoptionen	59
5.1	Option 1: Automatisierung des Transportprozesses.....	61
5.1.1	Beschreibung der Option	61
5.1.2	Darstellung Effizienzverbesserung	63
5.1.3	Einordnung Industrie 4.0 Kontext.....	69
5.2	Option 2: Job Enrichment durch Assistenzgeräte	71
5.2.1	Einordnung Assistenzgeräte	71

5.2.2	Beschreibung des Szenarios	72
5.2.3	Darstellung der Effizienzverbesserung	73
5.2.4	Einordnung Industrie 4.0 Kontext.....	78
5.3	Option 3: Hybridszenario.....	81
5.3.1	Beschreibung der Option	81
5.3.2	Darstellung der Effizienzverbesserung	82
5.3.3	Einordnung Industrie 4.0 Kontext.....	85
5.4	Vergleich der Szenarien nach Zielerreichung.....	88
5.5	Einordnung der Szenarien und Handlungsempfehlung	90
5.6	Maßnahmen	93
5.6.1	Produktionsstrukturierung	94
5.6.2	Gestaltung des Materialflusses.....	95
5.6.3	Gestaltung des Informationsflusses.....	99
5.6.4	Planung der Umsetzung	103
5.7	Thematische Zusammenfassung	108
	Literaturverzeichnis	110
	Anhang.....	121
	Eidesstattliche Erklärung	128

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Skizze Layout Produktionsstätte Pfannenberg GmbH; eigene Darstellung	12
Abbildung 2 - Die vier Stufen industrieller Revolutionen; Spath, 2013, S. 23	19
Abbildung 3 – Gegenüberstellung äußere – innere Komplexität, © Fraunhofer IPA; Quelle: Bauernhansl, 2014, S. 14	20
Abbildung 4 - Schematischer Aufbau eines CPS; Veigt, 2013	21
Abbildung 5 - Anforderungen CPS; eigene Darstellung	22
Abbildung 6 - Materialfluss I3.0 und I4.0; Günthner, 2010, S. 45	23
Abbildung 7 - Dynamisches Agentenkonzept; Nach: Yousefifar, 2014, S. 8f.	31
Abbildung 8 – Agentenkonzept Planungsprozess Industrie 4.0; eigene Darstellung	32
Abbildung 9 - Zielsystem in der Logistik mit Anmerkungen / Soll I4.0; nach Nyhuis, 2012, S. 276	38
Abbildung 10 - Vergleich Kenngrößen I3.0 und I4.0 / Soll I4.0; eigene Darstellung	39
Abbildung 11 - Unterschiedlichen Stufen der Logistikentwicklung; Weber, 2012, S. 5	41
Abbildung 12 - Zielsystem in der Logistik mit Anmerkungen / Soll I4.P; Nach Nyhuis 2012, S. 276	50
Abbildung 13 - Vergleich Kenngrößen I3.0 und I4.0 / Soll I4.P (links) mit Soll I4.0 (rechts oben); eigene Darstellung	51
Abbildung 14 - Differenzierung Übergangszeit Kunststofffertigung; eigene Darstellung	57
Abbildung 15 - Differenzierung Übergangszeit Filterlüfterfertigung; eigene Darstellung	57
Abbildung 16 - ERC 215a; Quelle: Jungheinrich, 2016a	61
Abbildung 17 - Einordnung APM hinsichtlich der CPS Anforderungen; eigene Darstellung	69
Abbildung 18 - Anforderungen CPS im Werkzeugszenario; eigene Darstellung	79
Abbildung 19 - Einordnung Hybridszenario hinsichtlich der CPS Anforderungen; eigene Darstellung	86
Abbildung 20 - Vergleich der Anforderungserfüllung bezüglich CPS; eigene Darstellung	90
Abbildung 21 - Vorgehensweise Maßnahmenplanung; vgl. Erlach, 2010, S. 125	93
Abbildung 22 - Skizze Layout Pfannenberg mit Bahnhöfen; eigene Darstellung	94
Abbildung 23 - 2x3 Bahnhof bei der JH AG; eigene Darstellung	97
Abbildung 24 - Ausschnitt Übersicht Material- und Nachrichtenflüsse Hybridszenario; eigene Darstellung, Bildquelle APM: Jungheinrich, 2016a	101
Abbildung 25 - Kommunikationsarchitektur mit Assistenzgeräten; eigene Darstellung,	105
Abbildung 26 - Datenfunkterminal, Jungheinrich, 2016b, S. 10	106

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Darstellung Transportzeiten pro Monat; eigene Darstellung	53
Tabelle 2 - Gefahrene Strecke / Kapazitätsauslastung Option APM; eigene Darstellung	64
Tabelle 3 - Übergangszeiten Automatisierungsszenario; eigene Darstellung	66
Tabelle 4 - Reaktionszeiten Automatisierungsszenario; eigene Darstellung	68
Tabelle 5 - Gefahrene Strecke / Kapazitätsauslastung Werkzeugszenario; eigene Darstellung	74
Tabelle 6 - Übergangszeiten Werkzeugszenario; eigene Darstellung	76
Tabelle 7 - Reaktionszeiten Werkzeugszenario; eigene Darstellung	77
Tabelle 8 - Gefahrene Strecke / Kapazitätsauslastung Hybridszenario; eigene Darstellung	83
Tabelle 9 - Übergangszeiten Hybridszenario; eigene Darstellung	84
Tabelle 10 - Reaktionszeit Hybridszenario; eigene Darstellung	85
Tabelle 11 - Gegenüberstellung Zielerreichung; eigene Darstellung	88
Tabelle 12 - Bahnhofsdimensionierung; eigene Darstellung	95
Tabelle 13 - Inhaltsangabe Nachrichten; eigene Darstellung	102

Abkürzungsverzeichnis

APM	Auto Pallet Mover (engl. Automatischer Palettentransporter)
CAS	Complex Adaptive System (engl. Komplexes adaptives System)
CPS	Cyber-physisches System
CTS	Cellular Transportation System (engl. Zellulare Transport System)
EPK	Ereignisgesteuerte Prozesskette
EPEI	Every Part Every Interval (engl. Alle Teile und Rüstintervalle)
ERP	Enterprise Ressource Planning
HMD	Head-Mounted Display (engl. am Kopf befestigte Anzeige)
I4.0	Industrie 4.0
JH	Jungheinrich AG
MA / M.A.	Mitarbeiter
OEM	Original Equipment Manufacturer (engl. Originalausrüstungshersteller)
PAD	Personal Assistance Device (engl. Persönliches Assistenzgerät)
PF	Pfannenberg GmbH
PPS	Produktionsplanung und Steuerung
SCM	Supply Chain Management
TUL	Transport, Umschlag und Lager
UML	Unified Modeling Language
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VMI	Vendor Managed Inventory (engl. Lieferantengesteuerter Bestand)
WSA	Wertstromanalyse
WSD	Wertstromdesign
WMS	Warehouse Management System (engl. Lagerverwaltungssystem)
ZP	Zeitpunkte (Imaginäre Einheit auf Basis von Stunden mit konstantem Faktor)

Abstract

Was bedeutet Industrie 4.0 für den Hamburger Mittelstand und welche Entwicklungspotenziale ergeben sich aus dem technologischen Fortschritt? Diesen Fragen haben sich die Pfannenberg GmbH und die Jungheinrich AG gestellt. Eine Antwort soll in dieser Arbeit mit einer Handlungsempfehlung für die Umsetzung von ersten Schritten in Richtung Industrie 4.0 gegeben werden.

Um ein Soll-Industrie 4.0 Szenario für die Pfannenberg GmbH zu entwerfen benötigt es die Komponenten Ist-Zustand Pfannenberg und Soll-Zustand Industrie 4.0 Dazu wurde zum einen bei der Pfannenberg GmbH ein Referenzprozess ausgewählt und mit dem Wertstromdesign und der Ereignisgesteuerten Prozesskette analysiert. Zum anderen wurden die Anforderungen an die cyber-physischen Systeme, welche im Mittelpunkt von Industrie 4.0 stehen, diskutiert und zusammengefasst. Die Anforderungen können mit den Oberbegriffen heterarchische Organisation, intelligente Prozesssteilnehmer, Dynamik und Echtzeitfähigkeit zusammengefasst werden. Darauf basierend wurde anschließend eine Darstellung des Planungsprozesses in der Industrie 4.0-Umwelt erarbeitet.

Mit der Grundlages des Ist-Zustandes und der damit verbundenen Einschränkungen sowie des theoretischen Zielzustands wurden Kennzahlen zur Messung der Effizienzverbesserung definiert und für den angestrebten Zwischenzustand – Industrie 4.P – weiterentwickelt. Damit wurde eine Bewertungsbasis geschaffen um, verschiedene Handlungsoptionen zu vergleichen.

Sich an den Entwicklungstendenzen von Industrie 4.0 orientierend wurden drei Szenarien definiert und bewertet. Der Pfannenberg Referenzprozess wurde den Ideen des Werkzeug-, Hybrid-, und Automatisierungsszenarios folgend weiterentwickelt. Die Bewertung erfolgte anhand der definierten Kennzahlen und der Anforderungen an die cyber-physischen Systeme. Nach der Empfehlung eines Szenarios wurden für dieses weitere Spezifikationen und erste Maßnahmen, wie Kommunikationsarchitekturen und –strukturen sowie die Definition der Material- und Informationsflüsse, für die Umsetzung entwickelt

1 Einführung

Zu Beginn soll dieses Kapitel eine Übersicht über diese Arbeit geben. Dafür wird die Grundlage des Projekts, die Kooperation zwischen der Jungheinrich AG und der Pfannenberg GmbH, vorgestellt, auf die Motivation der beiden Unternehmen eingegangen sowie die Zielsetzung und der Aufbau der Arbeit beschrieben.

1.1 Vorstellung der Kooperation JH und PF

Das Thema Industrie 4.0 ist seit einigen Jahren fester Bestandteil der Literatur, Presse und Diskussionsrunden. Sogar auf der Hannover Messe 2014 und 2016 hat die deutsche Bundeskanzlerin den Leidensdruck der Unternehmen, sich zu vernetzen und die Digitalisierung voranzutreiben, angesprochen. Sie verwies dabei auf die Plattform Industrie 4.0, die Chancen und Herausforderungen der neuen Entwicklung diskutiert.¹ In diesem Rahmen beschäftigt sich die Hamburger Dialogplattform Industrie 4.0 damit, wie Industrie 4.0 für Hamburger Unternehmen greifbar wird, was Industrie 4.0 für sie bedeutet und welche Konsequenzen sich ergeben. Die Dialogplattform, die sich aus Hamburger Unternehmen zusammensetzt, wird dabei von Wirtschaftsverbänden wie dem VDI und den Hamburger Hochschulen unterstützend begleitet.²

Im Rahmen der Arbeitsgruppe "Was verändert sich in der Logistikkette" der Hamburger Dialogplattform haben sich die Jungheinrich AG, Anbieter von Flurförderzeug-, Lager- und Materialflusstechnik aus Norderstedt, und die Pfannenberg GmbH, Anbieter von Klimatisierungs-/ Signaltechnik für die Industrie, aus Hamburg zusammengefunden und das in dieser Arbeit betrachtete Thema erarbeitet.

Neben dem gemeinsamen Interesse an Industrie 4.0 und dem Wissen um die zukünftige Bedeutung wollen beide Unternehmen frühzeitig die entstehenden Veränderungen kennenlernen. Die Motivation der Jungheinrich AG ist es, festzustellen, inwieweit ihre Produkte der Intralogistik schon heute die Anforderungen aus Industrie 4.0 erfüllen und inwieweit es neue Technologien gibt, die in die Jungheinrich-Produkte einfließen müssen oder ob gänzlich neue Produkte benötigt werden.

¹ Vgl. Merkel, 2016; S. 1, Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, 2014, S. 1

² Vgl. Neumüller, 2015, S. 1

Die Pfannenberg GmbH erwartet durch das Projekt eine Prozessoptimierung der Intralogistik, eine Standardisierung der Kommunikation der Fertigungssysteme zur Optimierung der Intralogistik, die Kopplung des Informationsflusses zwischen Maschine, Logistik und Produktion auf Basis des bereits eingesetzten ERP-Systems, eine Optimierung der Warenflüsse und eine Automatisierung des Transportes. Die Pfannenberg GmbH stellt für dieses Projekt den Herstellungsprozess der Filterlüfter als Anschauungs- und Bearbeitungsobjekt bereit, die Jungheinrich AG bringt sich mit ihrem Wissen bezüglich Transportlösungen für die Intralogistik ein.

1.2 Zielsetzung

Wie im Titel bereits definiert, soll im Rahmen dieser Arbeit die Empfehlung einer Handlungsoption vorgenommen werden, wie mit cyber-physischen Systemen und den Methoden des Lean Management ein Materialfluss optimiert werden kann.³ Dabei sollen die folgenden Fragen, die auch den Weg zu diesem Ziel beschreiben und sich aus den Erwartungen der Unternehmen ableiten lassen, beantwortet werden.

- Wie komme ich von der Industrie 3.0 zur I4.0?
- Was sind die Anforderungen an die CPS?
- Welche Entwicklungspotenziale können realisiert werden?
- Welche konkreten Handlungsoptionen (Maßnahmen) können ergriffen werden?

So findet sich beispielsweise in der Frage nach den Anforderungen an die CPS Jungheinrichs Interesse an der Einordnung der eigenen Produkte wieder, während die Entwicklungspotenziale zu der Prozessoptimierung bei Pfannenberg assoziiert werden kann. Für das Ziel „Erarbeitung von Handlungsoptionen“ gilt, dass ein Unternehmen des Mittelstandes den Maßstab bestimmt. Dementsprechend stehen Umsetzbarkeit und Anwendungsbezug im Vordergrund, um durch diese Arbeit den Projektpartnern eine Richtung für die Umsetzung der Ideen von Industrie 4.0 aufzuzeigen. Die Umsetzung selbst ist nicht Teil der Betrachtung dieser Arbeit.

³ Anmerkung: Zwar wird auf das Lean Management verwiesen, im Vordergrund stehen jedoch die cyber-physischen Systeme.

1.3 Aufbau

Die Arbeit ist in fünf Kapitel gegliedert. Das erste Kapitel widmet sich der Einführung in die Arbeit. Im zweiten Kapitel wird der Ist-Zustand des Referenzprozesses bei der Pfannenberg GmbH dargestellt. Dafür wird der betrachtete Prozess vorgestellt und dann basierend auf einer Methodendiskussion dargestellt.

Im dritten Kapitel wird anschließend das Soll-Szenario Industrie 4.0 beschrieben. Zum einen wird die Idee hinter dem Schlagwort Industrie 4.0 erläutert, mit den Anforderungen an cyber-physische Systeme präzisiert und basierend auf einer erneuten Methodendiskussion der Planungsprozess dargestellt. Zum anderen wird sich im dritten Kapitel der Effizienzverbesserung gewidmet. Kennzahlen werden definiert, eingeordnet und verglichen. Abgerundet wird das Kapitel mit einer Einordnung von Industrie 4.0 in das Logistik-Management.

Im vierten Kapitel werden die erarbeiteten Inhalte zu Industrie 4.0 auf die Pfannenberg GmbH angewendet. Die Kennzahlen zur Effizienzverbesserung werden der Anwendung entsprechend adaptiert und anschließend wird mit ihnen der Ist-Zustand bewertet.

Im fünften Kapitel werden drei Soll-Szenarien vorgestellt und verglichen. Anschließend wird ein Szenario ausgewählt und eine Handlungsempfehlung für die beteiligten Unternehmen ausgesprochen. Zum einen wie der Referenzprozess verändert werden soll und zum anderen welche Rolle die Fördermittel spielen. Für diese Handlungsoption werden dann erste Maßnahmen für die Umsetzung beschrieben. Abschließend werden die Ergebnisse der eingangs gestellten Fragen für die Zielsetzung zusammengefasst.

Außerhalb dieser Arbeit besteht ein Band der externen Anhänge. Dieser ist mit einem Sperrvermerk der Pfannenberg GmbH und der Jungheinrich AG versehen, da es sich um sensible Daten der Unternehmen handelt.

2 Ist-Darstellung

2.1 Filterlüfter- und Kunststofffertigung bei Pfannenberg

Die Pfannenberg GmbH fertigt am Standort Hamburg verschiedene Modelle und Varianten von Filterlüftern in drei Fertigungsschritten. Im ersten Schritt, der Kunststofffertigung, werden an fünf Spritzgussmaschinen Designdeckel, Grundgehäuse und Logoträger hergestellt. Die Grundgehäuse werden anschließend an der Schäummaschine mit einer Dichtung versehen. An drei U-förmigen Zellen werden im nächsten und letzten Schritt die Filterlüfter, bestehend noch aus weiteren Zukaufteilen, montiert. In dem Hochregallager werden sämtliche Teile zwischengelagert und bei Bedarf bereitgestellt. Der Logistik stehen zum Materialtransport zwischen den Fertigungsschritten zwei Schubmast- und ein Frontstapler sowie mehrere Niederhubwagen zur Verfügung. Die Abbildung 1 zeigt eine Skizze des Layouts der Produktionsstätte der Pfannenberg GmbH. Der Material- und Auftragsfluss wird in Kapitel 2.3 detailliert dargestellt.

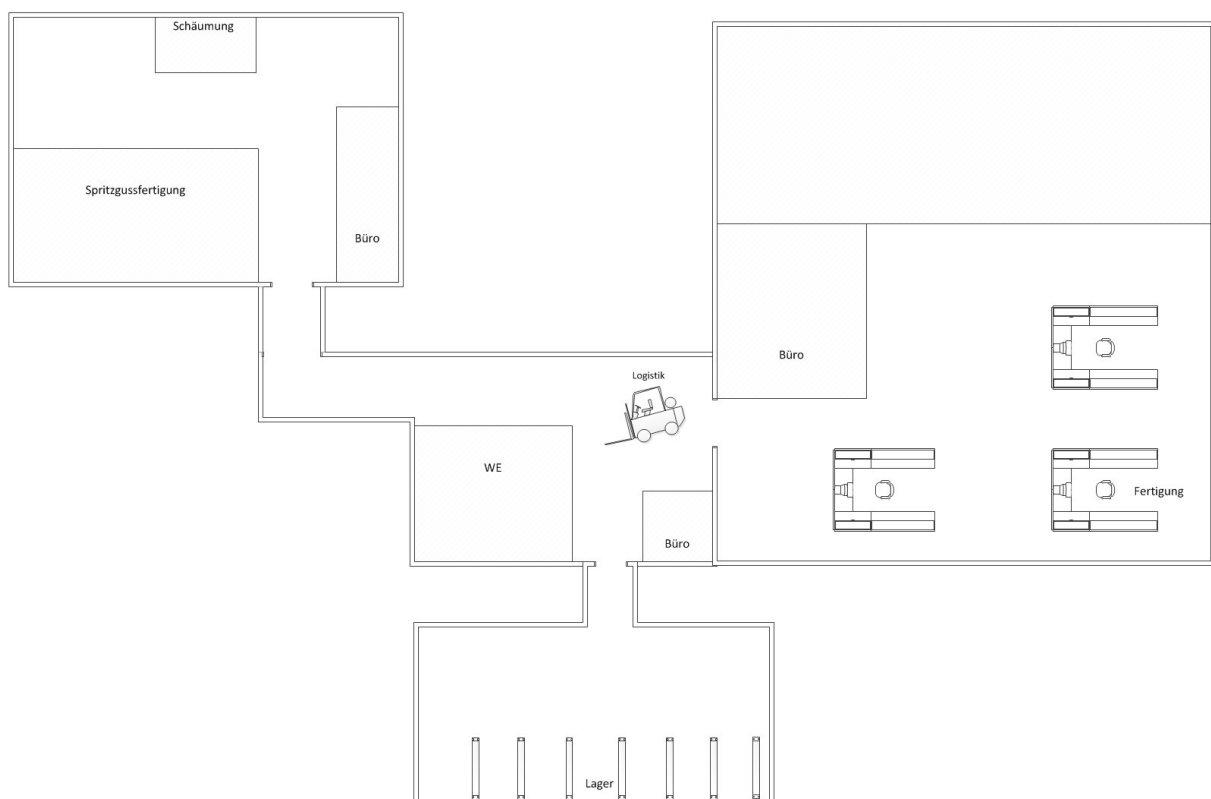


Abbildung 1 - Skizze Layout Produktionsstätte Pfannenberg GmbH; eigene Darstellung

2.2 Methodenwahl

Zum einen als Basis für ein Prozessverständnis und zum anderen für einen späteren Ist-Soll-Vergleich muss der Ist-Zustand aufgenommen werden. In Bezug auf die Anforderungen der Industrie 4.0 (vgl. Kapitel 3.2) sind dabei der Materialfluss, der Informationsfluss und der Entscheidungsprozess von Bedeutung. Eine detaillierte Darstellung des Materialflusses im Ist-Zustand ist von Interesse, da dieser die Zusammenhänge und die Teilnehmer am Fluss zeigt. Die Zusammenhänge sind für eine Effizienzverbesserung von Bedeutung (vgl. Kap. 3.4), die Teilnehmer für eine spätere Differenzierung und Bildung von CPS (vgl. Kap. 5). Informationsfluss und Entscheidungsprozess werden als Grundlage für eine Definition der Architektur der Kommunikation und Entscheidungsfindung des Soll-Prozesses benötigt. Zusammenfassend lassen sich drei Kernfragen bilden:

- Welchen Weg nimmt das Material?
- Wo und wie wird es (an-)gesteuert?
- Wie erfolgt die Planung?

Diesen Anforderungen folgend werden ein oder mehrere Modelle zur Darstellung des Ist-Zustandes benötigt. Zur Beantwortung der Fragestellung nach einer ganzheitlichen Methode zur Prozessdarstellung wurden mehrere Methoden zur Prozessaufnahme und –darstellung von Schneider untersucht und bewertet. Dabei werden die untersuchten Methoden hinsichtlich der Zielkriterien Prozessgestaltung, Prozessverständnis, Prozessleistung und Prozesslogik verglichen und bewertet.⁴

Bezogen auf die Prozessgestaltung wird als Alleinstellungsmerkmal für die VDI 3300⁵ die explizite und spezifische Darstellung der logistischen Vorgänge herausgehoben.⁶ Dies ist jedoch auch mit der Herangehensweise des Wertstromdesigns für die Logistik, die von Schneider nicht betrachtet wurde, möglich darzustellen.⁷ Diese Fähigkeit, den Materialfluss in der beschriebenen tiefen Detaillierungsstufe mit den logistischen Vorgängen sowie die Möglichkeit den Informationsfluss abzubilden und die Optionen in der Darstellung der Prozessbewertung, machen die Methode des Wertstromdesigns, im Gegensatz zu den anderen von Schneider diskutierten Methoden, zur am

⁴ Vgl. Schneider, 2011, S. 1ff.

⁵ Anmerkung: Die VDI 3300 beschreibt Materialfluss-Untersuchungen, siehe VDI 3300, 1973

⁶ Vgl. Schneider, 2011, S. 6

⁷ Vgl. Günthner, 2013, S. 19ff.

besten geeigneten Wahl zur Darstellung des Material- und Informationsflusses. Zum einen ist die Methode des Wertstromdesigns im Gegensatz zur VDI 3300 und anderen Methoden wie dem SCOR-Modell⁸ oder dem Sankey-Diagramm⁹ mit ihrer Gliederung in Ist-Analyse und Soll-Konzept nicht nur eine Methode zur Prozessdarstellung, sondern auch ein mächtiges Werkzeug für eine weiterführende Optimierung des aufgenommenen Prozesses.¹⁰ Zum anderen muss hinsichtlich der sehr gut bewerteten Methode nach der VDI 3300 angemerkt werden, dass sie den Materialfluss zwar außerordentlich darstellt, nicht aber den Informationsfluss.¹¹ Die Darstellung mit dem Wertstromdesign zeigt zwar die Informationsflüsse, jedoch, wie auch die VDI 3300, nicht den für die Betrachtung im Rahmen dieser Arbeit erforderlichen detaillierten Entscheidungsprozess. Hier wird eine zweite Methode herangezogen, da keine der untersuchten Methoden allein alle Anforderungen zufriedenstellend erfüllt.

Als Methode für die Darstellung des Entscheidungsprozesses, ergänzend zum Wertstromdesign, wurde die Methode der Ereignisgesteuerten Prozesskette (EPK) gewählt. Diese wurde im Gegensatz zur Prozessorientierten Analyse¹², der SysML oder UML¹³ gewählt, da die Ereignisgesteuerte Prozesskette am besten für die Darstellung der Informationsfluss-Vorgänge und der Verzweigungen geeignet ist. Hinsichtlich der Abbildung der Prozesslogik kann die EPK-Methode durch die Verwendung der Booleschen-Bedingungen Verzweigungen eindeutig und übersichtlich beschreiben. Hinzu kommen die Bekanntheit und die relative Einfachheit der Methode, wodurch sie sich insbesondere an der Schnittstelle zwischen Theorie und Praxis sehr gut verwenden lässt.¹⁴ Durch die Option sowohl nach zeitlichen als auch nach logischen Aspekten differenzieren zu können und zusätzlich durch die breite Palette an Elementen zur Abbildung des Prozesses ist die EPK-Methode ein sehr flexibles und ausdrucksstarkes Werkzeug.¹⁵ Die auf UML aufbauenden Methoden bieten zwar eine komplexere Sprache mit mehr Bausteinen an, da die zur Unterstützung des WSD gesuchte Methode jedoch nur Informationsflüsse abbilden muss, reichen die Bau-

⁸ Anmerkung: Zu SCOR-Modell siehe: Becker, 2008, S. 146ff.

⁹ Anmerkung: Zu Sankey-Diagramm siehe: Schmidt, 2006, S. 3ff.

¹⁰ Vgl. Günthner, 2013, S. 135

¹¹ Vgl. Schneider, 2011, S. 10ff.

¹² Anmerkung: Zu Prozessorientierte Analyse siehe: Meyer, 2005, S. 1ff.

¹³ Anmerkung: Zu SysML und UML siehe: Grässle, 2007, S. 22ff. und S. 47ff.; Wenger, 2002, S. 8ff.

¹⁴ Vgl. Schneider, 2011, S. 4, S. 11f., S. 14ff.

¹⁵ Vgl. Schneider, 2011, S. 3

steine der EPK-Methode aus, während sie gleichzeitig die Anforderungen an die Übersichtlichkeit wahren.¹⁶

Mit den Methoden des Wertstromdesign und der Ereignisgesteuerten Prozesskette lassen sich der Materialfluss, der Informationsfluss und der Entscheidungsprozess sehr übersichtlich und vollständig abbilden. Außerdem lassen sich Ist und Soll der Prozesse, insbesondere der Logistik-Prozesse, bestmöglich abbilden. Darüber hinaus bietet die Darstellung der Informationsflüsse eine gute Schnittstelle für die mit der EPK-Methode dargestellten Entscheidungsprozesse. Durch die Kombination der beiden Methoden zur Prozessdarstellung können sowohl die Material- als auch die Informationsflüsse bei der Pfannenberg GmbH abgebildet und für die Optimierungsvorhaben dieser Arbeit als übersichtliche Grundlage genutzt werden.

2.3 Darstellung

In den folgenden Abschnitten wird auf die Darstellung des Ist-Zustandes mit den gewählten Methoden eingegangen und die Erkenntnisse aus der Analyse dargelegt. Die Modelle finden sich im Anhang.¹⁷

2.3.1 Wertstromdesign

Mit der Methode des Wertstromdesigns sollen die Material- und Informationsflüsse dargestellt werden. Als Grundlage für die Herangehensweise und Darstellung dienen die Beschreibungen von Erlach.¹⁸ Da die Wertstromdarstellung von Erlach sich auf die Produktionsprozesse fokussiert und Logistikprozesse nur nebensächlich betrachtet, wird sie hier mit der von Günthner erarbeiteten Entwicklung des Wertstromdesigns, dem Logistikorientierten Wertstromdesign, in Symbiose verwendet.¹⁹ Der Logistikorientierte Wertstromdesign folgt dabei den Prinzipien des Wertstromdesigns von Erlach, mit dem Zusatz, dass er die Logistikprozesse ebenfalls aufnimmt. Prozesse wie Lagern oder Transportieren erhalten eigene Datenkästen und fließen in die spätere Analyse mit ein.²⁰

¹⁶ Vgl. Schneider, 2011, S. 4

¹⁷ Vgl. Anhang E.2, E.3 und E.4

¹⁸ Vgl. Erlach, 2010

¹⁹ Vgl. Günthner, 2013, S. 135ff.

²⁰ Vgl. Günthner, 2013, S. 135ff.

Diese Symbiose der zwei Herangehensweisen des Wertstromdesigns ist möglich, da im vorliegenden Fall alle Produkte denselben Weg durch die Fabrik nehmen. So steht bei Günthner der Weg bzw. die Logistikprozesse zwischen zwei Produktionsprozessen im Vordergrund,²¹ während Erlach den Fokus auf die Produkte und ihren jeweiligen Weg durch die Fabrik legt.²² Günthner grenzt den betrachteten Bereich ein, um die Zwischenschritte zwischen zwei Produktionsprozessen abzubilden, Erlach dagegen betrachtet das Netzwerk, welches die verschiedenen Produkte und ihre unterschiedlichen Produktionsschritte bilden, ohne Detaillierung der Prozesse zwischen zwei Fertigungsschritten. Beides zu kombinieren würde daher dazu führen, dass die angestrebte Übersichtlichkeit der Verfahren durch Prozesslänge und Detaillierung verloren geht. Für den betrachteten Anwendungsfall gilt dies nicht, da, wie nachfolgend beschrieben, alle Produkte denselben Weg durch die Fabrik nehmen. Die Komplexität des Netzwerks ist überschaubar.

Für die Wertstromanalyse der Kunststoff- und Filterlüfterfertigung wurden als Repräsentanten der nachfrageorientierten Segmentierung folgend die Modelle PF 43000 24DC 54 7035 (Läufer²³), PF 43000 230V 54 7032 A (Renner) und PF 43000 230V 54 7035 (Penner) gewählt.²⁴

Alle drei Repräsentanten durchlaufen den gleichen Materialfluss, sie unterscheiden sich lediglich in manchen Komponenten. Für den Materialfluss und die verschiedenen Zeiten wurde als kritische Komponente das Grundgehäuse PF4x o.S. 7035²⁵ und das Grundgehäuse PF4xx00 7035 gewählt. Diese Auswahl wurde getroffen, da Grundgehäuse PF4x o.S. 7035 das einzige Teil ist, welches von der Pfannenbergh GmbH gespritzt wird, die Schäumung durchläuft sowie von allen drei Repräsentanten verwendet wird.²⁶ Da dieses Teil, nachdem es geschäumt wurde, eine neue Bezeichnung und Artikelnummer bekommt, wurde der Prozess, auch der Übersicht halber, in zwei Teilprozesse, in die Kunststoff- und die Filterlüfterfertigung, unterteilt.

Für die Wertstromanalyse wurde der Fokus, der Zieldefinition und Priorisierung in Kapitel 3.4.1.4 folgend, auf die Übergangszeit gelegt. Die Werte sind Schätz- und

²¹ Vgl. Günthner, 2013, S. 138

²² Vgl. Erlach, 2010, S. 38ff.

²³ Anmerkung: Bezüglich Bedeutung „Läufer“, „Renner“ und „Penner“ siehe Erlach, 2013, S. 132f.

²⁴ Vgl. Erlach, 2010, S. 131f.; Anhang E.1; Anhang E.5

²⁵ Anmerkung: o.S. steht für ohne Schäumung

²⁶ Vgl. Anhang E.1

Mittelwerte beruhend auf Messungen vor Ort und Befragungen der beteiligten Mitarbeiter. Bei dem Kunststoffprozess macht die Übergangszeit 10,31 % und bei dem Prozess Filterlüfterfertigung 10,79 % der Durchlaufzeit aus.²⁷

Nach Nyhuis wird die Übergangszeit als ZUE, Liegen nach Bearbeitung, Transport, und Liegen vor Bearbeitung, definiert.²⁸ Zu erkennen ist zum einen, dass Transporte nur einen geringen Teil der Übergangszeit ausmachen und zum anderen, dass ein Großteil der Übergangszeiten einer frühzeitigen Bereitstellung bzw. Kommissionierung und daraus resultierenden langen Liegezeiten geschuldet sind. An der Schäummaschine werden die Aufträge in kompletter Losgröße, einem Monatsbedarf, bereitgestellt. Im Prozess Filterlüfterfertigung werden mindestens die Aufträge für den nächsten Tag kommissioniert und bereitgestellt.²⁹

Außerdem wurde die Produktionssteuerung aufgenommen und im Wertstrom abgebildet.³⁰ Diese zeigt eine zentrale Ansteuerung der Spritzgussfertigung, der Schäumung und der Filterlüfterfertigung durch Fertigungsaufträge vom PPS. Die Bereitstellung für die Filterlüfterfertigung und die Schäumung erfolgen mit Kommissionieraufträgen bzw. Fahrbefehlen. Alle weiteren Transportprozesse werden durch die Push/Pull „Go-See“-Steuerung angestoßen. Außerdem ist im Filterlüfter-Fertigungsprozess ein Kanban-Prozess abgebildet. Dieser wird hier jedoch außer Acht gelassen, da der Prozess erst während der Erstellung dieser Arbeit implementiert wurde. Daten konnten hierfür noch nicht erhoben werden.³¹

Darüber hinaus werden in der Darstellung keine weiteren Informationen, zum Beispiel über die Kunden, vor- und nachgelagerte Prozesse, abgebildet, da für diese Arbeit eine weiterführende Analyse nicht erforderlich ist. Es soll lediglich Der Ist-Zustand der relevanten Zusammenhänge, dem Materialtransport im Fabrikgebäude der Pfannenberg GmbH, dargestellt werden.

²⁷ Vgl. Anhang: E.2 und E.3

²⁸ Vgl. Nyhuis, 2012, S. 21f.

²⁹ Vgl. Anhang: E.2 und E.3

³⁰ Vgl. Günthner, 2013, S. 209ff.

³¹ Vgl. Anhang: E.2 und E.3

2.3.2 Ereignisgesteuerte Prozessketten (EPK)

Insbesondere die Materialflüsse werden von der Methode des Wertstromdesigns umfänglich und übersichtlich dargestellt. Die Informationsflüsse werden dagegen lediglich angedeutet. Fertigungsprozesse werden per Auftrag vom PPS angestoßen. Die dahinter liegenden Prozesse werden nicht detailliert betrachtet. Da sie jedoch für die weiteren Betrachtungen von großer Relevanz sind, soll mit der Methode der Ereignisgesteuerten Prozessketten die Steuerungssicht, die vom Wertstromdesign als ein Baukasten mit gerichteten Kanten aufgenommen wurde, detailliert dargestellt werden und dadurch die dahingehend nicht umfassende Darstellung des Wertstromdesigns vervollständigen. Mit den Elementen der EPK-Modellierungssprache³² soll der Prozess der Fertigungsplanung der Pfannenberg GmbH für die Kunststoff- und Filterlüfterfertigung dargestellt werden.³³

Mit der Methode wird der Ablauf der Fertigungsplanung übersichtlich wiedergegeben und die Komplexität deutlich herausgestellt. Es zeigen sich die verschiedenen Komponenten der Planung, wie die Kapazitäts- und Materialprüfung, und die am Prozess beteiligten Stellen. Dieser Aspekt, dass die Planung sowohl zum Teil manuell und als auch automatisch vom ERP-System durchgeführt wird, zeigt erst das mit der EPK-Methode erstellte Modell. Aus dem WSD geht diese Differenzierung nicht hervor. Das Zusammenspiel der Fertigungsplaner und des von Pfannenberg verwendeten ERP-Systems wird durch das Element „Organisatorische Rolle“ abgebildet. Deutlich wird hier insbesondere die Teilautomatisierung des Prozesses. Planungsvorschläge werden vom ERP-System erstellt, die Feinplanung wird jedoch manuell vom Fertigungsplaner durchgeführt. Weiter ist zu beachten, dass Teilprozesse sich vielfach verzweigen, parallel ablaufen und anschließend wieder zusammengeführt werden. Die dadurch entstehenden Abhängigkeiten verkomplizieren einerseits das System, andererseits werden so Wiederholungsschleifen gespart.

³² Vgl. Becker, 2012, S. 15ff.; Alpar, 2014, S. 144ff.; Nüttgens, 2002, S. 65ff.

³³ Vgl. Anhang E.4

3 Soll-Szenario Industrie 4.0

In diesem Kapitel wird auf die Entwicklung von der Industrie 3.0 zur Industrie 4.0, den damit einhergehenden cyber-physischen Systemen und auf die Darstellung des Materialflusses eingegangen. Zudem findet eine allgemeine Einordnung der Thematik Industrie 4.0 statt. Im anschließenden Kapitel werden die Ergebnisse dann auf die Pfannenbergl GmbH bezogen.

3.1 Industrie 4.0

Die Einbindung von cyber-physischen Systemen in die Produktion und Supply Chain wird, bei zunehmender Komplexität, als vierte industrielle Revolution bezeichnet. Es beschreibt eine Weiterentwicklung der in der dritten industriellen Revolution mit Elektronik und IT automatisierten Produktion. (vgl. Abbildung 2)

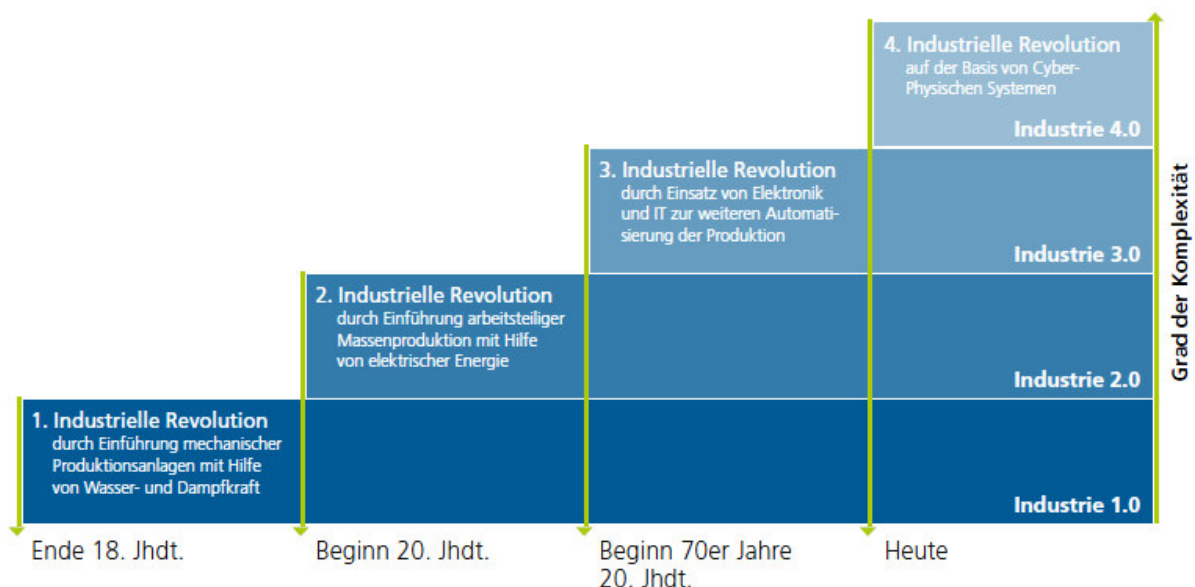


Abbildung 2 - Die vier Stufen industrieller Revolutionen; Spath, 2013, S. 23

Weiter steht Industrie 4.0 für eine vierte Revolution der Industrie, die von einer weiteren Entwicklung der Märkte und seiner Teilnehmer bedingt ist. Unternehmen müssen auf personalisierte und regionalisierte Kundenwünsche und damit verbundenen geringen Stückzahlen pro Modell eingehen. Auf diese Intransparenz und Dynamik der Nachfrage müssen die Unternehmen mit Flexibilität und Wandlungsfähigkeit antwor-

ten.³⁴ Abbildung 3 zeigt zum einen die externe Komplexität, beispielsweise die Mengenflexibilität, in der die Kunden nachfragen, und zum anderen die innere Komplexität des Unternehmens, mit der es auf die veränderte Nachfragestruktur reagieren will. Unter anderem muss ein Lieferantennetzwerk gepflegt werden, um alle Materialien für die kundenspezifische Stückliste beschaffen zu können.

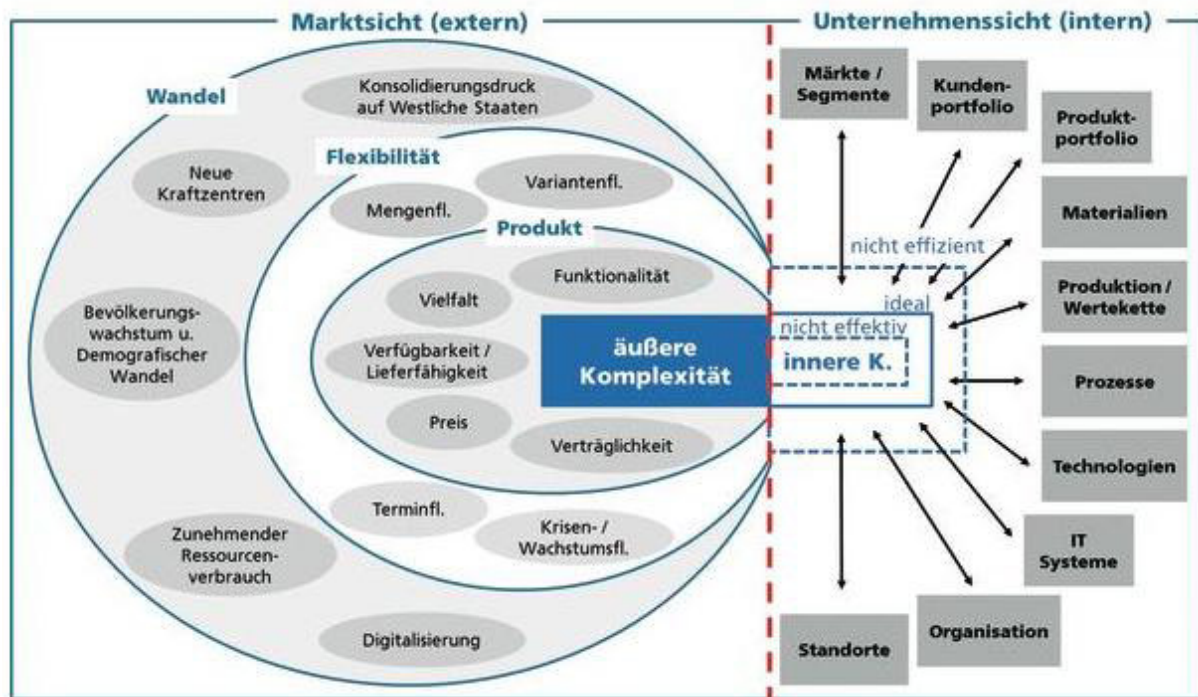


Abbildung 3 – Gegenüberstellung äußere – innere Komplexität, © Fraunhofer IPA; Quelle: Bauernhansl, 2014, S. 14

Weiter wird aus Abbildung 3 deutlich, dass die Unternehmen ihre innere Komplexität die der äußeren, ihres Marktes, anpassen müssen: Nur Komplexität kann Komplexität entgegen gesetzt werden.³⁵

Von Unternehmensseite kann diese Komplexität in zwei Schritten erlangt werden. Über die Fraktale Fabrik nach Warnecke zu cyber-physischen Systemen. Die Fraktale Fabrik ist eine „dezentrale autonome Intelligenz in synergistischen Strukturen“.³⁶ Mit steigender äußerer Komplexität muss auch die innere zunehmen, und damit eine weitere Entwicklung der Dezentralisierung und Autonomie der Fabrik und des Unternehmens hin zu cyber-physischen Systemen. Diese lassen sich definieren als „Objekte, Geräte, Gebäude, Verkehrsmittel, aber auch Produktionsanlagen, Logistik-

³⁴ Vgl. Bauernhansl, 2014, S. 13ff.

³⁵ Vgl. Bauernhansl, 2014, S. 14; Ashby, 1956

³⁶ Bauernhansl, 2014, S. 15

komponenten etc., die eingebettete Systeme enthalten, die kommunikationsfähig gemacht werden. Diese Systeme können über das Internet kommunizieren und Internetdienste nutzen. Cyber-physische Systeme können ihre Umwelt unmittelbar mit ihrer entsprechenden Sensorik erfassen, sie mit Hilfe weltweit verfügbarer Daten und Dienste auswerten, speichern und sie können mit Hilfe von Aktoren auf die physikalische Welt einwirken.[...] Diese CPS können sich dann vernetzen und autonom und dezentral – also ganz im Zeichen dieser selbstähnlichen Produktionsfraktale – Netzwerke aufbauen und sich eigenständig selbst optimieren. Sie können im Zusammenspiel mit dem Menschen eigenständig Probleme lösen.“³⁷

Acatech beschreibt diese cyber-physischen Systeme generell als das Zusammenwachsen der physikalischen und der virtuellen Welt zu einem Internet der Dinge, Daten und Dienste. Der Vorteil für die Fabrik und Unternehmen liegt darin, dass sehr schnell auf Marktveränderungen, Kundenanforderungen und Veränderungen in der Lieferkette reagiert werden kann. Auf die äußere Komplexität der individuellen Kundenanforderungen kann so mit einer adaptiven, sich selbst organisierende Supply

Chain reagiert werden.³⁸ Die selbstorganisierende Supply Chain ist dabei durchgehend vernetzt, vom Endprodukt bis zum Rohmateriallieferanten stehen alle Teilnehmer miteinander in Kontakt. Es findet eine vertikale Integration statt, der Prozess wird ganzheitlich betrachtet.³⁹

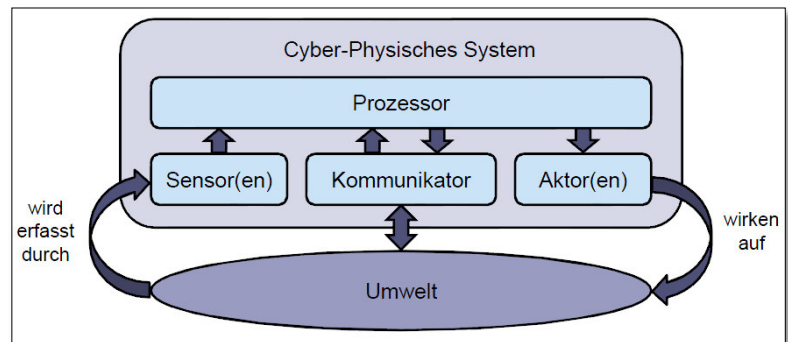


Abbildung 4 - Schematischer Aufbau eines CPS; Veigt, 2013

³⁷ Bauernhansl, 2014, S. 15f.

³⁸ Vgl. Acatech, 2011, S. 5, S. 11, S. 23

³⁹ Vgl. Büttner, 2014, S. 143

3.2 Anforderungen an die cyber-physischen Systeme

In der Literatur werden die cyber-physischen Systeme aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet und beschrieben. Abbildung 5 zeigt eine Zusammenfassung der Anforderungen an die cyber-physischen Systeme. Dabei können die Merkmale in die vier Gruppen, heterarchische Organisation, intelligente Prozessteilnehmer, Dynamik und Echtzeitfähigkeit, eingeordnet werden.

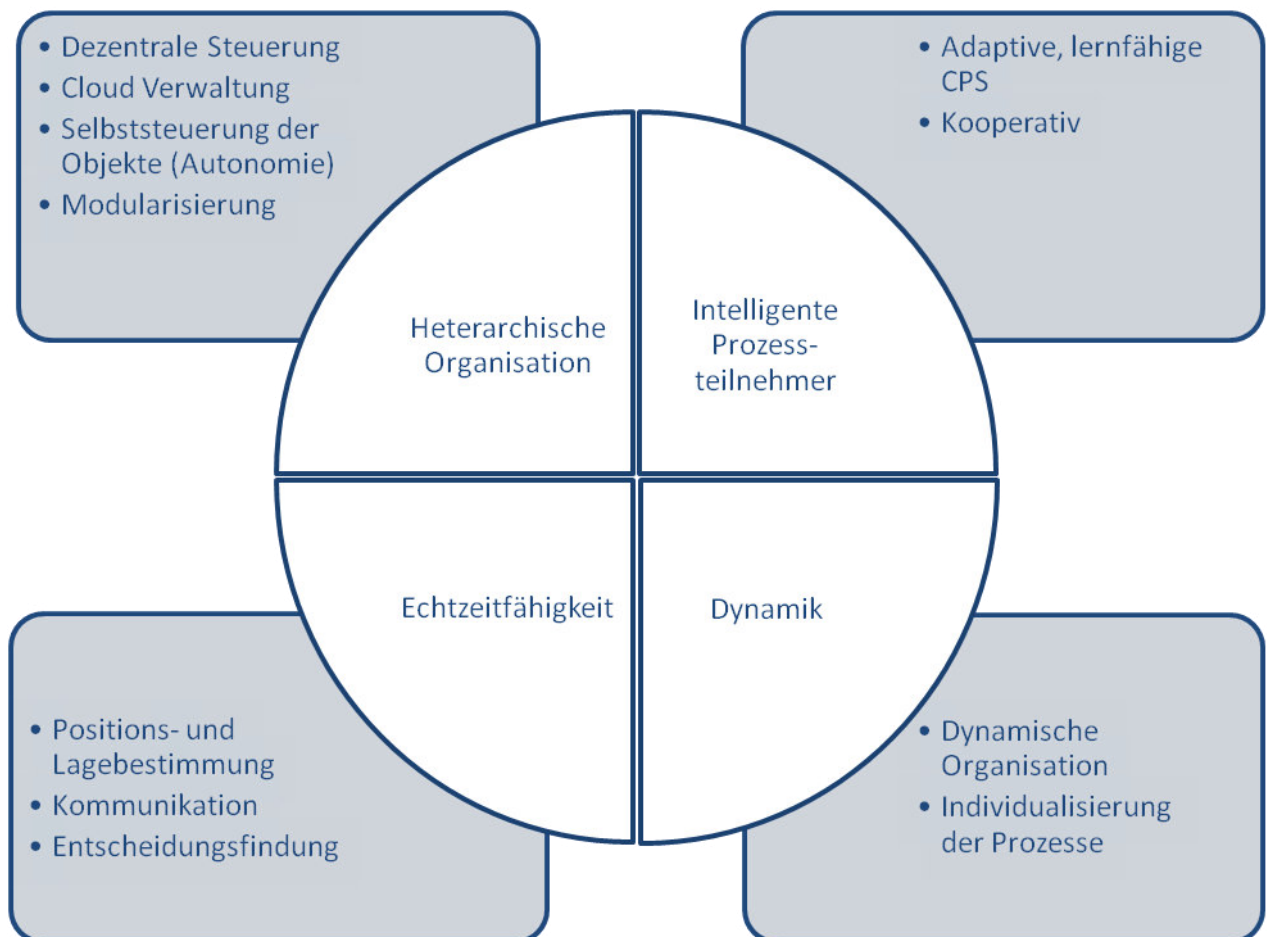


Abbildung 5 - Anforderungen CPS; eigene Darstellung

Zwischen diesen Gruppen bestehen Schnittmengen. Der Übersicht halber werden sie zunächst separat betrachtet, um später eine Bewertung von Szenarien und Handlungsoptionen durchführen zu können. Die Gruppen werden nachfolgend detaillierter beschrieben und anschließend in einen Gesamtzusammenhang gebracht.

3.2.1 Heterarchische Organisation

„Heterarchien sind aus mehreren voneinander unabhängigen ‚Akteuren‘, ‚Entscheidungsträgern‘ oder ‚Potenzialen‘ zusammengesetzte Handlungs- oder Verhaltenssysteme, in denen es keine zentrale Kontrolle gibt, sondern die Führung des Systems in Konkurrenz und Konflikt, in Kooperation und Dominanz, in Sukzession und Substitution sozusagen immer wieder neu ausgehandelt wird oder von Subsystem zu Subsystem bzw. von Potential zu Potential wandert.“⁴⁰ In ein solches dezentrales, hierarchieloses und selbststeuerndes System aus cyber-physischen Systemen soll die herkömmliche Materialflusssteuerung aufgehen (vgl. Abb. 6). Insbesondere die Dezentralität wird aus Gründen größerer Robustheit und Effizienz angestrebt. Mit den Fähigkeiten der Sensorik zur Aufnahme und Einordnung (vgl. Kap. 3.2.2) der entscheidungsrelevanten Umgebungsdaten wird die autonome Entscheidungsfindung ermöglicht und eine dezentrale Organisation vorausgesetzt. Dadurch kann zum einen schneller auf Veränderungen reagiert werden und zum anderen wird durch die Lösungskompetenz der Teilsysteme das Gesamtsystem entlastet.⁴¹

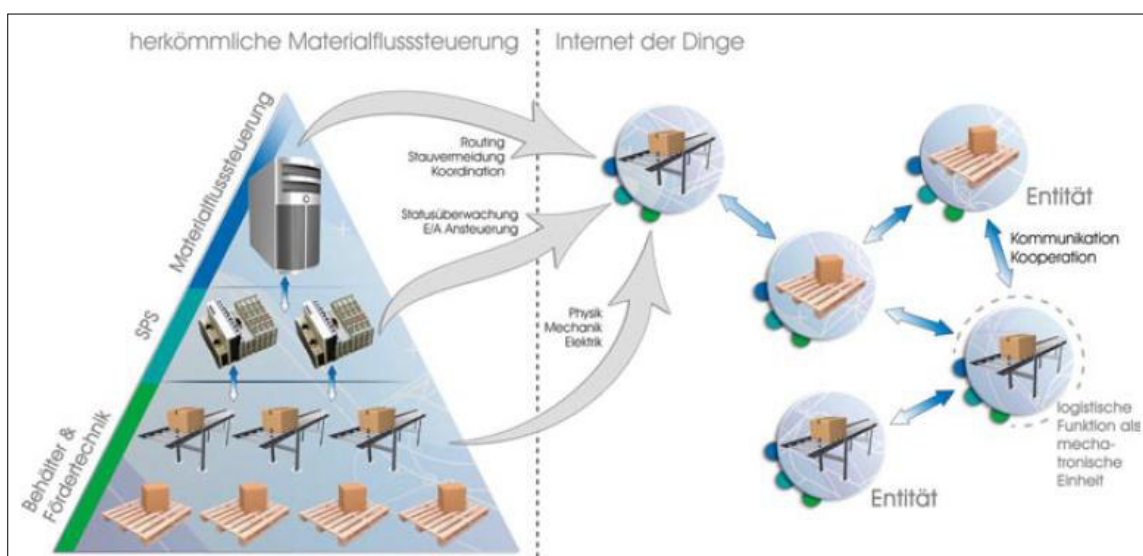


Abbildung 6 - Materialfluss I3.0 und I4.0; Günthner, 2010, S. 45

Die heterarchische Organisation ist auch aus Gründen der angestrebten Entscheidungsfindung in Echtzeit (vgl. Kap. 3.2.4) eine Voraussetzung, da die Komplexität der Kommunikation sonst nicht beherrschbar wäre.⁴²

⁴⁰ Bühl, 1987, S. 242

⁴¹ Vgl. Scholz-Reiter, 2014, S. 63ff.; Gronau, 2014, S. 283f.

⁴² Vgl. ten Hompel, 2014, S. 618

Die dezentrale Steuerung und autonome Entscheidungsfindung der intelligenten Prozessteilnehmer kann und soll außerdem die Flexibilität des Systems erhöhen, da so auf unvorhergesehene Ereignisse, wie individuelle Kundenwünsche, reagiert werden kann. Die später beschriebene Adaptivität der CPS und die Dynamik des Systems sind erforderlich, da nicht alle Eventualitäten geplant werden können. Das Ziel ist es, in der Lage zu sein, situationsbedingt reagieren zu können (vgl. Kap 3.2.3 Dynamik). Die Basis dafür bildet die Dezentralisierung mit einer konsequenten Modularisierung in kleinskalige Einheiten, die ein kooperierendes Netzwerk bilden.⁴³ (vgl. Abb. 6 und Kap. 3.2.2-4) Diese Kombination aus Dezentralisierung und Modularisierung ist erforderlich, da die klassische Steuerungspyramide mit der jeweiligen Komplexität und der anwendungsspezifischen Programmierung der Prozessteilnehmer überfordert wäre.⁴⁴ Der Mehrwert an Flexibilität würde in der starren hierarchischen Organisation verloren gehen. Vielmehr soll er durch die Modularisierung erweitert werden. Durch eine konsequente Modularisierung der Prozessteilnehmer kann sich der Prozess einerseits nach dem Baukastenprinzip bilden (vgl. Kap 3.2.3 Dynamik) und andererseits können Teilnehmer nach dem Plug-and-Play Prinzip hinzugenommen oder entfernt werden.⁴⁵

Von den heterarchisch organisierten und kleinskalig modularisierten CPS, der operativen Ebene, entkoppelt ist eine Cloud⁴⁶ vorgesehen, die das normative Supply Chain Management repräsentiert. Die Cloud enthält Informationen um übergeordnete Entscheidungen zu treffen, sie gibt Leitlinien, Verhaltensregeln, Kooperationsmechanismen und Entscheidungskorridore für die CPS vor. Weiter definiert sie ökonomische Ziele und Strategien.⁴⁷ Zum einen bietet die Cloud den CPS so Dienste an, verarbeitet und bereitet beispielsweise die Kundenaufträge vor, und sorgt zum anderen für Ganzheitlichkeit und vermeidet für das Unternehmen oder die Supply Chain schädliche Entwicklungen und Auswirkungen. Die Cloud hat die Aufgabe sicherzustellen, dass die Unternehmensmission umgesetzt wird.⁴⁸ Neben diesen normativen Aufgaben unterstützt die Cloud die CPS auch bei operativen Vorgängen. Verfügungen Roboter und Automatisierungstechnik heute jeweils eine eigene monolithische Steuerung, so

⁴³ Vgl. ten Hompel, 2014, S. 618f.; Günthner, 2010, S. 43ff.

⁴⁴ Vgl. Günthner, 2010, S. 43

⁴⁵ Vgl. Günthner, 2011, S. 27

⁴⁶ Anmerkung: zu Cloud siehe Verl, 2014, S. 238ff.

⁴⁷ Vgl. ten Hompel, 2014, S. 616, S. 620 und S. 622; Günthner, 2010, S. 46

⁴⁸ Vgl. ten Hompel, 2014, S. 622f.

stößt diese, obwohl sie im Normalfall nicht ausgelastet wird, bei Optimierungsproblemen an ihre Grenzen. Daher können sich Maschinen heute nicht selbst optimieren. Ziel einer Strukturierung mit einer übergeordneten Cloud ist es, dass die CPS, von der monolithischen Steuerung teilweise entledigt, auf die skalierbaren Rechendienste der Cloud zugreifen und sich dadurch unter anderem selbst optimieren können.⁴⁹

Die zentrale Cloud auf der einen und die dezentrale, autonome Organisation auf der anderen Seite beschreiben einen gewissen Widerspruch, den Spath folgendermaßen einordnet: „Die zentralen Systeme werden Datenlieferant für die dezentralen Systeme sein, weil die ja Input-Daten aus dem wirtschaftlichen Umfeld brauchen. Und wir werden lokale Teilentscheidungen haben, die aber trotzdem im gesamten Abbild bleiben. Wir werden also beides bekommen und das ist genau der Knackpunkt: wie viel Zentralismus, wie viel Dezentralismus verträgt ein System und wie elastisch wird das System sein.“⁵⁰

3.2.2 Intelligente Prozessteilnehmer

Die im vorigen Abschnitt beschriebene Autonomie stellt im nächsten Schritt Anforderungen an die Intelligenz der cyber-physischen Systeme. Diese Intelligenz besteht aus den Komponenten Adaptivität und Lernfähigkeit sowie aus kooperativen Verhalten. Adaptivität gilt es von der später beschriebenen Dynamik zu differenzieren. Adaptivität meint hier ein Situationsbewusstsein und die Fähigkeit, situationsbedingt reagieren zu können.⁵¹ So soll beispielsweise ein fahrerloses Transportsystem ein Hindernis, wie eine Palette, als ein solches erkennen und ihm ausweichen können. Weiter steht die Adaptivität im Zusammenhang mit der Fähigkeit zu lernen. Das CPS soll in der Lage sein, Erfahrungen in seine Entscheidungsmodelle aufzunehmen und diese entsprechend anzupassen.⁵² Im ersten Schritt kennt das CPS die eigenen Konfigurationsmöglichkeiten und seine Umgebung, zu der das Layout, aber auch weitere CPS gehören. Dies erfordert ein Gedächtnis, um die Daten zu speichern und aus

⁴⁹ Vgl. Verl, 2014, S. 235ff.

⁵⁰ Spath, 2013, S. 97f.

⁵¹ Vgl. Gehrke, 2011, S. 26ff.

⁵² Vgl. Gehrke, 2011, S. 13

ihnen zu lernen.⁵³ Im nächsten Schritt gehört dazu auch ein „digitales Produktgedächtnis“⁵⁴, mit dem eine kontinuierliche Prozessoptimierung ermöglicht wird.

Das cyber-physische System organisiert seine Missionen zwar autonom, agiert aber nie allein. Es steht in direkter Interaktion mit anderen CPS und der Cloud. (vgl. Kap. 3.2.1) Das CPS allokiert seine Bedarfe und geht entsprechende Kooperationen mit anderen CPS ein, um den eigenen Gewinn zu maximieren. Diese Kooperationen zwischen den CPS beinhalten den Austausch von Informationen, wodurch eine Schwarmintelligenz erzeugt wird. Außerdem finden Verhandlungen über Wegerechte und Aufträge statt. Die CPS sind miteinander vernetzt und lernen voneinander.⁵⁵ Das entstehende „System of Systems“⁵⁶ erfordert eine Prozess- bzw. Flussorientierung in der Organisation. Funktionale oder zentrale Prozesse, Strukturen und Organisationen müssen aufgebrochen und stattdessen Plattformen gebildet werden.⁵⁷ Über diese Plattformen sollen sich die CPS anschließend austauschen und eine Schwarmintelligenz bilden.

3.2.3 Dynamik

Dynamik beschreibt ein verändertes Verhalten oder sich ändernde Umstände über die Zeit.⁵⁸ Die daraus resultierende Anforderung an die CPS ist die Fähigkeit, darauf eingehen zu können. Abläufe müssen individuell angepasst werden, feste Anordnungen müssen durch umzugsfähige Knoten ersetzt werden, Alternativen zu linearen Sequenzen von den CPS erarbeitet werden.⁵⁹ Die Anforderung an die CPS ist, unter anderem mit der Fähigkeit der Selbststeuerung, die Option zu haben, auf Störungen reagieren zu können, insbesondere da, wie bereits angesprochen, eine Planung aller Eventualitäten aufgrund eines nicht prognostizierbaren Kundenwunsches nicht mehr möglich sein wird.⁶⁰ (vgl. Kap. 3.1: Wandel zum Käufermarkt) Dies kann beispielsweise eine Resequenzierung von Aufträgen nach geänderter Priorisierung bedeuten.

⁵³ Vgl. Gronau, 2014, S. 283, S. 286

⁵⁴ Acatech, 2011, S. 16

⁵⁵ Vgl. Ten Hompel, 2014, S. 615, S. 621; Günthner, 2010, S. 72; Acatech, 2011, S. 15

⁵⁶ Acatech, 2011, S. 19

⁵⁷ Vgl. Acatech 2011, S. 19, S. 23, S. 26; ten Hompel, 2014, S. 622

⁵⁸ Vgl. Windt, 2006, S. 6

⁵⁹ Vgl. Gronau, 2014, S. 286; ten Hompel, 2014, S. 615; Günthner, 2010, S. 57

⁶⁰ Vgl. Windt, 2006, S. 13

Darüber hinaus beschreibt die Dynamik auch die Art und Weise wie Prozesse angestoßen werden. Die Literatur schlägt dazu zwei Möglichkeiten vor. Erstens, dass ausgelöst durch einen Bedarf das Produkt produziert wird und sich eigenständig den Weg zum Kunden sucht.⁶¹ Bei der zweiten Möglichkeit geht die Aktion nicht vom Kundenauftrag aus, sondern vom Produkt. Dieses sucht sich einen verfügbaren Auftrag und organisiert sich autonom. Das Produkt wählt den nächsten Bearbeitungsschritt selbst aus, reagiert auf Einflüsse in der Mikroumwelt und kann gegebenenfalls die Variante ändern, um sich einem anderen Auftrag zuzuordnen.⁶² Diese „dynamische Zuordnung der Produkte zu Aufträgen [ermöglicht] eine schnelle und flexible Reaktion auf Änderungen im Auftragsbestand“.⁶³ Aufträge mit höherer Priorisierung können bei dieser Reallokation von Produkten und Aufträgen vorgezogen werden, Überproduktion wird dadurch vermieden.⁶⁴ Deutlich wird der Unterschied in der Ansteuerung der Produktionsprozesse, jedoch gilt für beide Fälle die von ten Hompel beschriebene Individualisierung des Layouts von Materialflüssen als Anforderung.⁶⁵ „Der ideale logistische Raum ist leer“⁶⁶ und setzt sich erst dem Bedarf entsprechend zusammen: Die Produktion wird vom Produkt gesteuert.⁶⁷ Eine Grundlage dafür ist die in Kapitel 3.2.1 beschriebene kleinskalige Modularisierung der Systemteilnehmer. Nur unter dieser Voraussetzung können die Prozesse tatsächlich individualisiert werden, da sonst beispielsweise Produktionsschritte nicht vorgezogen werden können.

Die Anforderung hinsichtlich der Dynamik an cyber-physische Systeme ist es, auf Änderungen flexibel zu reagieren, anstatt standardisierten Regeln zu folgen.⁶⁸ Die dynamischen Prozesse müssen nicht nur auf Einwirkungen aus der Mikroumwelt sondern auch aus der Makroumwelt, reagieren können. Ein cyber-physische System muss in der Lage sein, auf Veränderungen im Markt und in der Lieferkette zu reagieren und so Verzögerungen (bei Lieferungen) von Lieferanten auszugleichen. Auch sollen CPS auf nachträgliche Kundenwünsche reagieren können.⁶⁹

⁶¹ Vgl. Behrens, 2006, S. 29

⁶² Vgl. Scholz-Reiter, 2014, S. 65

⁶³ Scholz-Reiter, 2014, S. 65

⁶⁴ Vgl. Scholz-Reiter, 2014, S. 65

⁶⁵ Vgl. ten Hompel, 2014, S. 615ff.

⁶⁶ ten Hompel, 2014, S. 615

⁶⁷ Vgl. Grünwald, 2015, S. 6

⁶⁸ Vgl. ten Hompel, 2014, S. 619

⁶⁹ Vgl. Acatech, 2011, S. 23

3.2.4 Echtzeitfähigkeit

Echtzeitfähigkeit als Grundvoraussetzung für CPS wird zumeist als die Fähigkeit der Positionserfassung und Zustandsabfrage in Echtzeit beschrieben.⁷⁰ Die Fähigkeit in Echtzeit Entscheidungen zu treffen ist die Grundlage für die oben dargestellte Autonomie und Dynamik der CPS.⁷¹

Echtzeitanforderungen können dabei in weiche und harte Echtzeitanforderungen unterschieden werden, je nachdem wie kritisch signifikante Abweichungen für das Gesamtsystem sind. Bedrohen Abweichungen die Gesamtfunktionalität, werden harte Echtzeitanforderungen gestellt. Die Erfüllung der Anforderung ist Bedingung für eine Kopplung von Materialfluss und Steuerung. Die Steuerung der dazugehörigen Prozesse muss rechtzeitig erfolgen.⁷² Neben der Steuerung in Echtzeit müssen auch die Aufnahme von Umgebungsdaten und der Position in Echtzeit erfolgen, um auf unvorhersehbare Ereignisse und Störungen reagieren zu können.⁷³ Das Wissen über die eigene Position ist eine wichtige Entscheidungsgrundlage. So kann beispielsweise ein Hindernis nur dann präventiv umfahren werden, wenn das Fahrzeug-CPS die eigene Position kennt. Ohne Kenntnis über die eigene Position können „Staumeldungen“ nicht effektiv in die Routenplanung aufgenommen werden.

Auf Echtzeitdaten aus allen Bereichen zugreifen zu können, ermöglicht außerdem neue Optionen für eine ganzheitliche Steuerung sowie für das Controlling.⁷⁴ Darüber hinaus kann mit den in Echtzeit erfassten Daten die Planungsqualität verbessert werden. Beispielsweise können Plan-Durchlaufzeiten angepasst werden oder der Arbeitsfortschritt in Echtzeit rückgemeldet werden.⁷⁵

Analog dazu muss auch die kooperative Kommunikation zu den anderen CPS in Echtzeit stattfinden, um eine Echtzeitfähigkeit des Systems zu gewährleisten. Hierzu gehören auch die entscheidungsunterstützenden Angebote aus der Cloud. Um die sich anbietenden Vorteile nutzen zu können, müssen die CPS in der Lage sein, sich in Echtzeit untereinander und mit der Cloud auszutauschen und sich so in Richtung Schwarmintelligenz entwickeln zu können.

⁷⁰ Vgl. Gronau, 2014, S. 282

⁷¹ Vgl. ten Hompel, 2014, S. 620

⁷² Vgl. Günthner, 2010, S. 47ff.

⁷³ Vgl. Nyhuis, 2014, S. 91

⁷⁴ Vgl. Acatech, 2011, S. 15; Nyhuis, 2014, S. 94

⁷⁵ Vgl. Nyhuis, 2014, S. 91f.

3.2.5 Zusammenspiel/Einordnung

Wie die vorangehende Diskussion der Anforderung an die cyber-physischen Systeme zeigt, stehen die vier definierten Obergruppen in Wechselwirkung zueinander. Die Abhängigkeiten sind deutlich erkennbar, für sich genommen beschreibt keine der vier Obergruppen Industrie 4.0 ausreichend. Weder sind individuelle Prozesse ohne Modularisierung möglich, noch liefern intelligente Prozessteilnehmer ohne Entscheidungskompetenz einen Mehrwert. Werden die Anforderungen jedoch ganzheitlich erfüllt, bewegt sich das System in die Richtung Industrie 4.0. Es entsteht eine innere Komplexität, die auf die äußere Komplexität eingehen kann. (vgl. Abb. 3)

Betrachtet man die vorgestellten Anforderungen an die cyber-physischen Systeme, wird deutlich, dass Industrie 4.0, was die Implementierung solcher Systeme vorsieht, nicht primär eine weitere Automatisierung beschreibt, sondern vielmehr eine intelligente, heterarchische Steuerung der Systeme anstrebt. Die Anforderungen an die Systeme sind nicht ein automatisches Handeln, sondern vielmehr ein autonomes, kommunikatives Handeln. Mit dem Einsatz von CPS soll einem anspruchsvollen, „intelligenten“ Käufermarkt mit ebenso intelligenten Systemen begegnet werden.

Auf die in der Literatur beschriebenen Entwicklungstendenzen von Industrie 4.0 wird im Rahmen der Handlungsoptionen in Kapitel 5 detaillierter eingegangen.

3.3 Darstellung Planungsprozess Industrie 4.0

Aufbauend auf der grundsätzlichen Einordnung von Industrie 4.0 und der Diskussion der Anforderungen an die cyber-physischen Systeme widmet sich dieses Kapitel zunächst der Herangehensweise und anschließend der Darstellung des Planungsprozesses in der Industrie 4.0-Umgebung.

3.3.1 Methodenauswahl

Für die Darstellung der Material- und Entscheidungsflüsse haben sich für die Industrie 3.0-Umwelt das Wertstrom- und das EPK-Diagramm als sehr zielführend erwiesen. Diese Modelle sind jedoch nicht dafür geeignet, die komplexe Industrie 4.0-Umwelt abzubilden. So ließen sich Dezentralität, Modularisierung und Cloud-Verwaltung mit etwas Kreativität im Wertstromdiagramm noch abbilden, jedoch scheitern beide Modelle an der Anforderung der Dynamik. Beide Modelle bilden feste

Strukturen und Prozesse übersichtlich ab, jedoch würden sie beim Versuch, alle Varianten eines auf dem Baukasten-Prinzip beruhenden Prozesses abzubilden, scheitern bzw. ihre Vorteile hinsichtlich Übersichtlichkeit und Anwenderfreundlichkeit verlieren.

Zur Organisation und Abbildung intelligenter, dezentraler, kommunikativer und autonomer Agenten eignen sich Multiagentensysteme.⁷⁶ Die Herangehensweise erfolgt zwar softwareseitig, lässt sich jedoch auf die cyber-physischen Systeme übertragen, da jeweils die Systemmodellierung im Vordergrund steht. Yousefifar widmet sich dabei der Frage, wie der Planungsvorgang in einem Intralogistiksystem ablaufen kann. Er systematisiert die Intralogistik dabei als komplexes adaptives System (CAS). Diesem CAS ordnet er grundlegende Eigenschaften, mit denen in dieser Arbeit CPS assoziiert wurden, zu. Mit Heterarchie, Autonomie, Netzwerkbildung und Adaptivität beschreibt er die CAS. Damit sind die CAS vergleichbar mit den CPS.⁷⁷

Im Rahmen der CAS wird das intralogistische System in Funktionen, Ressourcen und Anforderungen unterteilt. Diese werden dabei „als zielgerichtete, miteinander interagierende, autonome Einheiten[, Agenten,] modelliert.“⁷⁸

Die Funktionen lassen sich von den Funktionsbereichen eines Logistiksystems ableiten. Funktionsbereiche sind beispielsweise Wareneingang oder Versand. Die Funktionsbereiche fassen die dort durchgeführten materialflusstechnischen Funktionen zusammen. So besteht unter anderem der Funktionsbereich Kommissionierung aus den Funktionen Lagern, Fördern und Identifizieren. Die Funktionen werden von den dazu befähigten Ressourcen durchgeführt. Als Ressourcen können Rollenbahnen, Personen, Gabelstapler, aber auch Scanner und Packmaschinen definiert werden. Die Anforderungen beschreiben Informationen, die die Grundlage für die regelbasierte Systembildung darstellen. Dies sind unter anderem Kundenauftragsdaten, aber auch Randbedingungen, wie innerbetriebliche Verkehrsregeln. Die Anforderungen beschreiben sowohl den Rahmen des Systems als auch was im System selbst passieren soll.⁷⁹

⁷⁶ Vgl. Gomber, 1996, S. 300; Gehrke, 2011, S. 17

⁷⁷ Vgl. Yousefifar, 2014, S. 1ff.

⁷⁸ Yousefifar, 2014, S. 3

⁷⁹ Vgl. Yousefifar, 2014, S.3ff.

Mit dieser Grundlage definiert Yousefifar im nächsten Schritt ein Agentensystem. Bei der Modellierung des Systems steht insbesondere die Beachtung der Dynamik des Systems im Vordergrund. Je nach Anforderung kooperieren die oben definierten Agenten, Ressourcen, Funktionen und Anforderungen miteinander und erreichen das übergeordnete Gesamtziel. Die Strukturierung der Agenten und des Prozesses erfolgt dabei jedoch nicht nach einem heterarchischen Prinzip. Wie in der Abbildung 7 ersichtlich, geht die Initiative vom System-Agenten aus.⁸⁰

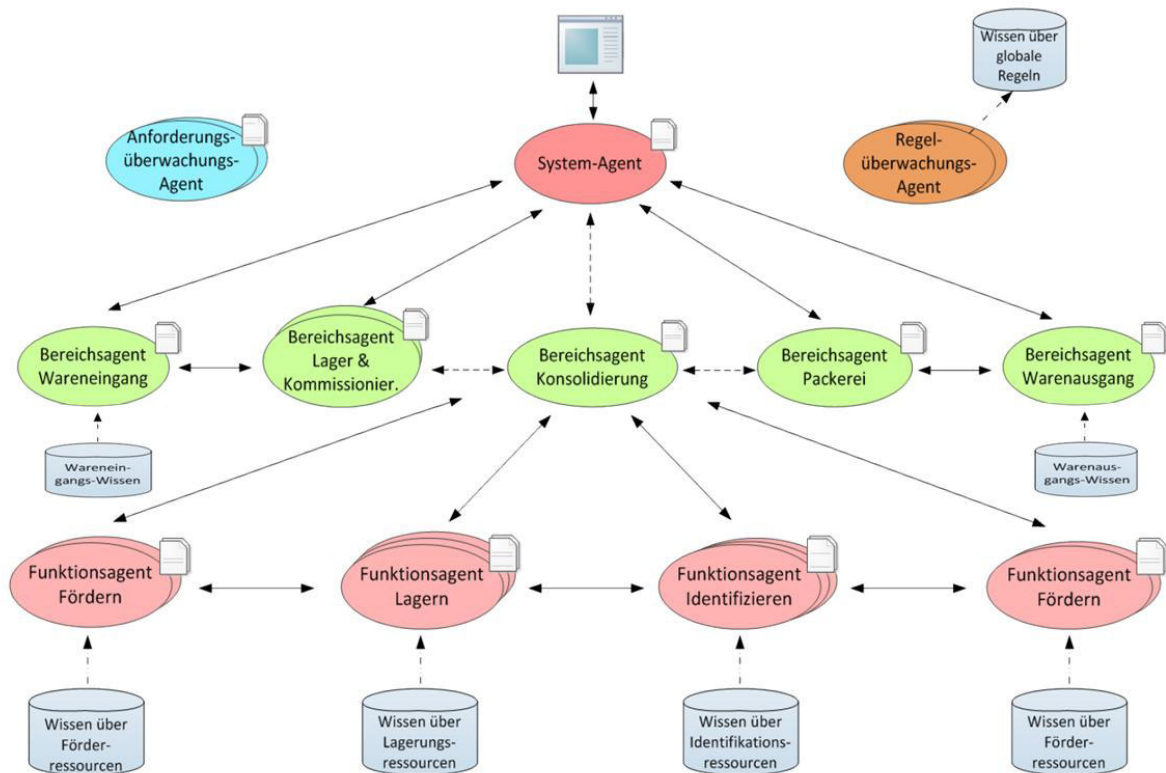


Abbildung 7 - Dynamisches Agentenkonzept; Nach: Yousefifar, 2014, S. 8f.

Dieser analysiert die eingegebenen Anforderungen und gibt sie an die Bereichsagenten weiter, deren Funktionen erforderlich sind, um die Anforderungen zu erfüllen. Die Bereichsagenten, welche die Funktionsbereiche abbilden, koordinieren die zugeordneten Funktionen und deren Funktionsagenten. Die im jeweiligen Vorgang benötigten Funktionsagenten aktivieren die angeforderten Ressourcen.⁸¹

Das Konzept von Yousefifar eignet sich grundsätzlich sehr gut zur Darstellung des Planungsprozesses in der Industrie 4.0-Umwelt. Die Anforderungen hinsichtlich Modularisierung und Dynamik werden voll erfüllt. Lediglich hinsichtlich der Heterarchie

⁸⁰ Vgl. Yousefifar, 2014, S, 5ff.

⁸¹ Vgl. Yousefifar, 2014, S, 7f.

muss das Konzept noch angepasst werden. Die Entscheidungsfindung soll autonom und dezentral erfolgen und nicht nach dem Top-Down Prinzip. Die Cloud-Verwaltung findet bei Yousefifar in Form der Anforderungs- und Regelüberwachungsagenten statt. Damit ist das normative Management zentral gebündelt, während das spezifische Wissen dezentral den jeweiligen Agenten zugeordnet ist.

3.3.2 Darstellung

Den Ansätzen in den vorigen Kapiteln folgend, werden zur Darstellung des Industrie 4.0-Prozesses die Teilnehmer heterarisch angeordnet. (vgl. Abb. 8) Dabei wird die von Yousefifar verwendete Modularisierung übernommen. Der Kombination dieser beiden Grundprinzipien folgend, werden die Prozessteilnehmer möglichst kleinskalig abgebildet. Es werden keine Bereiche, sondern die Funktionen und/oder Ressourcen abgebildet. Weiter erfolgt, im Gegensatz zum Agentenmodell von Yousefifar, keine zentrale Koordination und Ansteuerung. Das Signal, in der Regel der Kundenauftrag, auf das hin sich der leere, ideale logistische Raum hin zusammensetzt, kommt aus der Cloud. Diese bildet darüber hinaus, wie die Anforderungs- und Regelüberwachungsagenten bei Yousefifar, noch das normative SCM ab.

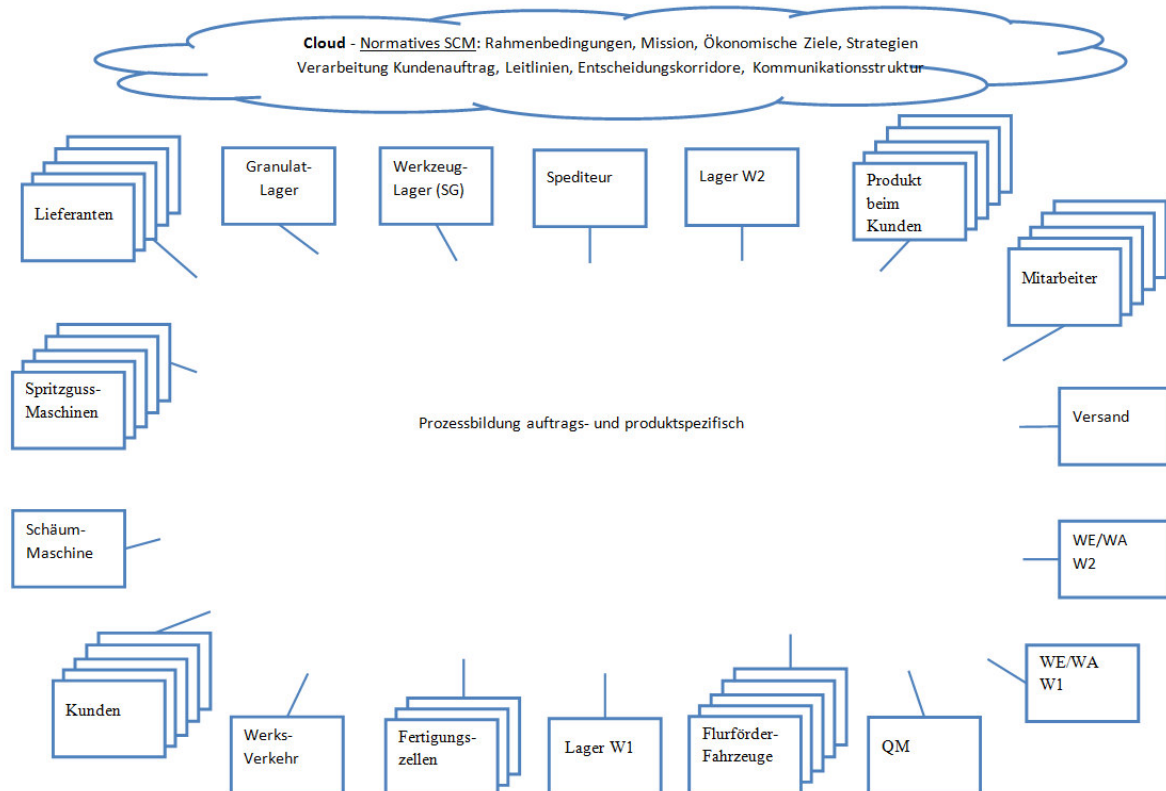


Abbildung 8 – Agentenkonzept Planungsprozess Industrie 4.0; eigene Darstellung

Entsprechend der Kommunikationsstrukturen aus der Cloud koordinieren sich die Prozessteilnehmer untereinander und verfolgen die vorgegebenen ökonomischen Ziele des Unternehmens sowie die Selbstoptimierung. Dadurch handelt das ganze System gleichzeitig effizient und effektiv.

Weiter geht das Modell über die Grenzen des Unternehmens hinaus. Mit den weiterentwickelten Kommunikationstechnologien können beispielsweise Produkte beim Kunden, bei Spediteuren und Lieferanten mit einbezogen werden. Konzepte wie die kontinuierliche Kommunikation beim Vendor Managed Inventory werden ganzheitlich umgesetzt.⁸² Dementsprechend ist der Lieferant auch Teil des Planungsprozesses. Weiter geben Produkte, die bereits beim Kunden im Einsatz sind, Feedback, wodurch die entstehenden Produkte sich auf den Bedingungen des späteren Einsatzes entsprechend konfigurieren lassen können.⁸³

Zusammenfassend lässt sich der Planungsprozess in der Industrie 4.0-Umwelt als ein dynamischer, projektspezifischer von kleinskaligen Modulen unter einer Cloud durchgeführter Prozess beschreiben. Feste Schemata kennt dieses Prinzip nicht, es richtet sich immer an den Umständen, vorgegeben von Micro- und Macroumwelt, aus. Das vorgestellte Prinzip folgt den in Kapitel 3.2 definierten Anforderungen hinsichtlich Heterarchie, Intelligenz, Dynamik und Echtzeitfähigkeit.

⁸² Anmerkung: Für Vendor Managed Inventory siehe: ten Hompel, 2011, S. 324

⁸³ Vgl. Pfannenberg, 2015, S. 1

3.4 Effizienzverbesserung

Eine Entwicklung von einer Industrie 3.0-Umwelt in eine Industrie 4.0-Umwelt ist immer mit dem Ziel einer Effizienzverbesserung verbunden. In diesem Abschnitt sollen zugehörige Kennzahlen vorgestellt, priorisiert und in ein Zielsystem eingeordnet werden.

3.4.1 Definition Kennzahlen

Zur Bestimmung von Kennzahlen zur Messung der Effizienzverbesserung wurden folgende Bereiche definiert.

- Gefahrene Strecke
- Kapazitätsauslastung
- Dispositionsaufwand
- Durchlaufzeit
- Flexibilität/Wandlungsfähigkeit

In den folgenden Kapiteln wird detailliert beschrieben, mit welchen Kennzahlen aus den eingegrenzten Bereichen Veränderungen in der Intralogistik von Industrie 3.0 zu Industrie 4.0 abgebildet werden können.

3.4.1.1 Gefahrene Strecke

Die gefahrene Strecke stellt eine Möglichkeit dar, die Transportkosten abzubilden. Dabei kann die gefahrene Strecke in die Anteile an Mann-Strecke und Maschinen-Strecke differenziert werden, je nachdem ob der Transport manuell oder automatisch durchgeführt wird. Diese Differenzierung ist auf Grund der unterschiedlichen Kosten von Bedeutung, da 75 % der Betriebskosten eines Gabelstaplers von Personalkosten ausgemacht werden.⁸⁴

Die gefahrene Strecke als absolute Kennzahl ist jedoch nicht aussagekräftig, da eine Relation fehlt. Wird die Strecke ins Verhältnis zu den Fertigungsaufträgen gesetzt, lassen sich die Kosten, die Strecke, ins Verhältnis zum Ertrag, den Fertigungsaufträgen, setzen. Steigt die gefahrene Strecke bei gleicher Auftragszahl sinkt die Effizienz, werden dagegen Transporte gebündelt, wodurch mehr Aufträge bei gleichem

⁸⁴ Vgl. Martin, 2014, S. 278

(Weg-)Aufwand durchgeführt werden, steigt die Effizienz. Als Alternative zur gefahrenen Strecke in Kilometer kann auch die Fahrzeit herangezogen werden. Diese Herangehensweise eignet sich insbesondere dann, wenn die Kosten mehrheitlich aus dem Zeitaufwand der Mitarbeiter resultieren.

3.4.1.2 Kapazitätsauslastung

Die Kapazitätsauslastung kann auf verschiedene Bereiche bezogen analysiert werden. Lager, Logistik, Produktion, Mitarbeiter etc. können hinsichtlich ihrer Kapazitätsauslastung betrachtet werden. Den Prinzipien des Lean-Six-Sigma-Ansatzes folgend sollte sich die Kapazitätsbetrachtung auf den wertschöpfenden Prozess beschränken.⁸⁵ Erlach berechnet den Auslastungsgrad als Verhältnis von Zykluszeit und Kundentakt. Mit diesem Auslastungsgrad bewertet er die Abstimmung der Produktionsprozesse sowohl aufeinander als auch auf den Kundentakt.⁸⁶

3.4.1.3 Dispositionsaufwand

Mit dem Dispositionsaufwand sollen die Kosten der Planung dargestellt werden. Wie hoch ist der organisatorische Aufwand der Produktions- und Logistikplanung? Diese Kennzahl ist von Interesse, da die autonome Selbstplanung eine der Anforderungen an die CPS in der Industrie 4.0-Umwelt ist. (vgl. Kap. 3.2) Über die Anzahl der Mitarbeiter bzw. Anzahl der Zeitstunden der Mitarbeiter in den Planungsfunktionen lässt sich hier eine Kennzahl generieren. Diese kann absolut oder in Relation zu der Anzahl der Fertigungs- oder Kundenaufträge betrachtet werden. Eine weitere Möglichkeit den Dispositionsaufwand einzuordnen bildet die Kennzahl der Planungshäufigkeit oder dem Planungshorizont.⁸⁷ Ein kurzer Planungshorizont bzw. eine hohe Planungshäufigkeit kann einen hohen Dispositionsaufwand rechtfertigen, während eine geringe Auftragsanzahl und ein langer Planungshorizont eher auf Ineffizienzen hinweisen.

⁸⁵ Vgl. Töpfer, 2009, S. 7

⁸⁶ Vgl. Erlach, 2010, S. 110, S. 115; Anmerkung: Zu Kundentakt siehe Erlach, 2010, S. 47f.

⁸⁷ Vgl. Erlach, 2010, S. 95

3.4.1.4 Durchlaufzeit

Die Kenngröße Durchlaufzeit kann zwei Bereiche des logistischen Zielsystems abdecken. Zum einen die Kosten und zum anderen die Leistung. (vgl. Kap. 3.4.2) Die Kosten werden von der Durchlaufzeit abgebildet, wenn diese der Berechnung von Erlach über die Summe der Reichweiten, nämlich den Lagerbeständen sowie den Umlaufbeständen, folgt.⁸⁸ Interpretiert man die Durchlaufzeit als Lieferzeit bildet sie die Leistung ab. Die Lieferzeit und die Durchlaufzeit haben eine gemeinsame Schnittmenge, gleichzeitig jedoch unterschiedliche Aussagen. Die Lieferzeit beschreibt die Auftragsabwicklung. Sie berechnet sich aus *Datum Auslieferung* – *Datum Auftragseingang* und nimmt damit die Marktsicht ein. Die sich auf Bestände beziehende Durchlaufzeit hat Betriebsziele im Fokus.⁸⁹ Erlach definiert den Unterschied folgendermaßen: „Während die Lieferzeit um die administrative Auftragsabwicklung länger als die Durchlaufzeit ist, ist erstere um den zeitlichen Anteil der kundenanonymen Vorproduktion kürzer als letztere.“⁹⁰ Für eine ganzheitliche Betrachtung sollten beide Kennzahlen in die Betrachtung einbezogen werden. Wird nur die Lieferzeit herangezogen, muss die Wiederbeschaffungszeit für die kundenunspecifische Vorproduktion und für Einkaufsteile ebenfalls herangezogen werden.⁹¹

3.4.1.5 Flexibilität/Wandlungsfähigkeit

Flexibilität beschreibt die Fähigkeit in Entscheidungssituationen Freiheitsgrade zu besitzen und somit auf eine veränderte Situation reagieren zu können. Wandlungsfähig beschreibt die nächste Stufe und geht über die Flexibilität hinaus. Die Wandlungsfähigkeit orientiert sich langfristiger, sie ist proaktiv und kann reaktiv auf Änderungen eingehen. Die Wandlungsfähigkeit befähigt das Unternehmen zu langfristigen und tiefgreifenden Veränderungen. Die Agilität als höchste Entwicklung der Flexibilität beschreibt die Fähigkeit auch unerwartete Aufgaben zu bewältigen.⁹² Beispielsweise auch Produkte außerhalb des Portfolios produzieren zu können.

⁸⁸ Vgl. Erlach, 2010, S. 102ff.

⁸⁹ Vgl. Erlach, 2010, S. 22f.

⁹⁰ Erlach, 2010, S. 22

⁹¹ Vgl. Erlach, 2010, S. 22

⁹² Vgl. Kaczmarek, 2015, S. 13ff.

Für eine Industrie 3.0-Umgebung ist der EPEI⁹³ eine sehr gute Kenngröße zur Bestimmung der (Varianten-)Flexibilität.⁹⁴ Geht man allerdings von einer gegen Unendlich gehenden Variantenvielfalt in der Industrie 4.0 aus, verliert der EPEI seine Bedeutung.

Diese Fähigkeit ggf. unbegrenzt Varianten anzubieten wird mit der Variabilität und dem Marktziel der Lieferbarkeit beschrieben. Die Lieferbarkeit gibt an, „welcher Kundenwunsch im Prinzip erfüllbar und damit lieferbar ist“⁹⁵. Dabei spielen die Rüstzeiten eine wichtige Rolle. Wie schnell kann ich mich auf eine neue Variante, ein neues Produkt einstellen? Zum einen muss hier die Rüstzeit der Produktionsanlagen betrachtet werden und zum anderen auch die Materialbeschaffungszeiten und die Rüstzeiten für Lager und Logistik. Mit welcher Geschwindigkeit kann sich das System adaptieren. Zusammenfassend lässt sich für die Flexibilität als Kenngröße die Variabilität und für die Wandlungsfähigkeit sowie Agilität eine Adaptionsgeschwindigkeit definieren.

⁹³ Anmerkung: Zu EPEI siehe Erlach, 2010, S. 72ff.

⁹⁴ Vgl. Erlach, 2010, S. 72

⁹⁵ Erlach, 2010, S. 24

3.4.2 Zielsystem

Die diskutierten fünf Bereiche mit den jeweiligen Kenngrößen lassen sich in das Zielsystem von Nyhuis einordnen. Wie Abbildung 9 zeigt, decken die fünf Bereiche mit den sechs Kenngrößen sowohl die Logistikkosten, bestehend aus Bestand und Auslastung, als auch die Logistikleistung, welche die Lieferzeit und Flexibilität umfasst, umfänglich ab.

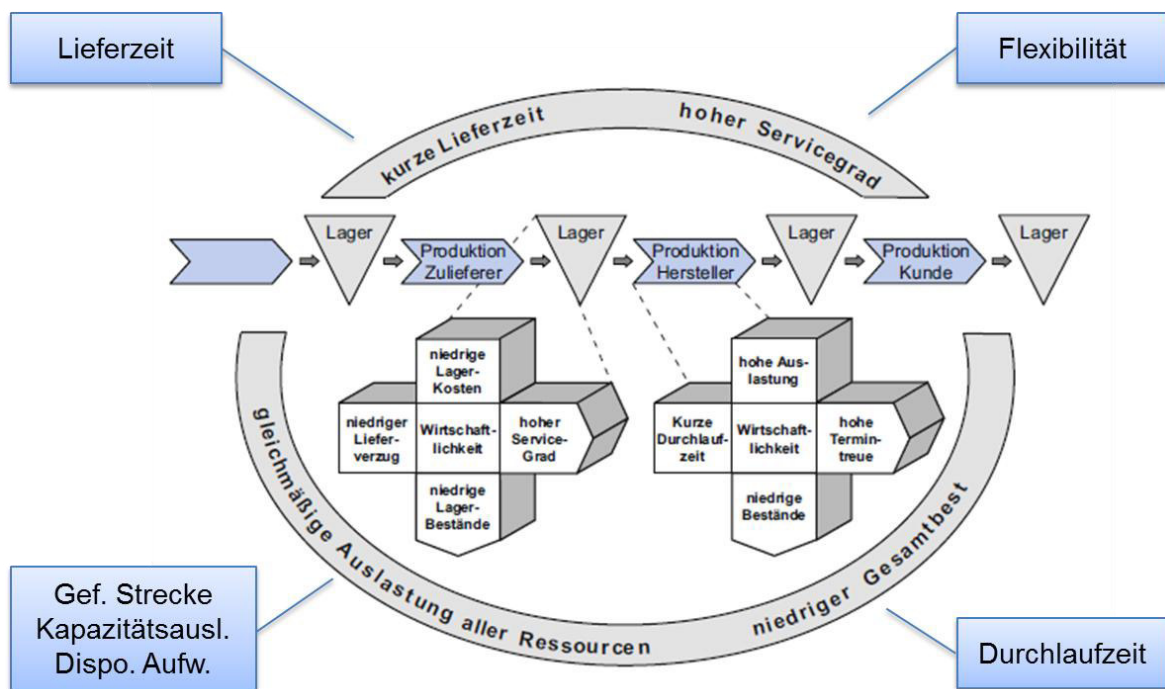


Abbildung 9 - Zielsystem in der Logistik mit Anmerkungen / Soll I4.0; nach Nyhuis, 2012, S. 276

Die Trennung des Bereichs Durchlaufzeit in die Kenngrößen Durchlaufzeit und Lieferzeit ermöglicht hierbei eine Differenzierung in Kosten und Leistung, da zum einen die Bestände herangezogen werden und zum anderen die Zeit zum Kunden berechnet wird. Über die gefahrene Strecke, den Dispositionsaufwand und die Kapazitätsauslastung werden die Kosten der Logistik, der Planung und der Produktion erfasst. Der Servicegrad wird zu einem Teil von der Lieferzeit abgedeckt, zum anderen Teil von der Flexibilität, da diese beschreibt, wie erfüllbar die Wünsche des Kunden sind. Mit den gewählten Kenngrößen ist eine ganzheitliche Darstellung der Logistikkosten und Leistung möglich.

3.4.3 Vergleich und Priorisierung der Kennzahlen

Die diskutierten Kenngrößen werden nun miteinander verglichen und hinsichtlich ihrer Bedeutung für Unternehmen gewichtet. Die Gewichtung wurde mit einem paarweisen Vergleich durchgeführt⁹⁶ und die Ergebnisse in einem Netzdiagramm dargestellt. (vgl. Abb. 10) Das Netzdiagramm zeigt, dass in der Industrie 3.0-Umgebung Durchlaufzeit und Kapazitätsauslastung die höchste Priorität haben. Strecke, Dispositionsaufwand und Flexibilität haben eine deutlich geringere Bedeutung. In der Industrie 4.0-Umgebung dagegen hat die Flexibilität die größte Bedeutung für den Unternehmenserfolg. Erst dann folgen die Durchlaufzeit und die anderen Kennzahlen.

Als Grundlage für die Bewertung wird die Industrie 3.0 beschrieben als variantenreiche Serienproduktion, mit hoher Automatisierung, orientiert am Leitgedanke des Lean Management und angetrieben von einem Käufermarkt.⁹⁷ Für die Industrie 4.0 gilt dagegen, dass individuelle Kundenwünsche berücksichtigt werden können. Die Unternehmen sind so organisiert, dass auch eine Einzelstückfertigung rentabel ist. Die Produktionsprozesse sind nicht standardisiert sondern dynamisch und können flexibel auf Störungen und Ausfälle reagieren.⁹⁸ (Siehe auch Kap. 3.1)

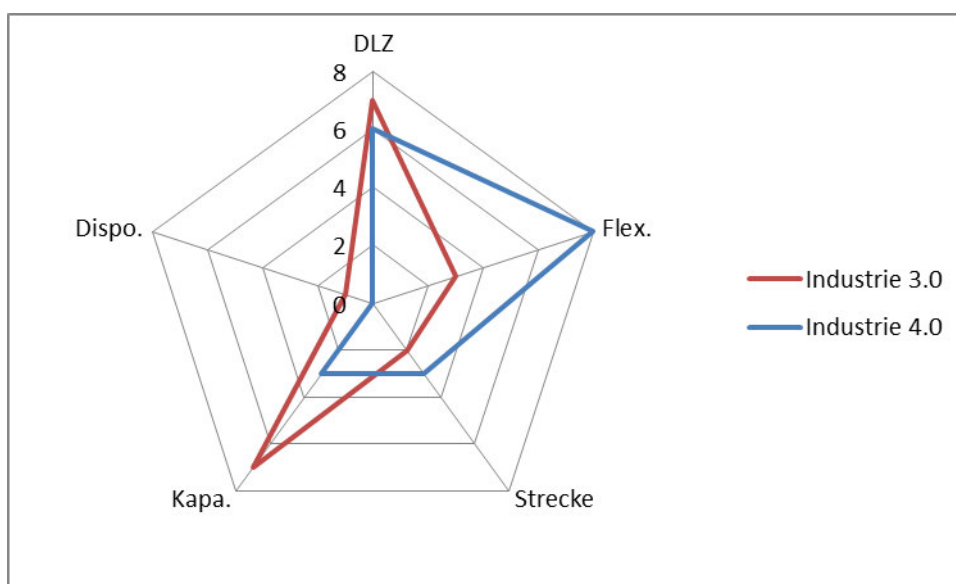


Abbildung 10 - Vergleich Kenngrößen I3.0 und I4.0 / Soll I4.0; eigene Darstellung

Die Auswertung des paarweisen Vergleichs zeigt, wie in den Beschreibungen der Industrie-Umgebungen angesprochen, einen Wandel der Prioritäten. Mit der Ausrich-

⁹⁶ Vgl. Anhang 1

⁹⁷ Vgl. Bauernhansl, 2014, S. 6ff.

⁹⁸ Vgl. Ramsauer, 2013, S. 8

tion auf eine kundenorientierte Einzelstückfertigung bekommt die Flexibilität eine wesentlich höhere Bedeutung. Es findet eine Verschiebung von der Kapazität zur Flexibilität statt. Die Durchlaufzeit (und die Lieferzeit) bleiben in ihrer Bedeutung hoch, zum einen, da der Kunde die Individualisierung nicht mit einer längeren Lieferzeit bezahlen will und zum anderen, da Bestände in der Supply Chain die geforderte Flexibilität negativ beeinflussen.⁹⁹ Die in Kap. 3.2.1 beschriebene Selbststeuerung und autonome Planung führt dazu, dass der Dispositionsaufwand für die Industrie 4.0 seine Bedeutung verliert. Die Relevanz der gefahrenen Strecke nimmt dagegen leicht ab, da die Erwartung besteht, dass mit dem Einsatz automatisierter Förder-technik die Personalkosten reduziert werden können.

3.5 Industrie 4.0 und Logistik

Nachdem der Themenkomplex Industrie 4.0 in den vorigen Kapiteln vorgestellt wurde, soll nun eine Einordnung in die Logistik als Grundlage für die weitere Vorgehensweise erfolgen. Dafür werden zunächst die vier Phasen der Logistikentwicklung vorgestellt und anschließend der Bezug zu Industrie 4.0 durch eine Einordnung hergestellt.

3.5.1 Phasen der Logistikentwicklung

Für die Gliederung der Industrie 4.0 in die Logistik wird das Phasenmodell nach Delfmann et al. herangezogen. Dieses Modell unterteilt die Logistik in vier Phasen.¹⁰⁰ (vgl. Abb. 11, nächste Seite)

In der ersten Phase stehen die sogenannten klassischen Logistikfunktionen, Transportieren, Umschlagen und Lagern (TUL), im Vordergrund. Ziel der Logistik ist die Sicherstellung der Materialverfügbarkeit. Dafür wird die Logistik nicht ganzheitlich, sondern jeweils zwischen den einzelnen Produktionsprozessen angesiedelt. Es findet dabei eine organisatorische Zersplitterung statt, mit dem Effekt, dass Redundanzen erzeugt werden.¹⁰¹ Diese werden von der Logistik in der ersten Phase bei zunehmender zeitlicher Entwicklung durch eine Funktionsspezialisierung abgebaut. Bei zunehmendem Stand der Materialfluss- und Informationstechnik werden beispiels-

⁹⁹ Vgl. Nyhuis, 2012, S. 10; Erlach, 2010, S. 120

¹⁰⁰ Vgl. Delfmann, 2010, S. 2ff.

¹⁰¹ Vgl. Baumgarten, 2000, S. 3

weise dezentrale Lager in einem Zentrallager zusammengeführt und damit eine Lagerkostendegression bewirkt. Die Logistik wird dadurch zu einer spezialisierten Dienstleistungsfunktion für TUL-Prozesse.¹⁰²

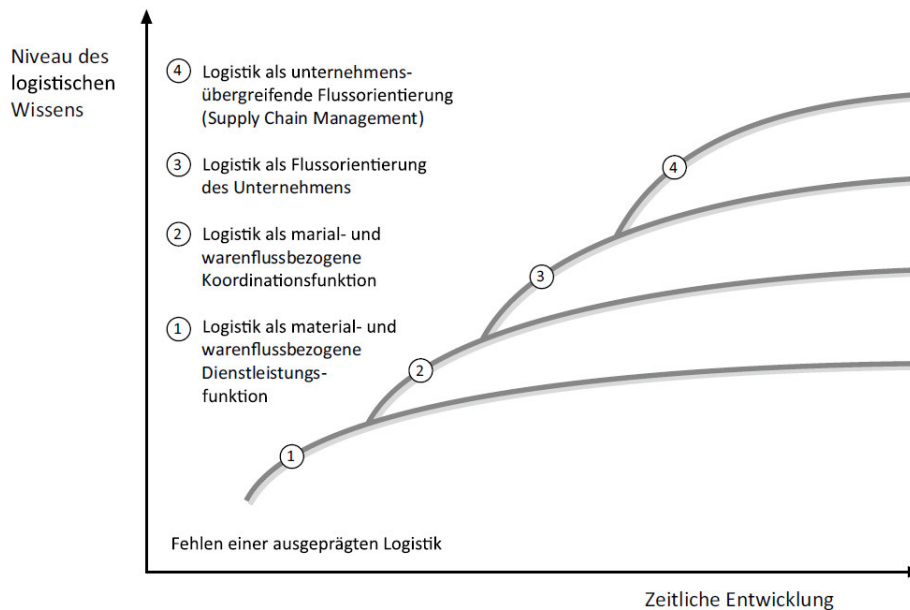


Abbildung 11 - Unterschiedlichen Stufen der Logistikentwicklung; Weber, 2012, S. 5

Mit der Beherrschung der material- und warenflussbezogenen Dienstleistungen verfügt die Logistik über die notwendige Basis für die zweite Entwicklungsstufe.¹⁰³

In der zweiten Phase nimmt die Logistik Koordinationsaufgaben wahr. Diese sind zum einen die Funktionsbereichübergreifende Abstimmung von Material- und Warenflüssen sowie zum anderen die Erweiterung des Betrachtungsbereichs über die komplette Wertschöpfungskette. Es werden nicht mehr nur die Prozesse zwischen zwei Produktionsschritten betrachtet, sondern, die Unternehmensgrenzen überschreitend, Lieferanten und Kunden mit einbezogen.¹⁰⁴ So wird beispielsweise bei der Just-in-Sequence-Bereitstellung von Zukaufteilen der Lieferant im Vorfeld über die Produktionsreihenfolge informiert, sodass dieser die Teile pünktlich und für den Mitarbeiter in der Produktion ohne zusätzliche Resequenzierungsaufwände bereitstellen kann. Mit den Koordinationsaufgaben steigt die Bedeutung der Logistik so weit, dass sie Einfluss auf die Planungs- und Steuerungsprozesse anderer Funktionsbereiche sowohl im Unternehmen als auch bei Kunden und Lieferanten nimmt.

¹⁰² Vgl. Weber, 2012, S. 6ff.

¹⁰³ Vgl. Weber, 2012, S. 9

¹⁰⁴ Vgl. Weber, 2012, S. 10f.; Baumgarten, 2000, S. 3

Die Logistik wird zu einer Querschnittsfunktion mit weitreichenden Steuerungskompetenzen.¹⁰⁵

Wie in Abbildung 11 ersichtlich, wandelt sich die Herangehensweise der Logistik mit zunehmendem Niveau des logistischen Wissens und weiterer zeitlicher Entwicklung in der dritten Phase von einer funktionalen in eine flussbezogene. Aus der Dienstleistungsfunktion wird Führungsfunktion mit dem Ziel der flussorientierten Ausrichtung des gesamten Unternehmens. Wie in den vorherigen Phasen werden dabei die TUL-Prozesse betrachtet, hinzu kommen jedoch auch alle anderen Prozesse und Teile der Unternehmensführung.¹⁰⁶ In dieser Rolle als unternehmensweiter und übergreifender Koordinator muss die Logistik auch einen verstärkten Fokus auf Informationsprozesse legen. Ohne durchgängig vorhandene Informationen ist eine Steuerung der Prozesse nicht effektiv, da Abstimmung immer Information voraussetzt.¹⁰⁷

In der vierten Phase geht die bereits in Ansätzen vorhandene Einflussnahme der Logistik auf Prozesse über die Unternehmensgrenzen hinweg noch weiter. Ziel ist es nun, die Flussorientierung von der Gewinnung des Rohmaterials bis zum Endverbraucher auszuweiten.¹⁰⁸ Im sogenannten Supply Chain Management werden sowohl Material- als auch Informationsströme über die Unternehmensgrenzen hinweg synchronisiert und integriert. Die Aufgabe der Logistik ist die Bildung und Optimierung eines globalen Netzwerks mit dem Kunden im Mittelpunkt.¹⁰⁹ Dazu gehört eine gemeinsame Koordination der Planung, Kontrolle und Informationsversorgung der Netzwerkpartner. Dies kann sich beispielsweise bezogen auf die Informationsversorgung in einer Verknüpfung der ERP- und PPS-Systeme äußern.¹¹⁰ Bezogen auf Materialflüsse soll das Supply Chain Management Engpässen und dem Bullwhip-Effekt¹¹¹ entgegenwirken.¹¹²

¹⁰⁵ Vgl. Weber, 2012, S. 10ff.

¹⁰⁶ Vgl. Weber, 2012, S. 15ff.

¹⁰⁷ Vgl. Baumgarten, 2000, S. 3f.

¹⁰⁸ Vgl. Weber, 2012, S. 19

¹⁰⁹ Vgl. Baumgarten, 2000, S. 3ff.

¹¹⁰ Vgl. Weber, 2012, S. 22f.

¹¹¹ Anmerkung: Zu Bullwhip-Effekt siehe Arnold, 2008, S. 29f.

¹¹² Vgl. Arnold, 2008, S. 22

3.5.2 Einordnung von Industrie 4.0

Die vierte industrielle Revolution beschreibt den Einzug von cyber-physischen Systemen in die Fabrik bzw. Unternehmen. Mit den CPS soll auf die neue Komplexität der Märkte eingegangen werden. Neue Technologien und Methoden ermöglichen, auf die veränderte Nachfragestruktur des Marktes zu reagieren.

Für die Umsetzung der oben beschriebenen heterarchischen Organisation der Fabrik, der adaptiven Supply Chain und der Rückkopplung der Produkte im Markt ist ein ganzheitlicher Ansatz der Logistik erforderlich. Um in der Lage zu sein, die Ansprüche der Wandlungsfähigkeit und der Agilität zu erfüllen, muss eine Einflussnahme der Logistik weit über die Grenzen des Transportierens, Umschlagens und Lagerns hinaus stattfinden. Es muss eine Koordination aller Aktivitäten in Flussrichtung über die ganze Supply Chain hin zum Kundenwunsch stattfinden. Die Einbindung aller Prozessteilnehmer ist erforderlich, da der Decoupling-Point¹¹³ sich immer weiter weg von der Produktion beim OEM hin zu einem früheren Punkt in der Produktentstehung bewegt. Eine Produktion nach dem Prinzip des Assemble-to-Order oder Make-to-Stock¹¹⁴ kann die Anforderungen hinsichtlich Agilität, nämlich dem Umgang mit der unkalkulierbaren Kundennachfrage, nicht erfüllen. Als Logistikkonzept eignet sich das Engineering-to-Order, bei dem das Produkt individuell auf den Kunden hin konstruiert und produziert wird.¹¹⁵ Um dabei sicherzustellen, dass die akzeptierte Kundenwartezeit nicht überschritten wird, muss die Logistik die ganze Supply Chain vom Rohmaterial an einbinden.

Diese Anforderungen des Kunden und der Bedeutung für die Produktentstehung folgend, muss die Logistik eines Unternehmens, das Industrie 4.0 umsetzen möchte, über ein sehr hohes Niveau an logistischem Wissen verfügen. Der ganzheitliche Anspruch von Industrie 4.0 findet sich in der vierten Phase der Logistikentwicklung wieder. Da die Industrie 4.0 neben dem ganzheitlichen Ansatz auch die Dezentralisierung der Planung und Steuerung fordert, erscheint die Entwicklung einer fünften Stufe, die auf diese Anforderungen eingeht, möglich. Ein weiterer Punkt, der nicht nur auf die Logistik, sondern auf das ganze Unternehmen zukommt, ist die Anpassung der Organisation und der Unternehmensprozesse an die Flussorientierung des Pro-

¹¹³ Anmerkung: Zu Decoupling-Point siehe: Brumme, 2010, S. 40f.

¹¹⁴ Anmerkung: Zu Assemble-to-Order und Make-to-Stock siehe: Dickmann, 2007, S. 142

¹¹⁵ Vgl. Schuh, 2012, S. 88f.

duktentstehungsprozesses. Henke widmet sich diesen Anforderungen bezogen auf die dezentrale und kooperative Kommunikation zwischen den CPS (vgl. Kap. 3.2): „Wie soll dieser nahezu grenzenlose Informationsaustausch der Maschinen funktionieren, wenn die dahinterliegenden Funktionsbereiche eines Unternehmens noch einem abteilungsgeozentrischen Silo-Denken verhaftet sind? Die Herausforderung für das Management 4.0 besteht daher gerade darin, den technisch machbaren Datenaustausch organisational auch zu ermöglichen“¹¹⁶ Die in der vierten Phase der Logistikentwicklung durchgeführte Flussorientierung der gesamten Supply Chain ist für die Umsetzung der Anforderungen der cyber-physischen Systeme und damit der Industrie 4.0 erforderlich. Somit kann zusammengefasst werden, dass Industrie 4.0 ein ganzheitliches Konzept für die gesamte Lieferkette ist.

¹¹⁶ Henke, 2015, S.3

4 Soll-Szenario Pfannenberg (Industrie 4.P)

Ausgehend vom im Kapitel 3 beschriebenen Soll-Szenario für die Industrie 4.0 wird in diesem Kapitel das Soll-Szenario für die Pfannenberg GmbH definiert, das sogenannte Szenario Industrie 4.P. Die Ziele und die Anforderungen an die CPS sowie das Management sollen auf die Pfannenberg GmbH übertragen werden. Dafür müssen Einschränkungen ausgemacht und auf diese reagiert werden. Als Basis für die in Kapitel 5 folgenden Handlungsoptionen wird der Materialfluss der Pfannenberg GmbH mit den Zielkennzahlen ausgewertet.

4.1 Eingrenzung

Die Pfannenberg GmbH ist ein Hamburger Mittelständler mit ca. 170 Mitarbeitern am Standort Hamburg. Das Wissen um die Bedeutung der Logistik für den Unternehmenserfolg ist bei der Pfannenberg GmbH teilweise vorhanden. Die Logistik nimmt allerdings keine Planungs- oder Steuerungsfunktionen ein, das Aufgabenspektrum umfasst hauptsächlich die TUL-Funktionen. Darüber hinaus wird die Lieferanteneinbindung in Ansätzen durchgeführt. Beispielsweise werden C-Teile wie Schrauben über ein VMI-Lager beschafft, welches direkt an der Produktion steht. Zusammenfassend lässt sich, den Phasen der Logistikentwicklung folgend, die Logistik bei der Pfannenberg GmbH in ein Übergangsstadium zwischen der ersten und zweiten Phase einordnen.

Eine Automatisierung ist in Teilprozessen bereits umgesetzt worden, ein ERP-System steuert die Produktionsprozesse an und übernimmt Teile der Planung. Diese wird jedoch zum Großteil manuell durchgeführt. Ordnet man die Pfannenberg GmbH in eine der Industrie Ebenen (vgl. Abb. 2, Die vier Stufen industrieller Revolutionen) ein, so findet man sie zwischen Industrie 2.0 und 3.0 wieder. Jedoch finden sich ebenso bereits Ansätze der Umsetzung und Einbindung von Industrie 4.0-Technologie. Die Ansteuerung von Teilbereichen findet bereits in Echtzeit statt.¹¹⁷ In dieser Arbeit sollen jetzt weitere Möglichkeiten erarbeitet werden, Industrie 4.0 bei der Pfannenberg GmbH zu implementieren. Dies soll jedoch nicht ganzheitlich geschehen, sondern sich nur auf den Bereich der Intralogistik beziehen. Der eigentlich

¹¹⁷ Vgl. NDR, 2016

ganzheitliche Ansatz von Industrie 4.0 wird hier bewusst erst auf einen abgesteckten Bereich angewendet, um einen ersten Einstieg zu ermöglichen. Von diesem Ausgangspunkt können dann, je nach Ergebnis, weitere Bereiche in die Betrachtung einbezogen werden.

Beginnen soll die Implementierung der Ansätze von Industrie 4.0 mit dem in Kapitel 2 beschriebenen Materialfluss der Filterlüfterfertigung inklusive vorgelagerter Kunststofffertigung. In die Betrachtung einbezogen werden die Informationsprozesse wie die Auftragsplanung und die Ansteuerung der Transportprozesse. Von besonderer Bedeutung ist dabei der Einfluss des Kundenauftrags. Die jeweiligen Produktionsprozesse sind kein Teil der Betrachtung und bleiben unberücksichtigt. Eine Optimierung des Materialflusses soll durch die Implementierung von cyber-physischen Systemen und die Anwendung der Prinzipien des Lean Management erreicht werden.

4.2 Effizienzverbesserung

Dieser Eingrenzung entsprechend muss das mit ganzheitlichem Ansatz definierte Zielsystem mit seinen Kenngrößen angepasst werden. Der Fokus der Betrachtung richtet sich auf die Intralogistik, auf die Steuerung des Materialflusses und auf die Informationsprozesse. Zuerst werden die Kennzahlen der Pfannenberg-Umgebung angepasst, danach das entsprechende Zielsystem diskutiert, um nachfolgend die angepassten Kennzahlen zu vergleichen. Im darauffolgenden Kapitel 4.3 wird mit diesen angepassten Kennzahlen der Materialfluss bewertet.

4.2.1 Definition Kennzahlen

In Zusammenarbeit mit der Pfannenberg GmbH wurden die Kennzahlen zur Messung einer möglichen Effizienzsteigerung der Pfannenberg Umwelt entsprechend angepasst. Der Fokus wurde, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, von der ganzheitlichen Perspektive auf die Intralogistik verschoben.

4.2.1.1 Gefahrene Strecke

Die Transportkosten können bei der Pfannenberg GmbH über die gefahrene Strecke bzw. die dafür benötigte Zeit in Abhängigkeit der Fertigungsaufträge abgebildet werden. Die beschriebenen Einschränkungen verlangen keine Änderung. Bei der Auswertung ist lediglich zu beachten, dass nur die der Kunststoff- und Filterlüfterfertigung zugehörigen Prozesse aufgenommen und betrachtet werden.

4.2.1.2 Kapazitätsauslastung

Die vorgenommene Definition der Kapazitätsauslastung als Auslastungsgrad der Fertigung, hier der Filterlüfterfertigung, muss angepasst werden. Die Produktionsprozesse sind, wie in 4.1 dargelegt, nicht Teil der Betrachtung. Die Kapazitätsauslastung wird dieser Vorgabe entsprechend auf die Auslastung der Flurförderzeuge-Fuhrparks bezogen. Die Auslastung soll als betriebswirtschaftliche Größe dienen, um die priorisierte Durchlaufzeit einzuordnen. (vgl. Kap. 4.2.3) Die Kapazitätsauslastung der Flurförderzeuge lässt sich dadurch mit der gefahrenen Strecke darstellen. Die für die Transportprozesse in Anspruch genommene Zeit bewertet mit den Kosten, beschreibt mit einer betriebswirtschaftlichen Kenngröße, wie viel Mitarbeiterkapazität Pfannenberg für die Transportprozesse aufwendet.

4.2.1.3 Dispositionsaufwand

Die Kenngröße Dispositionsaufwand bildet die Kosten der Planung ab. Wie im Soll I4.0 Szenario lassen sich diese auch im Szenario bei Pfannenberg über den Aufwand der Mitarbeiter darstellen. Analog zur Kenngröße gefahrene Strecke muss hier lediglich eine Begrenzung auf die Prozesse der Filterlüfterfertigung vorgenommen werden. Erfolgt dies, lässt sich ein Vorher-Nachher-Vergleich mit dem Verhältnis selbstplanender zu zentral geplanter Fertigungs- und Kommissionieraufträge darstellen. Die Fertigungsaufträge sind hier Teil der Betrachtung, da diese zum Rahmen des Prozesses der Kundenauftragsverarbeitung gehören. Über das Verhältnis kann in einem nächsten Schritt der absolute Arbeitsaufwand bestimmt werden.

In Kapitel 2 wird der aktuelle Prozess der Fertigungsplanung bei der Pfannenberg GmbH für die Filterlüfter mit einem EPK-Diagramm vorgestellt.

4.2.1.4 Durchlaufzeit

In 3.4.1.4 wurde die Durchlaufzeit zur Darstellung der Kosten und Leistung mit zwei Kenngrößen definiert. Die Lieferzeit soll den Nutzen für den Kunden beschreiben und die Durchlaufzeit das Bestandsvolumen. Für die Betrachtung bei der Pfannenberg GmbH soll sich auf die Übergangszeit fokussiert werden. Mit der Eingrenzung auf die Intralogistik und dem einhergehenden Ausklammern der vor- und nachgeschalteten Prozesse wäre ein Heranziehen der Lieferzeit nicht zielführend, da zu viele Einflussgrößen von der Intralogistik unabhängig sind. Mit der Übergangszeit werden dagegen genau die Faktoren, die von der Intralogistik abhängen, abgebildet. Weiter kann die Übergangszeit, bestehend aus Liege- und Transportzeiten, als Größe herangezogen werden, da sie sowohl die Lieferzeit als auch die Durchlaufzeit beeinflusst.¹¹⁸ Die Übergangszeit eignet sich darüber hinaus als Kenngröße, da sowohl bei Pfannenberg als auch in der Betrachtung dieser Arbeit die kundenanonyme Vorproduktion und der kundenauftragsbezogene Montageprozess getrennt betrachtet werden. (vgl. Kap. 2.3.1) Zu beachten ist jedoch, dass eine Betrachtung der Übergangszeit die Bestände erst in einem möglichen zweiten Schritt einbezieht. Die Bestände können reduziert werden, wenn durch verkürzte Übergangszeiten kürzere Reichweiten realisierbar werden.

4.2.1.5 Flexibilität/Wandlungsfähigkeit

Sowohl die Variabilität als Kenngröße für die Flexibilität als auch die Adaptionsgeschwindigkeit für die Wandlungsfähigkeit und Agilität sind Teil einer ganzheitlichen Betrachtung der Industrie 4.0. Wie in Kapitel 3.4.1 beschrieben ist der Ausgangspunkt ein kundenorientiertes Produktportfolio im Gegensatz zu einem standardisierten Produktkatalog. Auf diese wechselnden Anforderungen sollen Logistik und Produktion eingehen können. Diese Einordnung geht jedoch über die vorgenommene Eingrenzung und Bezugnahme auf die Intralogistik hinaus.

Für die vollzogene Eingrenzung auf die Intralogistik bieten sich zwei Möglichkeiten einer engeren Fassung der Flexibilität an. Zum einen die Flexibilität als mögliche zusätzliche Nutzung der Flurförderzeuge. Dies kann sich in der Bereitschaft der Fahrzeuge ausdrücken, auch bereichsübergreifend, bei Transportaufkommen zu unter-

¹¹⁸ Vgl. Kuhlmann, 2010, S. 249; Erlach, 2010, S. 22

stützen. Zu welchem Anteil sind die Fahrzeuge fest oder flexibel einsetzbar? Je geringer der Anteil an festeingeplanten Transporten, desto flexibler kann die Logistik auf kurzfristige Aufträge der innerbetrieblichen Kunden reagieren.

Zum anderen kann die Flexibilität als Reaktionszeit systematisiert werden. Der Ansatz ist ähnlich dem der Bereitschaft. Es wird jedoch nicht der Anteil der eingeplanten Zeit gemessen, sondern wie lange die Fahrzeuge bzw. die Mitarbeiter benötigen, um einen neuen Auftrag zu bearbeiten. Auch in diesem Ansatz beeinflussen fest eingeplante Fahrten die Reaktionszeit negativ, da kurzfristig eingebrachte Aufträge warten müssen.

In dieser Arbeit wird die zweite Variante der Beschreibung der Flexibilität genutzt, da sie bei gleicher Aussagekraft von der Erhebung praktikabler ist.

Die Wandlungsfähigkeit und Agilität auf die eingegrenzte Pfannenberg-Umwelt zu beziehen ist nur eingeschränkt möglich, aber für die Beurteilung des Systems hinsichtlich eines Umsetzungsgrades von Industrie 4.0 sehr wichtig. Wie in Kapitel 3.2 dargestellt, sind die Adaptivität und Dynamik ein wesentlicher Bestandteil der Anforderungen an cyber-physische Systeme. Da die Kennzahlen gefahrene Strecke und Kapazität über eine Kenngröße abgebildet werden, ergibt sich die Möglichkeit, die Wandlungsfähigkeit als fünfte Kennzahl hinzuzunehmen. (vgl. Kap.4.4.2)

Basierend auf der Beschreibung der Wandlungsfähigkeit in Kapitel 3.4.1.5 soll die Wandlungsfähigkeit als Kenngröße beschreiben, wie proaktiv das betrachtete System auf Änderungen von außen eingehen kann. Während die Flexibilität mit der Reaktionsfähigkeit die Fähigkeit der Prozessteilnehmer auf Einflüsse aus dem definierten Prozess einzugehen beschreibt, soll mit der Wandlungsfähigkeit eine Reaktionszeit des Prozesses als Ganzes auf Einflüsse dargestellt werden. Die Wandlungsfähigkeit betrachtet, ihrer Definition folgend, prinzipiell dasselbe, jedoch auf einer anderen Ebene.

4.2.2 Zielsystem

Den vorgenommenen Einschränkungen und den dadurch angepassten Kennzahlen entsprechend verändert sich auch das Zielsystem. Der eigentlich ganzheitliche Ansatz der Industrie 4.0 wird eingeschränkt und bezieht sich hier nur auf die Intralogistik. Dies spiegelt sich auch im Zielsystem wider.

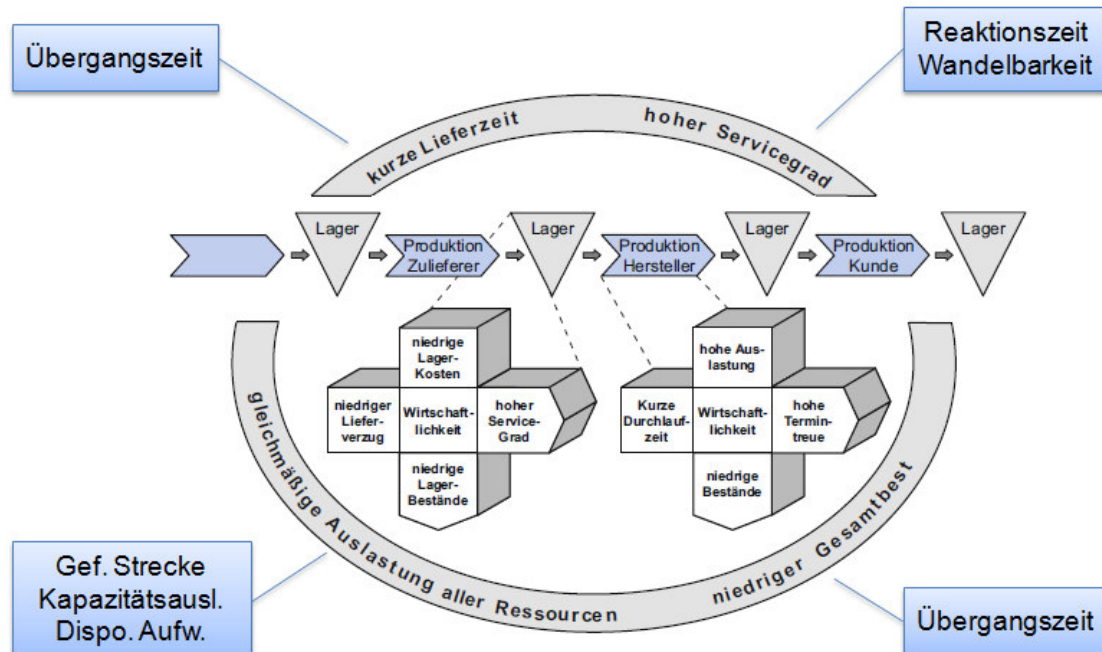


Abbildung 12 - Zielsystem in der Logistik mit Anmerkungen / Soll I4.P; Nach Nyhuis 2012, S. 276

Die fehlende Ganzheitlichkeit dieser Betrachtung wird insbesondere bei der Kapazitätsauslastung deutlich. Die für die Wertschöpfung des Unternehmens sekundäre Fahrzeugauslastung wird hier der Produktionsauslastung, die die Kosten des Unternehmens maßgeblich bestimmt, vorgezogen. Die Übergangszeit ermöglicht es, mit ihrer beschriebenen direkten und indirekten Wirkung, sowohl die Kosten als auch die Leistung der Logistik abzubilden. Die Reaktionszeit und Wandlungsfähigkeit als Leistungskennzahlen eignen sich, den kurz- und langfristigen Servicegrad der Logistik an die unternehmensinternen Kunden abzubilden. Die in der Abbildung 12 dargestellten Kennzahlen Termintreue und Lieferverzug stehen im Zusammenhang mit der Reaktionszeit. Die Kennzahlen Dispositionsaufwand und gefahrene Strecke zeigen, wie auch im Zielsystem Soll I4.0, die Auslastung der Ressourcen und damit speziell die Wirtschaftlichkeit dieser sehr gut. Von der fehlenden Ganzheitlichkeit der Kapazitätsauslastung abgesehen, erfüllt auch diese die Anforderung die wirtschaftliche Nutzung der Flurförderzeuge zu repräsentieren.

4.2.3 Vergleich und Priorisierung der Kennzahlen

Der Anpassung der Kennzahlen folgend müssen die Kennzahlen auch den Anforderungen der Pfannenberg GmbH entsprechend priorisiert werden. Das Ergebnis der Priorisierung ist in einem Netzdiagramm auf Basis eines paarweisen Vergleichs abgebildet.¹¹⁹ Abbildung 13 zeigt das Diagramm der Pfannenberg-Umwelt sowie zum Vergleich in klein beigefügt die Ergebnisse des Soll-Industrie 4.0 Szenarios.

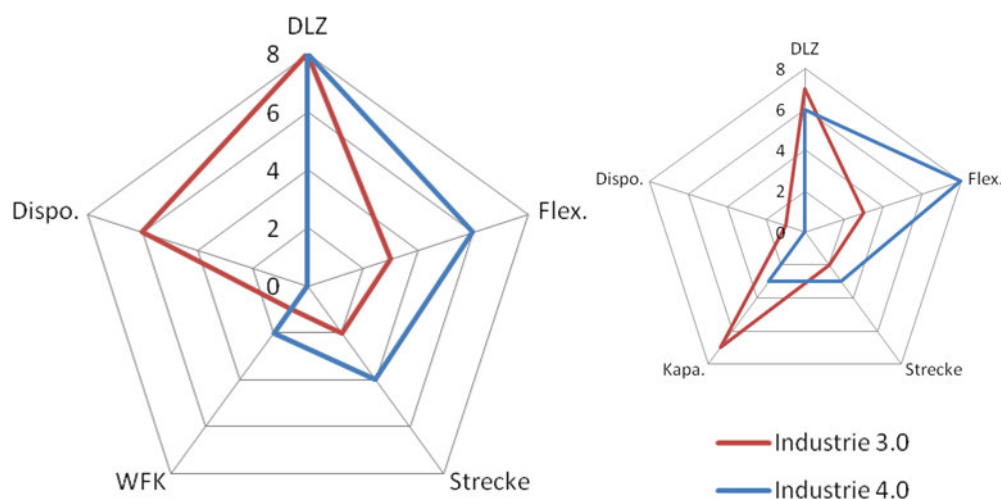


Abbildung 13 - Vergleich Kenngrößen I3.0 und I4.0 / Soll I4.P (links) mit Soll I4.0 (rechts oben); eigene Darstellung

Der Vergleich der beiden Diagramme zeigt sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede. Die Durchlaufzeit hat in allen vier Szenarien eine sehr hohe Bedeutung, die Bedeutung der gefahrenen Strecke, inklusive der Kapazität im Szenario Soll I4.P, ist ebenfalls in den Szenarien gleich beurteilt worden. Die deutlichsten Unterschiede sind im Dispositionsaufwand und in der Kapazitätsauslastung zu sehen. Bei der Kapazitätsauslastung liegt der Unterschied an der variierenden Interpretation der Kennzahl. Ist es im Soll I4.0-Szenario die Auslastung der Produktion, so wird in der Pfannenberg-Umwelt die Logistik betrachtet, wodurch die Kapazität über die gefahrene Strecke betrachtet wird, welche im Vergleich zu den anderen Kennzahlen eine deutlich geringere Priorität hat. Die hohe Bedeutung des Dispositionsaufwands bei der Pfannenberg GmbH resultiert aus der gegebenen Organisation. So wird die Planung aktuell von mehreren Mitarbeitern manuell und mit systemseitiger Unterstützung durchgeführt. Dementsprechend hoch ist auch der Aufwand. Als weiterer Unterschied ist hervorzuheben, dass Pfannenberg auch in der Industrie 4.0-Umwelt eine

¹¹⁹ Vgl. Anhang 2

kurze Durchlaufzeit und nicht die Flexibilität als wichtigstes Ziel erachtet. Dieser Unterschied zum Soll I4.0 Szenario liegt auch an der unterschiedlichen Definition der Kennzahl. Wird im Soll I4.0 Szenario die Flexibilität als Flexibilität des Gesamtsystems gesehen, so bezieht Pfannenberg die Flexibilität nur auf die Logistik. Daraus resultiert die unterschiedliche Priorisierung. Mit der Hinzunahme der Wandlungsfähigkeit wird dem ganzheitlichen und zukunftsorientierten Ansatz des Industrie 4.0 Konzepts jedoch teilweise gerecht.

Zusammenfassend findet mit der Entwicklung zur Industrie 4.0 bei Pfannenberg eine Orientierung von einem hohen Dispositionsaufwand hin zu mehr Flexibilisierung der Logistik statt. Es wird erwartet, mit der Technik und Methodik von Industrie 4.0 den Dispositionsaufwand zu reduzieren und die Flexibilität zu erhöhen.

4.3 Darstellung Materialfluss mit I4.P-Kennzahlen im Ist-Zustand

Aufbauend auf der Diskussion der Kennzahlen zur Effizienzmessung in den vorangegangenen Kapiteln soll nun der Ist-Zustand bewertet werden. Heringezogen werden dazu die Kennzahlen gefahrene Strecke, Wandlungsfähigkeit des Systems, Dispositionsaufwand, Übergangszeit und Reaktionszeit der Logistik.

4.3.1 Gefahrene Strecke

Die gefahrene Strecke wird in der benötigten Zeit in Abhängigkeit der Fertigungsaufträge dargestellt. Dafür wurden die Relationen

- Spritzguss → Übergabepplatz → Lager,
- Lager → Schäumung,
- Schäumung → Übergabepplatz → Lager,
- Lager → Fertigung und
- Fertigung → Warenausgang

untersucht. (vgl. Tabelle 1) Dazu wurden über die erhobenen Zeiten für die Wegstrecke¹²⁰ sowie die Daten der Fertigungsplanung herangezogen. Als Grundlage dient das Fertigungsprogramm mit dem zugehörigen Materialverbrauch und Auftragsvolumen des Jahres 2015. Die Volumen wurden dafür über das Jahr auf Monatsbasis

¹²⁰ Vgl. Anhang E.2 und E.3

gemittelt, in Paletten umgerechnet und anschließend mit den Transportzeiten multipliziert. Basis der Erhebung sind die Filterlüfter-Produktgruppen 10/20/30, 40 und 60 der Pfannenberg GmbH. Die Ergebnisse sind im Anhang E.6 als Tabelle abgebildet. Diese zeigt die jeweiligen Relationen, den Zeitaufwand für die einfache Strecke und die Anzahl der transportierten Paletten. In der linken Hälfte ist der Aufwand ohne Leerfahrten abgebildet, in der rechten Hälfte sind die Rückwege mit einberechnet. Für die Berechnung der Dauer der Buchungsvorgänge liegen deutlich weniger Paletten zugrunde, da die Mitarbeiter immer mehrere Paletten zusammen verbuchen.

Da für die tatsächlich gefahrene Strecke keine Erhebungen durchgeführt wurden und die Werte auf Berechnungen basieren, muss für die Anzahl der Leerfahrten zwischen zwei Fahraufträgen eine Annahme getroffen werden, um diese Kosten mit einzubeziehen. Hier wurde mit der Pfannenberg GmbH die Annahme 75 % getroffen. Nachfolgend zeigt die Tabelle 1 eine den Datenschutzbestimmungen konforme Version.¹²¹ Die Anzahl an Paletten wurde mit einem konstanten Faktor skaliert, die Zeiten wurden ebenfalls mit einem Faktor verrechnet. Daraus ergibt sich die Einheit Zeitpunkte.

Tabelle 1 - Darstellung Transportzeiten pro Monat; eigene Darstellung

Relation	Mitarbeiter	Anzahl Paletten	Dauer/Strecke [Zeitpunkte]	Produkt	Produkt inkl. Leerfahrten
Spritzguss->Lager buchen	Kunststoff	6,61	1,00	6,61	11,58
Buchen	Kunststoff	1,32	5,77	7,63	13,36
Lager buchen->Übergabepplatz	Kunststoff	6,61	1,00	6,61	11,58
Übergabepplatz->Lager	Logistik	6,61	3,46	22,90	40,07
Lager->Schäumung	Logistik	2,93	4,62	13,51	23,65
Schäumung->Übergabepplatz	Kunststoff	4,00	1,19	4,77	8,35
Buchen	Kunststoff	1,00	5,77	5,77	10,10
Übergabepplatz->Lager	Logistik	4,00	3,46	13,85	24,23
Lager->Pufferlager	Logistik	5,23	10,38	54,30	95,02
Pufferlager->Fertigung	Logistik	5,23	2,31	12,07	21,12
Fertigung->WA	Logistik	5,75	2,31	13,27	23,23
Summe	Logistik				227,32
Summe	Kunststoff				54,95
Summe	Gesamt				282,26

Aus der Tabelle wird ersichtlich, in welchem Bereich die Aufwände anfallen. Dabei wird ein Mitarbeiter der Logistik und der Kunststofffertigung unterschieden. Im unter-

¹²¹ Anmerkung: Tabelle 1 ist ohne Skalierung im Anhang E.6 abgebildet

ren Abschnitt der Tabelle werden dahingehend differenzierte Summen gebildet. Teil der Berechnung sind auch die Kommissionier- und Bereitstelllaufwände.

Im nächsten Schritt wird die Fahrzeit mit den Kosten eines Mitarbeiters bewertet, um eine betriebswirtschaftliche Kenngröße herauszubilden. In der angehängten Tabelle¹²² wird die gefahrene Strecke über die Kosten der Mitarbeiter dargestellt. Wie bei der gefahrenen Strecke wird dabei zwischen Kunststoff und Logistik Mitarbeiter differenziert. Der Aufwand in Stunden pro Schicht für Transportprozesse ergibt sich aus den Stunden aus der Tabelle im Anhang E.6 dividiert durch die Anzahl Schichten pro Monat. Im 2-Schicht Betrieb sind es 40 für die Logistik und 60 für die im 3-Schicht-Rhythmus arbeitenden Mitarbeiter in der Kunststofffertigung. Mit den 40 bzw. 60 Schichten im Monat und 12 Monaten ergeben sich die aufgewendeten Stunden im Jahr. Diese mit dem Stundenlohn multipliziert ergeben die im unteren Abschnitt der Tabelle im Anhang E.7 dargestellten Kosten im Jahr. 46 % der Kosten für die zwei Mitarbeiter in der Logistik und 4,9 % für die drei Mitarbeiter in der Kunststofffertigung werden dementsprechend für Transporte aufgewendet.

4.3.2 Wandlungsfähigkeit des Systems

Für die Wandlungsfähigkeit des Systems wird insbesondere auf die Systemänderungsflexibilität eingegangen und anhand von definierten Parametern eine Kenngröße gebildet. Die Systemänderungsflexibilität bezieht sich auf das Materialflusssystem als Ganzes und nicht auf einzelne Prozessteilnehmer. Betrachtet wird, wie ein System auf Veränderungen der Maschinenanzahl reagiert.¹²³ Analog zu dieser grundsätzlichen Einordnung wird die Wandlungsfähigkeit im Anwendungsfall nicht nur auf Maschinen, sondern auf alle Systemteilnehmer bezogen. Wie schnell und zu welchen Kosten können neue Teilnehmer implementiert werden? Dies können beispielsweise neue Mitarbeiter oder auch neue Fertigungszellen sein. Weiter fällt unter die Systemänderungsflexibilität im erweiterten Kontext der Umgang mit Änderungen im Layout. Wie schnell und zu welchen Kosten kann auf Änderungen im Fabriklayout reagiert werden bzw. kann es aktiv geändert werden? Als dritten Punkt ist der generelle Umgang des Systems mit unvorhersehbaren Ereignissen zu betrachten. Welche grundsätzlichen Freiheitsgrade hat das System?

¹²² Vgl. Anhang E.7

¹²³ Vgl. Kaczmarek, 2015, S. 18f.

Die Bewertung der Wandlungsfähigkeit ist wenig greifbar und nur geringfügig durch Kennzahlen auszudrücken. Daher werden an dieser Stelle insbesondere die entstehenden Kosten durch die einwirkenden Veränderungen zur Bewertung des Ist-Zustands und der Szenarien herangezogen. Dabei wird in die drei Stufen

„Ja, das System ist wandlungsfähig; zu geringen Kosten“,

„Ja, das System ist wandlungsfähig; zu hohen Kosten“ und

„Nein, das System ist nicht wandlungsfähig“

differenziert. Die Grenzen zwischen den Stufen sind vage gewählt, da in die Bewertung zu viele unbekannte Faktoren einfließen. Dieser hohe Grad an Ungewissheit soll nicht durch eine „Schein-Präzision“ überdeckt werden, sondern vielmehr ein Bewusstsein für die Relevanz und weitere Bearbeitung der Kenngröße sorgen.

Das System im Ist-Zustand ist unter Aufwendung geringer bis hoher Kosten wandlungsfähig. Neue Prozessteilnehmer hinzuzufügen ist für die Prozesslogik und die operativen Abläufe kein Problem, Kosten entstehen lediglich durch die Einbindung in die ERP-Landschaft. Das Fabriklayout zu ändern ist möglich. Die Fertigungszellen lassen sich neu anordnen, das Hochregallager ist nicht automatisiert, wodurch ein Umbau keine außerordentlichen Kosten verursachen würde. Problematisch sind lediglich die Spritzgussmaschinen aufgrund ihres hohen Gewichts und ihrer Größe. Der Prozess selbst kann auch auf Änderungen im Layout reagieren, da er von Menschen und nicht etwa von Stetigfördertechnik oder hochautomatisierten Maschinen beherrscht wird. Umstellungen können von der Problemlösungskompetenz und der Kreativität der Mitarbeiter aufgenommen und umgesetzt werden. (vgl. Kap 5.5) Hinsichtlich der grundsätzlichen Freiheitsgrade ist das System zum einen an die Fabrikhalle, der historisch gewachsene Bau kann nur bedingt atmen, und an das ERP-System gebunden. Der geringe Grad an Automatisierung lässt eine schnelle Anpassung des Prozesses zu.

4.3.3 Dispositionsaufwand

Der Dispositionsaufwand, definiert als das Verhältnis manuell zu automatisch planender Fertigungsaufträge, ist aktuell sehr hoch, da noch keine automatische Planung stattfindet. Die Mitarbeiter in der Fertigungsplanung organisieren die Fertigung manuell. Dabei wird die Kunststoffplanung, bestehend aus Schäumung und Spritzgussfertigung, von einem Mitarbeiter durchgeführt, die Filterlüfterfertigung wird von einem weiteren Mitarbeiter geplant und ein dritter Mitarbeiter organisiert den Nachschub an Zukaufteilen.

4.3.4 Durchlaufzeit

Den vorhergehenden Ausführungen folgend wird die Übergangszeit als Kenngröße für die Durchlaufzeit verwendet. Der Prozess wird, um eine Unterscheidung in Kosten und Leistung zu ermöglichen (vgl. Kap. 4.2.2), in kundenanonyme Vorproduktion, die Kunststofffertigung und die auch für den Servicegrad relevante, auftragsbezogene Filterlüfterfertigung unterteilt. Die Auswertung beruht auf der in Kapitel 2.3 durchgeführten Wertstromanalyse. Dementsprechend beziehen sich auch die aufgenommenen Zeiten auf den Repräsentanten aus der PF 43.000-Familie.

Die Kunststofffertigung besteht aus den in Anhang E.8 aufgelisteten Prozessen mit den jeweiligen Prozess-, Liege-, Transport- und Rüstzeiten. Hinter dem Hauptlager ist der Vollständigkeit halber, obwohl für die Übergangszeit irrelevant, auf die Reichweite der kritischen Komponente referenziert (vgl. Kap. 2.3.1).

Der Anteil der Übergangszeit an der Durchlaufzeit macht dabei 10,31 % aus.¹²⁴ Wie in der Abbildung 14 ersichtlich hat die Bereitstellung vor der Schäumung (Lager Bereitstellung) mit 55 % den größten Anteil an der Übergangszeit. Die Liegezeit ist hier so hoch, da immer das komplette Los bereitgestellt wird. Die Losgröße orientiert sich dabei an dem Bedarf für vier Wochen. Mit einem Anteil von 23 % ist das Lager Übergabepplatz ebenfalls ein Treiber der langen Übergangszeit. Sehr gering ist dagegen der Anteil der Transportzeiten an der Übergangszeit. Mit 0,7 % fallen diese kaum ins Gewicht. Einen Ansatzpunkt für weitere Analysen sind die Lager Spritzguss und Schäumung sowie das Lager Buchen. Durch die sehr niedrige Priorisierung dieser

¹²⁴ Vgl. Anhang E.2, E.3 und E.8

Prozesse, insbesondere des Fertigungsbuchens nach der Produktion der (Teil-)Mengen, entstehen längere Liegezeiten.

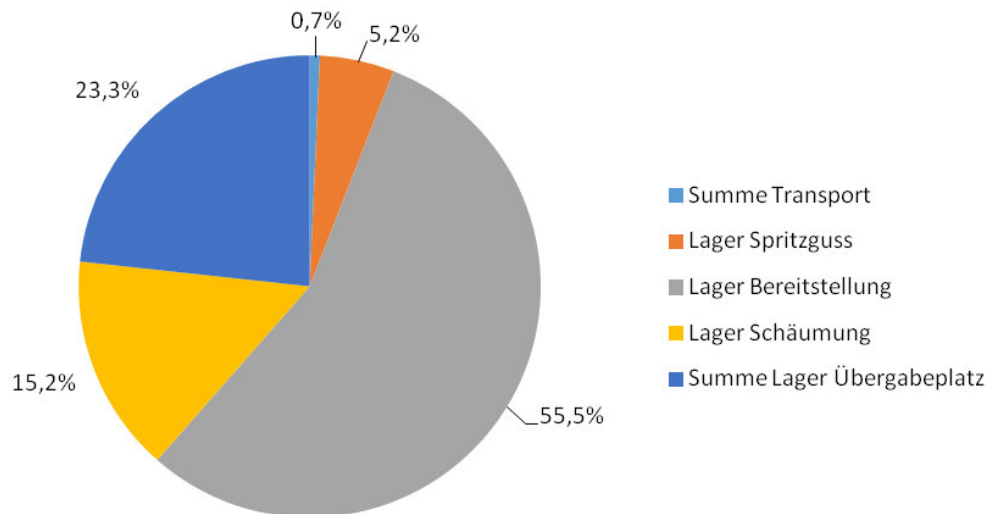


Abbildung 14 - Differenzierung Übergangszeit Kunststofffertigung; eigene Darstellung

Der zweite Teilprozess, die Bereitstellung für die Filterlüfterfertigung, besteht aus weniger Prozessschritten als die Kunststofffertigung. Aus dem Hauptlager werden Komponenten kommissioniert und gepuffert, anschließend zum Lager Bereitstellung transportiert. Die jeweiligen Zeiten sind im Anhang E.9 abgebildet.

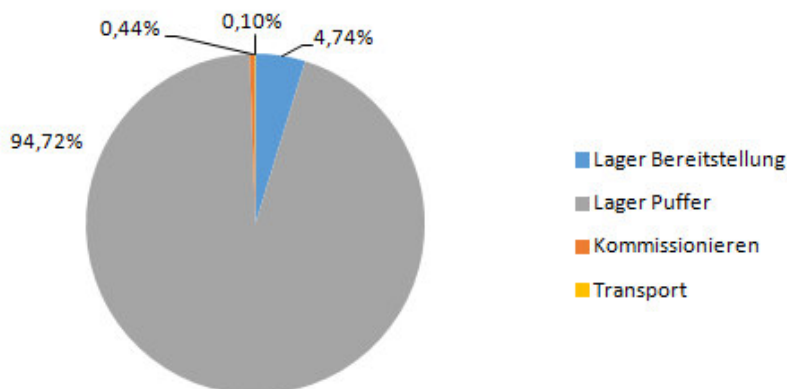


Abbildung 15 - Differenzierung Übergangszeit Filterlüfterfertigung; eigene Darstellung

Wie aus den Anhängen E.3 und E.9 hervorgeht, macht die Übergangszeit 10,8 % Durchlaufzeit aus. Von dieser Durchlaufzeit machen die Prozesse Kommissionieren, Transport und Lager Bereitstellung 5 % aus, die anderen 95 % macht das Pufferlager aus. (vgl. Abb. 15) Die Liegezeit ist so hoch, da mindestens die Fertigungsaufträge für den nächsten Tag bereit liegen.

4.3.5 Flexibilität

Wie in Kapitel 4.2.1.5 erläutert, wird die Flexibilität mit der Reaktionszeit der Logistik beschrieben: Wie lange benötigen die Mitarbeiter, um einen neuen Auftrag zu bearbeiten? Um diese Zeiten darzustellen, wird auf die Erhebungen im Rahmen des Wertstromdesigns zugegriffen. Betrachtet werden die Liegezeiten vor dem Transportprozess. Im Ist-Zustand muss zwischen Abhol- und Zustellaufträgen differenziert werden. Zustellaufträge, darunter fallen die Belieferung der Fertigungszellen und der Schäummaschine, werden über das ERP-System übermittelt. Die Kommissionierung findet dabei, wie aus den Übergangszeiten anhand der Zwischenlagerzeiten ersichtlich, mehrere Stunden vorher statt.¹²⁵ Die Abholaufträge werden nicht über das ERP-System übermittelt. Es liegen keine Fahraufträge vor, der Prozess wird nach dem „Go-See“-Prinzip¹²⁶ angesteuert. Der vorliegende Prozess ist der Transport vom Lager Übergabeplatz ins Hauptlager. Hier liegen die Wartezeiten im Mittel bei mehreren Stunden.¹²⁷

¹²⁵ Vgl. Anhang E.2 und E.3

¹²⁶ Vgl. Günthner, 2013, S. 234

¹²⁷ Vgl. Anhang E.2 und E.3

5 Handlungsoptionen

Der in Kapitel 3.2.2, Abbildung 8 dargestellte Soll-Wertstrom für ein Industrie 4.0-Umfeld spiegelt die Industrie 4.0-Vision von ten Hompel wider. Die von ihm geprägten Schlagwörter wie „Der ideale logistische Raum ist leer!“¹²⁸ und „Schwärme autonomer Fahrzeuge“¹²⁹ beschreiben ein Zukunftsszenario für die Industrie, welches jedoch noch nicht greifbar ist und über eine sehr hohe Flughöhe verfügt. Zum einen ist die Technik der Anbieter von Intralogistiklösungen wie der Jungheinrich AG noch nicht so weit fortgeschritten, dass Schwärme autonomer Fahrzeuge angeboten werden können und zum anderen ist die Richtung, in die sich Industrie 4.0 entwickeln wird, noch offen. Dabei geht es vordergründig um die Rolle und das Verhältnis von Mensch und Maschine. Dieses Verhältnis und seine unterschiedlichen Prägungen können mit drei Szenarien beschrieben werden: Das Werkzeug-, Hybrid- und Automatisierungsszenario zeigen jeweils auf, welchen Einfluss technische Möglichkeiten auf Prozesse, Systeme und das Arbeitsumfeld haben könnten.¹³⁰

Das Werkzeugszenario beschreibt eine Stärkung der Position des Mitarbeiters. Dieser wird mit Assistenzgeräten befähigt, weiterführende und komplexere Aufgaben durchzuführen.¹³¹ Der Mitarbeiter steht in der Smart Factory im Mittelpunkt und überwacht als Augmented Operator, zu dem er mit Assistenzgeräten und Expertensystemen mit Werkzeugcharakter wird, die Prozesse.¹³² Als Augmented Operator erledigt der Mitarbeiter primär informatorische, gestalterische und organisatorische Aufgaben, während einfache physische Tätigkeiten automatisiert werden.¹³³

Das Automatisierungsszenario sieht keine Stärkung des Mitarbeiters vor, sondern vielmehr das Vordringen der Technik.¹³⁴ Die im Werkzeugszenario als Unterstützung des Mitarbeiters eingeordneten CPS übernehmen im Automatisierungsszenario die Kontrolle über die Steuerung der im hohen Grad automatisierten Prozesse.¹³⁵ Der Mitarbeiter übernimmt lediglich die Ausführung, weswegen auch der Bedarf an quali-

¹²⁸ ten Hompel, 2014, S. 615

¹²⁹ ten Hompel, 2014, S. 615

¹³⁰ Vgl. Dombrowski, 2014, S. 137; Schlund, 2013, S. 22ff.

¹³¹ Vgl. Werthmann, 2014, S. 40

¹³² Vgl. Dombrowski, 2014, S. 133f.; Windelband, 2012, S. 216f.

¹³³ Vgl. Dombrowski, 2014, S. 137; Windelband, 2012, S. 216f.

¹³⁴ Vgl. Windelband, 2012, S. 216f.

¹³⁵ Vgl. Dombrowski, 2014, S. 137, Windelband, 2012, S. 216f.; Werthmann, 2014, S. 40

fizierten Mitarbeitern sinkt. Die Ausnahme stellt ein kleiner Kreis hochqualifizierter Experten für die Wartung der CPS sowie die initiale Aufsetzung des Systems dar.¹³⁶ Alle anderen Mitarbeiter werden mit zunehmender Automatisierung substituiert und bekommen mehr und mehr eine Lückenbüßerfunktion. Im Endzustand des Automatisierungsszenarios steht eine vollständige Automatisierung der Prozesse.¹³⁷

Das Hybridszenario, auch als komplementäres Automatisierungskonzept beschrieben,¹³⁸ steht zwischen dem Automatisierungs- und Werkzeugszenario. Bei zunehmender Automatisierung bleibt der Mitarbeiter eine wichtige Komponente im Entscheidungs- und Steuerungsprozess. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Vor- und Nachteile von Mensch und Maschine soll aus einer ganzheitlichen Perspektive eine Kooperation zwischen den cyber-physischen Systemen und den Mitarbeitern entstehen.¹³⁹

Die Schwärme autonomer Fahrzeuge von ten Hompel sind in jedem der drei Szenarien vorstellbar. In den darauffolgenden Kapiteln soll jedoch wie eingangs beschrieben eine Handlungsempfehlung für den Hamburger Mittelstand gegeben werden. Mit dieser Zielsetzung wird zu jeder der drei Szenarien eine Option vorgestellt. Der Einsatz von Assistenzgeräten lässt sich als Werkzeugszenario einordnen, die Implementierung eines fahrerlosen Transportsystems als ersten Schritt in einem Automatisierungsszenario und die Kombination von Assistenzgeräten und eines fahrerlosen Transportsystems als Hybridszenario.

Die Optionen werden erst skizziert, anschließend bezüglich der Verbesserung der Effizienz, anhand der vorgestellten Zielgrößen, bewertet und dann verglichen. Abschließend wird eine Option ausgewählt und durch die Empfehlung erster Maßnahmen zur Umsetzung genauer beschrieben.

Grundsätzlich ist bei den vorgestellten Handlungsoptionen die eingangs definierte Zielsetzung zu beachten. Ziel ist, Industrie 4.0 für den Hamburger Mittelstand greifbarer zu machen und erste Schritte einzuleiten. Die beschriebenen Anforderungen von I4.0 werden dementsprechend mit der Priorität der Anwendbarkeit betrachtet, während die ganzheitliche Vision von I4.0 erst einmal nachrangig ist.

¹³⁶ Vgl. Dombrowski, 2014, S. 137f.

¹³⁷ Vgl. Hirsch-Kreinsen, 2015, S. 15

¹³⁸ Vgl. Hirsch-Kreinsen, 2015, S. 15

¹³⁹ Vgl. Hirsch-Kreinsen, 2015, S. 15; Dombrowski, 2014, S. 137f.

5.1 Option 1: Automatisierung des Transportprozesses

Den Beschreibungen zum Automatisierungsszenario folgend, wird in diesem Kapitel ein Szenario zur Automatisierung des Referenzprozesses bei Pfannenberg beschrieben. Mit dem Ziel, dass die Prozesse von CPS gesteuert werden, wird in diesem Szenario ein erster Schritt in diese Richtung getätigt und der Transportprozess automatisiert. Dies soll durch die Implementierung eines Auto Pallet Movers der Jungheinrich AG geschehen.

5.1.1 Beschreibung der Option

Der Auto Pallet Mover (APM) ist ein fahrerloses Transportsystem auf Basis eines Serienfahrzeugs. Der abgebildete ERC 215a ist beispielsweise ein vollautomatischer Deichsel-Hochhubwagen. Der APM kann als reines Automatiksystem mehrere Bahnhöfe miteinander verbinden. Als Bahnhöfe werden die Übergabeplätze für Paletten beschrieben, zwischen denen der APM sich bewegt. Die Bewegung basiert auf einer Positionser-



Abbildung 16 - ERC 215a; Quelle: Jungheinrich, 2016a

fassung mit einem Laserscanner und Reflektoren in der Halle und folgt dann definierten Fahrwegen. Die Ansteuerung kann sowohl über ein angeschlossenes Warehouse-Management-System als auch über eine Stand-Alone-Lösung erfolgen. Eine Stand-Alone-Lösung kann beispielsweise Drucktaster und/oder Sensoren an den Bahnhöfen umfassen.¹⁴⁰

Der Auto Pallet Mover steht im Mittelpunkt der Handlungsoption. Er soll die Automatisierung einläuten, in dem er die Transportvorgänge zwischen der Kunststofffertigung, bestehend aus Schäumung und Spritzgussmaschinen, der Fertigung und dem Lager übernimmt. Es wird dabei von der Implementierung eines einzelnen APM ausgegangen, um eine Prozesssicherheit zu erlangen. In einem zweiten Schritt kann,

¹⁴⁰ Vgl. Jungheinrich, 2016, S. 1

sofern die Transportvolumen es erfordern, ein oder mehrere weitere APM hinzugenommen werden. Um die Implementierung eines APM zu ermöglichen, müssen Übergabeplätze eingerichtet werden, zwischen denen der APM verkehren kann. Diese sind nötig, da der APM noch nicht in ein Hochregallager fahren und sich die benötigten Paletten selbstständig suchen kann. Die Barcode und Palettenerkennung ist hier noch nicht robust genug. Auch das Abholen in der Kunststofffertigung und das Bereitstellen in der Fertigung muss über sogenannte Bahnhöfe erfolgen, da der APM definierte und genau in die Navigation eingemessenen Plätze in einem Regal benötigt. Steht eine Palette nicht den Vorgaben entsprechend auf dem Stellplatz, kann der APM sie nicht aufnehmen. Diesen Einschränkungen folgend, müssen in der Kunststofffertigung, im Lager und in der Fertigung sowie im Wareneingang Bahnhöfe installiert werden.¹⁴¹

Wie in der angehängten Abbildung ersichtlich, übernimmt der Auto Palett Mover einen Großteil der Transportaufgaben. Lediglich den Abschnitt vom Bahnhof bis zum Lager- oder Verwendungsort muss von den Mitarbeitern manuell ausgeführt werden.

Die Informationsprozesse werden nicht grundsätzlich verändert. Die Ansteuerung der Fertigung und der Kunststofffertigung erfolgt weiter über das ERP-System, auch das Lager erhält weiterhin so seine Kommissionieraufträge.¹⁴² Die Ansteuerung des APM kann über Drucktaster oder Sensoren an den Bahnhöfen erfolgen. Stellt der Mitarbeiter eine Palette auf einen der Plätze, bekommt der APM einen Fahrauftrag. Da der APM keine Informationen über die Palette aufnimmt, sondern nur über einen Fahrauftrag erhält, sind zwei Dinge zu beachten. Zum einen muss der Mitarbeiter die Palette auf den Zielplatz buchen, um Konsistenz im Warehouse-Management-System sicherzustellen. Zum anderen müssen die Plätze in den Bahnhöfen festen Relationen zugeordnet werden, da der APM diese Differenzierung nicht trifft. Der Bahnhof Lager muss dementsprechend Plätze für die Relationen zum Bahnhof Kunststoff und zum Bahnhof Fertigung bereithalten. Außerdem müssen Plätze für die einzulagernden Paletten eingerichtet werden. Der Bahnhof Kunststoff benötigt ebenfalls Plätze für ankommende Paletten und darüber hinaus Plätze für die Relation ins Lager. Der Bahnhof Fertigung hat den gleichen Aufbau wie der Bahnhof Kunststoff, mit dem Un-

¹⁴¹ Vgl. Anhang 3

¹⁴² Vgl. Anhang E.10 und E.11

terschied, dass die abgehenden Paletten als Zielort den Bahnhof Warenausgang haben. Dieser hat lediglich Plätze für ankommende Paletten.

5.1.2 Darstellung Effizienzverbesserung

Um festzustellen inwieweit sich die Veränderung des Prozesses auf die Effizienz bemerkbar macht, wird die Handlungsoption Auto Pallet Mover auf die fünf Kenngrößen hin untersucht. Da für die Analyse der Handlungsoption keine messbaren Daten zur Verfügung standen und die Ergebnisse vielmehr auf Schätzungen, Annahmen sowie Ableitungen aus dem Ist-Zustand beruhen, wird in einen Best- und einen Worst-Case unterschieden. Für den Worst-Case wird darüber hinaus noch unterschieden, ob im Lager im 2-Schicht- (Worst 2) oder 3-Schicht-Betrieb (Worst 3) gearbeitet wird.

5.1.2.1 Gefahrene Strecke / Kapazitätsauslastung

Basierend auf den Ist-Werten für die benötigte Zeit für die Relationen wurden die Relationen für das Szenario bewertet. Diese Zeiten wurden anschließend, wie für die Ist-Analyse mit dem Fertigungsprogramm und dem zugehörigen Materialverbrauch und Auftragsvolumen von 2015 gewichtet. Tabelle 2 zeigt eine komprimierte Zusammenfassung der Ergebnisse, welche mit denselben Faktoren wie Tabelle 1 erweitert wurde.¹⁴³ Eine detailliertere Version ist dem Anhang beigefügt.¹⁴⁴

Für die gefahrene Strecke wurden die benötigten Zeiten auf die jeweiligen durchführenden Prozessteilnehmer allokiert. Unterschieden wurde in die Mitarbeiter der Logistik, Kunststofffertigung, den APM und die Mitarbeiter in der Fertigung. Die Kapazitätsersparnisse ergeben sich aus den eingesparten Mann-Stunden im Vergleich zum Ist-Wert. Die Maschinen-Stunden werden nicht hinzugezogen, da diese buchungs-technisch keine variablen Kosten darstellen, sondern im Anlagevermögen geführt und abgeschrieben werden. Die gesparten Stunden werden mit den jährlichen Mitarbeiterkosten von gewertet. Für die weiteren Umrechnungsschritte wurden 7,5 Stunden pro Schicht, 10 Schichten pro Woche im 2-Schicht-Betrieb bzw. 15 Schichten pro Woche im 3-Schicht-Betrieb und 4 Wochen pro Monat als Grundlage verwendet.

¹⁴³ Anmerkung: Tabelle 2 ohne Skalierung ist im Anhang E.13 abgebildet

¹⁴⁴ Vgl. Anhang E.12

Tabelle 2 - Gefahrene Strecke / Kapazitätsauslastung Option APM; eigene Darstellung

Gefahrene Strecke	IST	Best	Worst 2	Worst 3
Logistik [zp]/Schicht	5,683	2,925	4,778	3,185
Kunststoff [zp]/Schicht	0,916	1,467	0,931	0,931
APM [zp]/Schicht	-	3,301	3,301	3,301
Fertigung [zp]/Schicht	-	0,320	0,320	0,320
Mensch [zp]/Schicht	6,60	4,71	6,03	4,44
Maschine [zp]/Schicht	-	3,30	3,30	3,30
<hr/>				
Gesparte [zp]/Schicht		1,89	0,57	2,16
Gesparte [zp]/Monat		77,28	35,31	99,01

Mit diesen Daten ergeben sich im Best-Case Einsparungen von knapp 29 % der Mann-Stunden pro Schicht. Im Worst 2-Case lassen sich Einsparungen von 9 % erzielen, während im Worst 3-Case sich etwa 33 % einsparen lassen. Dass die Einsparungen gering und der Gesamtaufwand an Transporten steigen, liegt an der Tatsache, dass die Paletten mehrfach bewegt werden müssen. Die Bereitstell- und Abholvorgänge zu und von den Bahnhöfen gleichen einen Großteil der Einsparungen aus. Im Wertstrom-Diagramm für das Szenario¹⁴⁵ und in der detaillierten Fassung der Zeiten für die gefahrene Strecke werden diese Prozessschritte genau aufgeführt.¹⁴⁶

Die Auffälligkeit, dass die Einsparungen im Worst 3-Case deutlich höher als im Best-Case sind, lässt sich damit begründen, dass durch die unterschiedliche Anzahl an Schichten dem Best-Case Szenario 40 Wochenstunden und dem Worst 3-Case 60 Wochenstunden zugrunde liegen. Bei gleichbleibendem Transportvolumen ist die Belastung pro Schicht im 3-Schicht-Szenario daher kleiner. Diesem Umstand wird in der Tabelle im Anhang E.13 durch die Zeile „Gesparte €/Jahr [Netto]“ Rechnung getragen. Von den Einsparungen von in Euro werden die Kosten für einen zusätzlichen Mitarbeiter abgezogen, womit sich insgesamt im Worst 3-Case zusätzliche Kosten knapp 50 % eines Mitarbeiterlohns ergeben.

¹⁴⁵ Vgl. Anhang E.10 und E.11

¹⁴⁶ Vgl. Anhang E.12

5.1.2.2 Wandlungsfähigkeit

Im Gegensatz zur gefahrenen Strecke kann bei der Wandlungsfähigkeit auf eine Differenzierung zwischen Worst 2- und Worst 3-Case verzichtet werden, da die Wandlungsfähigkeit nicht in Abhängigkeit zur Anzahl der Schichten steht. Es wird daher lediglich in Best- und Worst-Case unterschieden. Bezogen auf die Implementierung neuer Prozessteilnehmer, wie einer weiteren Fertigungszelle, kann das System im Best-Case bereits zu geringen Kosten reagieren. So kann eine weitere Fertigungszelle vom bereits bestehenden Bahnhof Fertigung mitversorgt werden. Kosten können dabei ggf. durch eine Vergrößerung des Bahnhofs entstehen. Im Worst-Case kann das System keine weiteren Teilnehmer einbinden, wenn beispielsweise dadurch das Transportvolumen, welches der APM bewältigen muss, so rapide ansteigt, dass mehrere Fahrzeuge benötigt werden, dies jedoch die Einschränkungen durch die Fabrikhalle nicht erlauben.

Änderungen im Layout verursachen bereits im Best-Case hohe Kosten. Ursache dafür ist die sensible Sensorik kombiniert mit der unflexiblen Steuerung des APM. Der APM bleibt vor jedem Hindernis auf seiner fest programmierten Route so lange stehen, bis die Route wieder frei ist. Einem Hindernis ausweichen kann er nicht. Dementsprechend müssen alle Änderungen im Layout in der im APM eingespielten Karte angepasst werden. Dies muss von geschultem Personal durchgeführt werden, wodurch zusätzliche Kosten entstehen. Im Worst-Case führt eine Änderung im Layout dazu, dass der APM bestimmte Routen nicht mehr befahren kann, beispielsweise wenn Gassen enger als die erforderliche Mindestbreite für den APM werden.

Mit der grundsätzlichen Wandlungsfähigkeit verhält es sich wie mit den Änderungen im Layout. Bereits kleine Änderungen sind durch die mangelnde Flexibilität des APM bereits mit hohen Kosten durch Installationsarbeiten von Servicetechnikern verbunden und im Worst-Case erst gar nicht realisierbar.

5.1.2.3 Dispositionsaufwand

Durch die Implementierung des APM ändert sich am Dispositionsaufwand nichts. Die zentrale Planung bleibt bestehen, da nur ein Teil des Transportprozesses automatisiert wird.

5.1.2.4 Durchlaufzeit

Bei der Übergangszeit machen sich die Unterschiede zwischen den Szenarien besonders deutlich bemerkbar. Wie in Tabelle 3¹⁴⁷ oder auch im Wertstromdiagramm¹⁴⁸ ersichtlich, kann im Best-Case die Übergangszeit um 86 % reduziert werden. Der Worst-Case variiert zwischen einer Zunahme um 14 % im 2-Schicht-Szenario und Reduzierung der Übergangszeit um 54 % im 3-Schicht-Szenario. Die deutlichen Einsparungen von bis zu 86 % im Vergleich zum Ist-Zustand können durch die Prozessreorganisation und die verkürzte Reaktionszeit des APM eingespart werden. Die Reorganisation des Prozesses beinhaltet insbesondere das Auflösen von Pufferlagern. Dadurch, dass der Mitarbeiter im Lager nicht mehr für den Transportprozess zuständig ist, kann er sich primär um das zeitnahe Bereitstellen der Kommissionieraufträge kümmern. Sicherheitsbestände sind daher nicht mehr notwendig. Darüber hinaus können in allen drei Szenarien Liegezeiten eingespart werden, da die Abholungen nicht mehr nach der „Go-See“-Steuerung ausgelöst werden, sondern durch Fahraufträge an den APM. Das Übersehen oder Vergessen einer Palette entfällt vollständig.

Tabelle 3 - Übergangszeiten Automatisierungsszenario; eigene Darstellung

Ersparnis	
IST	
Best	86,51%
Worst2	-14,65%
Worst3	54,72%

Die Unterschiede zwischen den beiden Worst-Case-Szenarien resultieren daraus, dass im 2-Schicht-Szenario Liegezeiten von über 8 Stunden entstehen, da für die Nachtschicht bereits im Voraus kommissioniert werden muss und gleichzeitig im Lager ankommende Lieferungen erst am nächsten Morgen eingelagert werden können.

¹⁴⁷ Anmerkung: Die vollständige Tabelle 3 ist im Anhang E.14 abgebildet

¹⁴⁸ Vgl. Anhang E.10 und E.11

5.1.2.5 Flexibilität

Für die Reaktionszeit des APM wird im Gegensatz zur Betrachtung bei der Wandlungsfähigkeit in Worst 2- und Worst 3-Case unterschieden. Zwar ist der APM über alle drei Schichten hinweg einsatzbereit, jedoch ist er Abhängig vom vorgelagerten Prozess.

Bei der Betrachtung der Reaktionszeit wurde die Liegezeit vor dem Transportprozess betrachtet. Im Automatisierungs- und Hybridszenario werden die acht Stunden der Nachtschicht nicht in die Liegezeit gerechnet, sondern in die Kommissionierung.¹⁴⁹ Betrachtet man an dieser Stelle die Fragestellung, was die Reaktionszeit der Logistik aussagen soll, muss differenziert werden. Betrachtet man lediglich den Auto Pallet Mover, so macht es keinen Unterschied, ob in 2- oder in 3- Schichten gearbeitet wird, da der APM 24 Stunden einsetzbar ist. Betrachtet man den Transportprozess jedoch ganzheitlich, so muss die fehlende Nachtschicht berücksichtigt werden. Bei nachts nicht arbeitender Logistiker im Lager, ist der APM darauf angewiesen, dass die in der Nacht benötigten Waren bereits bereitgestellt wurden. Kommt nun während der Nachtschicht ein unvorhergesehener Materialbedarf, ist niemand im Lager, der dem APM Ware bereitstellen kann. Die theoretisch kurze Reaktionszeit kann nicht eingehalten werden. Vielmehr muss für den Worst 2-Case der fehlende Mitarbeiter in der Logistik in die Betrachtung mit einbezogen werden.

Im Best-Case beträgt die Reaktionszeit des APM, der Zeit bis er für einen neuen Auftrag bereit ist, 5,19 Zeitpunkte. Der APM braucht laut Wertstrom¹⁵⁰ 4,61 Zeitpunkte für die Verbindung der Bahnhöfe und nach dem Abstellen der Palette nochmal 1,15 Zeitpunkte zum Rangieren. Ein Transportprozess dauert dementsprechend 10,38 Zeitpunkte, da jeweils ein Hin- und ein Rückweg fällig werden. So braucht er im Mittel 5,19 Zeitpunkte, um entweder mit diesem Auftrag fertig zu sein oder 5,19 Zeitpunkte um zum entsprechenden Bahnhof zu fahren, wenn er gerade keinen Auftrag hat. Im Worst 3-Case braucht der APM 41,54 Zeitpunkte um am Bahnhof Kunststoff, hier liegt die längste Reaktionszeit vor (vgl. Tabelle 7), eine Palette abzuholen. Diese Zahl resultiert aus der Priorisierung der Aufträge. Die höchste Priorität hat die Nachfüllung des letzten Kanban-Behälters an den Fertigungszellen, die zweithöchste die

¹⁴⁹ Vgl. Anhang E.10 und E.11

¹⁵⁰ Vgl. Anhang E.10 und E.11; Werte für den APM mit Experten von Pfannenbergs und Jungheinrich geschätzt

Bereitstellung der ersten Palette mit Grundgehäusen an der Schäummaschine, bzw. der nächsten Palette, wenn keine weiteren mehr an der Schäummaschine stehen. Als nächstes kommt in die Prioritätenliste das Nachfüllen des vorletzten Kanbanbehälters und anschließend das Bereitstellen der zweiten bzw. übernächsten Palette zu spritzender Grundgehäuse.¹⁵¹ Nachdem diese vier Aufträge á 10,38 Zeitpunkten erledigt sind, widmet sich der APM dem Abholen. Dies beschreibt dahingehend einen Worst-Case, dass der APM bereits zweimal am Bahnhof Kunststoff war, jedoch andere Paletten mitgenommen hat. Die Reaktionszeiten der anderen Prozesse sind entsprechend ihrer höheren Priorisierung kürzer. (vgl. Tabelle 4)¹⁵² Für den Worst 2-Case fallen dagegen deutlich längere Reaktionszeiten an, da während der Nachtschicht keine Paletten bereitgestellt werden und somit der APM auch nicht reagieren kann.

Tabelle 4 - Reaktionszeiten Automatisierungsszenario; eigene Darstellung

Lagerplatz	Best [zp]	Worst 3 [zp]	Worst 2 [zp]
BHF KST	5,19	41,54	595
BHF Lager	5,19	20,77	575
BHF KST	5,19	41,54	595
BHF Lager FL	5,19	10,38	564
Min/Max	5,19	41,54	595

Im Vergleich zu den langen Reaktionszeiten im Ist-Zustand kann im Automatisierungsszenario die Effizienz verbessert und deutlich flexibler reagiert werden. Die Reduzierung der Reaktionszeit im Ist-Zustand von 242 bzw. 2.215 Zeitpunkte auf im Worst 3-Case 41,54 Zeitpunkte oder im Best-Case 5 Zeitpunkte gibt der Planung neue Möglichkeiten. Aufträge können so kurzfristiger ein- und umgeplant werden, sofern die Planung nicht nachts stattfindet.

¹⁵¹ Anmerkung: Die Priorisierung ist in Zusammenarbeit mit der Pfannenberg GmbH erarbeitet worden. Das Nachfüllen der Kanban-Behälter hat höchste Priorität, da die Fertigung der wertschöpfende Prozess ist. Das zügige Beliefern der ersten/nächsten Palette Grundgehäuse ist relevant, da die Schäummaschine sonst austrocknet.

¹⁵² Anmerkung: Tabelle 4 ist ohne Skalierung im Anhang E.15 abgebildet

5.1.3 Einordnung Industrie 4.0 Kontext

In diesem Abschnitt soll die beschriebene und bewertete Handlungsoption APM in den Kontext von Industrie 4.0 eingeordnet werden. Dafür wird sie hinsichtlich der in Kapitel 3.2 definierten Anforderungen an CPS untersucht.

Die bereits angesprochene fehlende Ganzheitlichkeit der Herangehensweise ist die Hauptursache, warum die Handlungsoption APM nur eine der elf Anforderungen an die CPS erfüllt. Die Abbildung 17 gibt einen Überblick über größtenteils erfüllte (grün), teilweise erfüllte (gelb) und nicht erfüllte Anforderungen (rot).

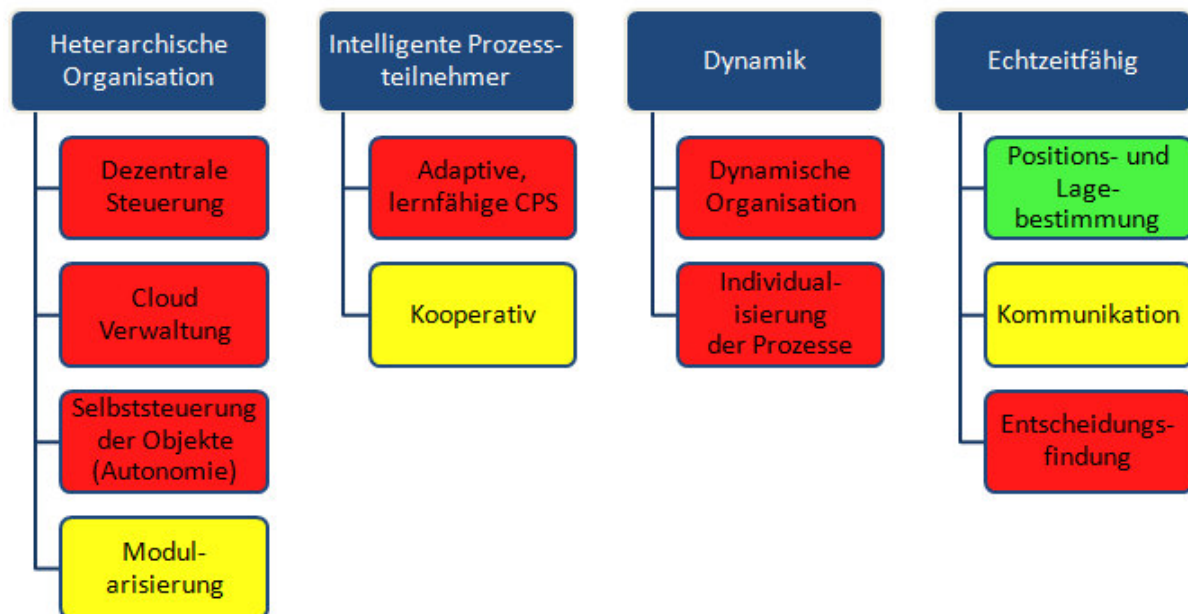


Abbildung 17 - Einordnung APM hinsichtlich der CPS Anforderungen; eigene Darstellung

Die Implementierung eines automatischen Transportgerätes, wie hier eines Auto Palett Movers, schafft kein Industrie 4.0-Umfeld. Wie in Kapitel 3.5 gezeigt, ist dafür eine Steigerung des Niveaus des logistischen Wissens notwendig. Hier wird lediglich der Transportprozess automatisiert. Die Steuerung und die gesamte Organisation bleiben zentral und erfolgen weiterhin durch die Produktionsplanung. Dezentrale Ansätze oder Autonomie gibt es nicht, insbesondere nicht bezogen auf den APM. Eine Cloud-Verwaltung liegt ebenfalls nicht vor. Darüber hinaus ist der APM auch kein intelligentes System, da er einer festen Spur folgen muss und auftretenden Hindernissen keinesfalls ausweichen kann, sondern lediglich davor stehen bleiben muss.

Über eine Intelligenz hinsichtlich Lernfähigkeit oder Adaptivität verfügt der APM nicht, er folgt stur seinen Fahrbefehlen, ohne diese zu beeinflussen. Dementsprechend

fehlt es dem System auch an Dynamik. Die bereits angesprochenen Spurbindung und die Einschränkung der Routen als Verkehr zwischen den fest definierten Bahnhöfen lassen Individualisierung und Dynamik nicht zu. Da der APM vor Hindernissen stoppt und ihnen nicht etwa ausweichen kann, sind keine Ansätze einer dynamischen Steuerung möglich. Die einzige Dynamik, die umsetzbar ist, ist eine sich anpassende Priorisierung der Fahrbefehle. Diese Dynamik muss jedoch von der Produktionsplanung gesteuert werden, da der APM nicht über die Sensorik verfügt, betreffende Änderungen im Umfeld wahrzunehmen.

Im Rahmen der Echtzeitfähigkeit kann der APM auf eine sehr akkurate Positions- und Lagebestimmung, die er für die Navigation benötigt, verweisen. Auch ist der APM in der Lage, Informationen weiterzugeben, jedoch fehlen ihm in diesem Szenario dafür die Empfänger. Diese beiden Punkte verlieren jedoch ihre Relevanz, da der APM nicht in der Lage ist, Entscheidungen zu treffen, ein Kernaspekt in der Industrie 4.0-Umwelt. Deutlich wurde diese insbesondere bei der Diskussion der Wandlungsfähigkeit.

Zusammengefasst lässt sich das vorgestellte Szenario nicht als Industrie 4.0 Lösung auffassen. Um zu einer solchen zu werden, kann die Implementierung eines APM ein erster Schritt sein, jedoch müssen weitere Prozessteilnehmer zu CPS werden, damit Heterarchie umgesetzt werden kann. Außerdem ist es erforderlich, dass der APM ein CPS wird. Adaptivität, Dynamik, Entscheidungsfindung sind, wie oben beschrieben, nur drei von vielen Attributen, die der APM vermissen lässt.

5.2 Option 2: Job Enrichment durch Assistenzgeräte

Die zweite Option beschreibt ein Szenario, dass der Herangehensweise des Werkzeugszenarios folgt. Im Mittelpunkt steht dabei die beschriebene Stärkung der Position des Mitarbeiters, ein sogenanntes Job Enrichment¹⁵³. Grundlage für das Job Enrichment ist die Implementierung von Assistenzgeräten. Die Anforderungen und Beschreibung dieser Assistenzgeräte werden im folgenden Abschnitt erläutert, anschließend wird ein Szenario mit Assistenzgeräten im betrachteten Pfannenberg-Prozess diskutiert. Darauf folgt die Einordnung des Szenarios anhand der Kennzahlen zur Effizienzverbesserung sowie in den Anforderungen an CPS.

5.2.1 Einordnung Assistenzgeräte

Bereits 1998 hat Mann die Anforderungen für „wearable computing“¹⁵⁴ in der Mensch-Maschine-Interaktion beschrieben. Mit den Eigenschaften „Unrestrictive“, „Unmonopolizing“, „Observable“, „Controllable“, „Attentive“ und „Communicative“¹⁵⁵ beschreibt Mann eben dieses Verhältnis zwischen Mensch und Assistenzgerät. „Unrestrictive“ beschreibt, dass der Mensch sich neben dem Assistenzgerät auch anderen Tätigkeiten widmen kann, da das Assistenzgerät „Unmonopolizing“ ist. Die Nutzung des Geräts steht nicht im Vordergrund, sondern wirkt unterstützend. Dabei kann der Nutzer das Gerät jederzeit nach Bedarf nutzen („Observable“) und es auch steuern („Controllable“). Darüber hinaus ist das Gerät durch seine Sensorik in der Lage, seine Umgebung wahrzunehmen und dies dem Nutzer mitzuteilen („Attentive“). Mit „Communicative“ wird beschrieben, dass der Nutzer das Gerät als Kommunikationsmedium verwenden kann. Zusätzlich zu den beschriebenen sechs Attributen fordert Mann von den Assistenzgeräten, dass sie kontinuierlich bereit sind, vom Nutzer verwendet zu werden und mit diesem zu einer Einheit zu werden.¹⁵⁶ Aehnelt geht noch einen Schritt weiter und fordert von der „durchgängigen Informationsassistentz“,¹⁵⁷ dass diese die Sensorik auch dazu nutzt, Daten zu sammeln, um die Assistenz zu verbessern.¹⁵⁸ Diese Adaptivität geht über die von Mann beschrie-

¹⁵³ Anmerkung: Zu Job Enrichment siehe Peters, 2011, S. 97ff.

¹⁵⁴ Mann, 1998, S. 1

¹⁵⁵ Mann, 1998, S. 3

¹⁵⁶ Vgl. Mann, 1998, S. 2f.

¹⁵⁷ Aehnelt, 2014, S. 2

¹⁵⁸ Vgl. Aehnelt, 2014, S. 2

bene Aufmerksamkeit („Attentive“) nochmal hinaus. Sie ist vergleichbar zu der in Zusammenhang mit den CPS beschriebenen Intelligenz (vgl. Kap. 3.2.2).

Zusammengefasst sollen die Assistenzgeräte den Nutzer in seiner primären Tätigkeit durch kontinuierliche und unauffällige Bereitschaft unterstützen, wenn er die Hilfe aktiv einfordert.

Als Anwendungsfelder für die Assistenzgeräte eignen sich insbesondere die bereits angesprochene Informationsbereitstellung und elektronische Kommunikation. Die Informationsbereitstellung ermöglicht, Fehler in Abläufen durch auftrags- und situationsabhängige Informationen zu reduzieren. Auch prozessspezifische Sicherheitshinweise können helfen, Produktivität und Qualität der Prozesse zu steigern. Dabei ist jedoch sicherzustellen, dass die Anforderungen an die Geräte auch hinsichtlich Nutzerfreundlichkeit erfüllt werden.¹⁵⁹ Die Kommunikationsfähigkeit der Geräte bietet die Möglichkeit, dass die Prozessteilnehmer sich bei Unsicherheit mit Experten oder Vorgesetzten in Verbindung setzen können und so in Echtzeit mit Informationen oder Anweisungen versorgt werden können.¹⁶⁰ Risiken bei der Implementierung von Assistenzgeräten sind die Nutzerakzeptanz generell und die Anwenderfreundlichkeit bei der Umsetzung.¹⁶¹ Darüber hinaus ist die Robustheit der Geräte im Industrieumfeld sicherzustellen.¹⁶²

5.2.2 Beschreibung des Szenarios

Die Implementierung von Assistenzgeräten in den Pfannenberg-Prozess zur Herstellung von Filterlüftern sieht eine Ausrüstung mit Assistenzgeräten aller am operativen Prozess beteiligten Mitarbeitern vor. Eine Übersicht ist dem Anhang beigefügt, sie zeigt die verschiedenen Prozessteilnehmer und die zugehörigen Geräte, durch blaue Symbole hervorgehoben.¹⁶³ Die Geräte werden an dieser Stelle nicht weiter differenziert, es wird vielmehr angenommen, dass die beschriebenen Anforderungen an die Geräte, bezogen auf den Anwendungsfall, erfüllt werden.

¹⁵⁹ Vgl. Bischoff, 2015, S. 90ff.

¹⁶⁰ Vgl. Seyrkammer, 2015, S. 29

¹⁶¹ Vgl. Bischoff, 2015, S. 92

¹⁶² Vgl. Seyrkammer, 2015, S. 32

¹⁶³ Vgl. Anhang 4

In diesem Szenario steht insbesondere die Kommunikationsfähigkeit im Vordergrund. Mit den Assistenzgeräten sollen die Prozessteilnehmer befähigt werden Informationen wie Fahraufträge und Materialanforderungen in Echtzeit und direkt auszutauschen, um damit eine Effizienzsteigerung herbeizuführen. Die bisherige Ansteuerung vieler Prozesse nach dem „Go-See“-Prinzip oder über das ERP-System soll so durch direkte, dezentrale Kommunikation ersetzt werden, um Verschwendung durch Wartezeit und Bestände zu reduzieren. Beispielsweise sollen die Mitarbeiter in der Spritzgussfertigung fertige Paletten direkt bei der Logistik anmelden. Diese kann je nach Priorisierung und eigener Auslastung den Abholauftrag einplanen. Wenn die Palette abgeholt wird, kann diese mit dem Assistenzgerät direkt verbucht, abgeholt und anschließend eingelagert werden. Die Palette wird dadurch nur noch einmal statt dreimal bewegt.¹⁶⁴ Die Prozesse für die Belieferung und Abholung an den Fertigungszellen sowie die Schäumung verlaufen analog. Wie in der Layout-Übersicht¹⁶⁵ mit den grünen Kanten verdeutlicht, sind alle Teilnehmer miteinander vernetzt bzw. dazu befähigt.

Die Ansteuerung der Produktionsprozesse in der Fertigung, Schäumung und Spritzgussfertigung soll in diesem Szenario weiter vom PPS erfolgen. Durch diese Abgrenzung soll auch hier die Umsetzbarkeit der Maßnahmen für einen Mittelständler wie Pfannenberg ermöglicht werden.

5.2.3 Darstellung der Effizienzverbesserung

Der für die weitere Bewertung des Szenarios zugrunde liegende Wertstrom ist dem Anhang beigelegt.¹⁶⁶ Das Wertstromdesign erfolgte mit Annahmen basierend auf den Ergebnissen der Wertstromanalyse des Ist-Zustands.¹⁶⁷ In den nachfolgenden Abschnitten wird das Szenario mit den Kennzahlen zur Effizienzverbesserung bewertet. Die Vorgehensweise ist die Gleiche wie beim Automatisierungsszenario.

¹⁶⁴ Vgl. Anhang E.16 und E.17

¹⁶⁵ Vgl. Anhang 4

¹⁶⁶ Vgl. Anhang E.16 und E.17

¹⁶⁷ Vgl. Anhang E.2 und E.3

5.2.3.1 Gefahrene Strecke / Kapazitätsauslastung

Im Werkzeugszenario wird der Großteil der Transporte von der Logistik durchgeführt, die Mitarbeiter in der Kunststofffertigung übernehmen lediglich den Streckenabschnitt von der Maschine zur Bereitstellungsfläche. Die Aufwände ändern sich im Vergleich zum Ist-Zustand nur marginal (vgl. Tabelle 5)¹⁶⁸, da die Abläufe kaum geändert wurden und nicht wie im Automatisierungsszenario eine Maschine einen Teil der Transporte übernimmt.¹⁶⁹

Tabelle 5 - Gefahrene Strecke / Kapazitätsauslastung Werkzeugszenario; eigene Darstellung

Gefahrene Strecke	IST	Best	Worst 2	Worst 3
Logistik [zp]/Schicht	5,683	5,797	6,283	4,490
Kunststoff [zp]/Schicht	0,916	0,193	0,193	0,193
APM [zp]/Schicht	-	-	-	-
Fertigung [zp]/Schicht	-	-	-	-
Mensch [zp]/Schicht	6,60	5,99	6,48	4,68
Maschine [zp]/Schicht	-	-	-	-
Gesparte [zp]/Schicht		0,61	0,12	1,92
Gesparte [zp]/Monat		38,81	19,36	91,09

Die eingesparte Zeit resultiert aus der angestrebten Befähigung der Mitarbeiter, dem sogenannten Job-Enrichment. Durch die Assistenzgeräte ist anzunehmen, dass der Buchungsprozess stark verkürzt werden kann. Die betroffenen Mitarbeiter gehen nicht mehr in das Büro des Schichtleiters und setzen sich dort an einen Computer, sondern können die Buchung direkt an ihrem Standort durchführen.

In Tabelle 5¹⁷⁰ sind die Einsparpotenziale für den Best- und die zwei Worst-Cases abgebildet. Im Best-Case lassen sich etwas mehr als ein halber Zeitpunkt (9%) pro Schicht einsparen bzw. für andere Zwecke einsetzen. Im Worst 2-Case lassen sich lediglich knapp 0,12 Zeitpunkte (2 %) und im Worst 3-Case 1,92 Zeitpunkte (29 %) einsparen. Wie bereits im Automatisierungsszenario fallen im 3-Schicht-Szenario des Worst-Case weniger Aufwendungen pro Schicht an, da mehr Wochenstunden zugrunde liegen. Dem gegenüber stehen die Mehrkosten für einen weiteren Mitarbeiter um diesen Betrag werden die Einsparungen im letzten Schritt in der Tabelle Anhang E.19 reduziert, wodurch sich für das Worst 3-Szenario Mehrkosten ergeben, während der Worst 2-Case Einsparungen prognostiziert.

¹⁶⁸ Anmerkung: Tabelle 5 ist ohne Skalierung im Anhang E.19

¹⁶⁹ Vgl. Anhang E.16 und E.17

¹⁷⁰ Vgl. Anhang E.16, E.17 und E.18

5.2.3.2 Wandlungsfähigkeit

Wie auch beim Automatisierungsszenario ist nur eine Unterscheidung in Best- und Worst-Case nötig, da die Wandlungsfähigkeit des Systems unabhängig von der Schichtanzahl betrachtet wird. Im Best-Case ist die Wandlungsfähigkeit des Systems mit Assistenzgeräten bezogen auf neue Teilnehmer, Layout und grundsätzliche Wandlungsfähigkeit sehr hoch. Bereits zu keinen oder geringen Kosten kann auf Veränderungen reagiert werden, da sich die Assistenzgeräte kombiniert mit der Flexibilität ihrer Anwender, der Mitarbeiter, schnell auf eine veränderte Situation einstellen können.

So bekommt der Mitarbeiter in der neu hinzugefügten Fertigungszelle oder auf dem neuen Stapler lediglich ein Assistenzgerät, während seine Kollegen „sich die Nummer speichern“. Das Gerät wird dem Netzwerk hinzugefügt. Im Worst-Case können zum einen die Anschaffungskosten für ein Assistenzgerät hoch sein oder die Einbindung ins Netzwerk und Programmierung des Geräts Experten erfordern, wodurch höhere Kosten entstehen können. Änderungen im Layout werden im Best-Case von den Mitarbeitern antizipiert und von den Geräten über ihre Sensorik aufgenommen und verursachen so keine neuen Kosten. Im Worst-Case können dieselben Probleme wie bei neuen Teilnehmern auftreten. Hinzu kommt, dass Änderungen im Layout die Funkverbindung, beispielsweise WLAN, einschränken kann oder dass neue Infrastruktur, wie Router, erforderlich werden. Hierfür müssen im Worst-Case Experten hinzugezogen werden. Auf Unvorhersehbarkeiten im Allgemeinen muss im Worst-Case mit der Anpassung der Software oder auch durch einen Wechsel der Assistenzgeräte reagiert werden. Daher ist die grundsätzliche Wandlungsfähigkeit im Worst-Case immer mit hohen Kosten verbunden, aber nicht unmöglich umzusetzen. Im Best-Case haben die flexiblen Mitarbeiter und Geräte genug Spielraum und Anpassungsfähigkeit, um sich auf die veränderte Situation einzustellen.

5.2.3.3 Dispositionsaufwand

Wie durch die Implementierung des APM ändert sich auch durch die Devices am Dispositionsaufwand erst einmal nichts. Die zentrale Planung bleibt bestehen, in einem nächsten Schritt können die Mitarbeiter mit ihren Assistenzgeräten Teile der Planung übernehmen. Durch die direkte Kommunikation zwischen den Prozessteilnehmern mit den Assistenzgeräten wird das PPS-System „entlastet“, beispielsweise

die Fahraufträge werden nun dezentral ausgelöst. Diese Änderung wird aber hier nicht weiter betrachtet, da sie außerhalb des definierten Spektrums der Kenngröße liegt.

5.2.3.4 Durchlaufzeit

Wie einleitend angesprochen, sollen die Mitarbeiter Materialanforderungen und Fahraufträge dezentral und direkt anstoßen und damit die bisherige Ansteuerung vieler Prozesse nach dem „Go-See“-Prinzip oder über das ERP-System ersetzen. Die dadurch entstehende höhere Frequenz im Nachrichtenaustausch ersetzt den bisherigen Prozess zur Informationsbeschaffung. Der Mitarbeiter bekommt Nachrichten direkt auf sein Assistenzgerät zugestellt und spart sich somit den Gang an den stationären Computer, an dem er das WMS auswerten und anschließend seine Auftragsliste drucken müsste. Durch den hohen Aufwand, der mit der Informationsbeschaffung verbunden ist, wird dieser Prozess nur unregelmäßig durchgeführt. Anhand der Informationsbereitstellung und -verfügbarkeit in Echtzeit über die Assistenzgeräte verringern sich unter anderem die Liegezeiten an den Übergabepunkten.¹⁷¹ Durch diese Reduzierung der Reaktionszeit (vgl. Kapitel 5.2.3.5) besteht nicht mehr die Notwendigkeit, bereits am Vortag zu kommissionieren.¹⁷² Insgesamt ergeben sich durch die Hinzunahme der Assistenzgeräte Einsparungen von 91 % im Best-Case und 20 % bzw. 79 % je nach Anzahl der dem Worst-Case zugrunde liegenden Schichten. (vgl. Tabelle 6, Anhang E.16 und E.17)¹⁷³

Tabelle 6 - Übergangszeiten Werkzeugszenario; eigene Darstellung

Ersparnis	
IST	
Best	89,95%
Worst2	11,00%
Worst3	77,37%

Die deutlich längere Übergangszeit im Worst 2-Case resultiert, wie im Automatisierungsszenario, aus der Nicht-Besetzung der Logistik in der Nachtschicht. Hier entstehen im Worst-Case Wartezeiten über 8 Stunden.¹⁷⁴

¹⁷¹ Vgl. Anhang E.16 und E.17

¹⁷² Vgl. Anhang E.16 und E.17

¹⁷³ Anmerkung: Tabelle 6 ist vollständig im Anhang E.20

¹⁷⁴ Vgl. Anhang E.16 und E.17

5.2.3.5 Flexibilität

Wie auch bei den vorausgehend diskutierten Kenngrößen im Werkzeugszenario muss bei der Reaktionszeit in Worst 2- und Worst 3-Case differenziert werden. Wie bereits beschrieben, wird im Worst 2-Case Szenario von einem 2-Schicht-Modell in der Logistik ausgegangen. Dementsprechend verlängern sich die Reaktionszeiten im Vergleich zum Worst 3-Case. (vgl. Tabelle 7)¹⁷⁵ Die 40,38 Zeitpunkte maximale Reaktionszeit setzen sich folgendermaßen zusammen: Wie im Automatisierungsszenario müssen erst Kanban, und Schäumung beliefert werden, dies nimmt jeweils 6,92 Zeitpunkte in Anspruch. Anschließend wird für 12, 69 Zeitpunkte kommissioniert und die Linie beliefert. Bevor der Mitarbeiter der Logistik die Zielpalette abholen kann, muss er noch einmal Kanban und Schäumung bedienen. In Summe vergehen somit 40,38 Zeitpunkte. Wie auch im APM Szenario, gilt für den Worst-Case, dass der Mitarbeiter die Zielpalette nicht vorher mitnehmen konnte. Die Reaktionszeit für den Kommissioniervorgang ist der höheren Priorisierung entsprechend kürzer.

Tabelle 7 - Reaktionszeiten Werkzeugszenario; eigene Darstellung

Lagerplatz	Best [zp]	Worst 2 [zp]	Worst 3 [zp]
Lager Buchen	-	40,38	594
Lager Maschine	-	40,38	594
Kommissionieren FLF	10,38	24,23	578
Min/Max	10,38	40,38	594,23

Im Best-Case liegt die Reaktionszeit zwischen 0 und 10,38 Zeitpunkten. Die 10,38 Zeitpunkte beschreiben dabei die mittlere Kommissionierzeit. Die Reaktionszeit für die Abholvorgänge ist im Best-Case dagegen 0, da die Mitarbeiter im Werkzeugszenario zum einen mit ihren Assistenzgeräten in der Lage sind, Informationen über den Arbeitsfortschritt ihrer Kollegen in Fertigung, Schäumung oder Spritzgussfertigung einzusehen, zum anderen ist vorgesehen, dass die Mitarbeiter an den Fertigungsplätzen die Logistik-Mitarbeiter sogenannte Prognosen mit dem Zeitpunkt der nächsten fertigen Palette schicken.¹⁷⁶

Wie auch im Automatisierungsszenario kann im Werkzeugszenario die Reaktionszeit gegenüber dem Ist-Zustand deutlich verkürzt werden.

¹⁷⁵ Anmerkung: Tabelle 7 ist ohne Skalierung im Anhang E.21 abgebildet

¹⁷⁶ Vgl. Anhang 8

5.2.4 Einordnung Industrie 4.0 Kontext

Das vorgestellte Werkzeugszenario, in dem die Mitarbeiter mit Assistenzgeräten ausgerüstet werden und so zu cyber-physischen Systemen werden, erfüllt die Anforderungen an die CPS sehr gut. Der Mensch verfügt bereits mit seinen Sinnesorganen über Sensorik und kann mit seiner Fähigkeit zu sprechen, sowie mit seinen Händen und Füßen die Umgebung beeinflussen; Aktorik liegt folglich vor. Was dem Menschen fehlt, um ein CPS zu werden, ist ein eingebettetes System, mit einem solchen er dahingehend kommunikationsfähig wird, dass er mit Maschinen und über Distanzen kommunizieren kann. (vgl. Abb. Abbildung 4 - Schematischer Aufbau eines CPS) Diese Kommunikationsfähigkeit erhält er mit den Assistenzgeräten.

Im beschriebenen Szenario, organisieren die Mitarbeiter die Transportprozesse dezentral. Zwar werden die Produktionsprozesse weiter zentral geplant und angestoßen, darüber hinaus steuern die Mitarbeiter die Prozesse jedoch selbst. Sie tauschen Informationen auf direktem Weg aus und geben sich so gegenseitig Aufträge. In den gegebenen Grenzen handeln sie autonom. Der Logistiker kann beispielsweise die Routenplanung ändern, wenn er merkt, dass dies erforderlich wird.

Der heterarchischen Organisation fehlen noch die Modularisierung und die Cloud-Verwaltung. Die Modularisierung soll ermöglichen, dass die Reihenfolge der Prozessschritte veränderlich wird. Dies ist jedoch im Rahmen der Filterlüfterproduktion nicht möglich. Der Filterlüfter kann nicht erst zusammengesetzt und dann nachträglich geschäumt werden. Dementsprechend ist die Individualisierung der Prozesse ebenfalls in diesem Rahmen nicht möglich. Sollen eine Modularisierung der Teilnehmer und eine Individualisierung der Prozesse erreicht werden, muss am Produktionsprozess angesetzt werden. Die Cloud-Verwaltung wurde in diesem Szenario noch nicht umfänglich betrachtet. Angesprochen wurde im Rahmen der Reaktionszeit, dass die Mitarbeiter über die Cloud den Zustand der anderen Prozessteilnehmer überblicken können und dementsprechend planen. Darüber hinaus bietet eine Cloud-Verwaltung weitere Möglichkeiten, entscheidungsunterstützende Werkzeuge bereitzustellen. Dadurch, dass in diesem Szenario die Auftragsplanung und das normative SCM, wie auch im Ist-Zustand, bei der Planung angesiedelt sind, verliert die Cloud-Verwaltung zwei ihrer Hauptaufgabenfelder.

Die Intelligenz der Prozessteilnehmer ist einerseits durch die Menschen gegeben, und andererseits durch die Assistenzgeräte auch abgebildet. Der Mensch an sich ist in der Lage, sich verändernden Umständen anzupassen, er kann neue Dinge lernen und diese anwenden. Die Kommunikationsfähigkeit besitzt der Mensch. Mit den Assistenzgeräten ist er nun auch in der Lage, nicht nur vis-a-vis zu kommunizieren, sondern auch mit Kollegen in der Nachbarhalle. Dementsprechend steht der Kooperation zwischen den Mitarbeitern nichts im Wege, gegebenenfalls müssen sie mit Anreizen extrinsisch motiviert werden.

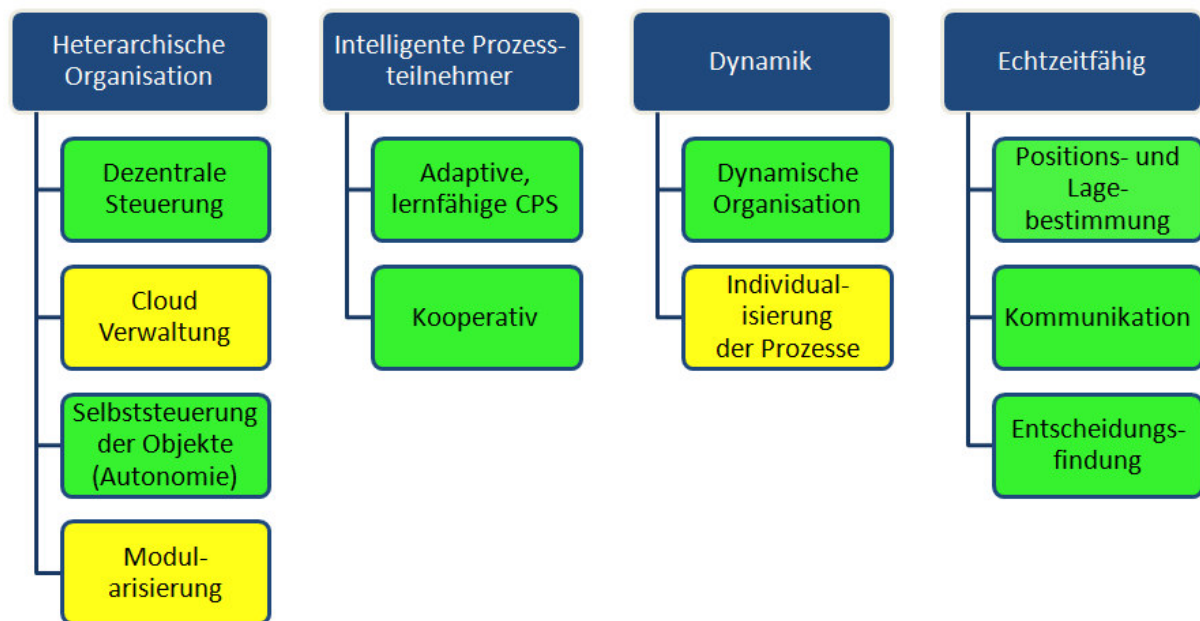


Abbildung 18 - Anforderungen CPS im Werkzeugmaschinen-Szenario; eigene Darstellung

Dass eine Individualisierung der Prozesse in diesem Rahmen nicht umsetzbar ist, wurde bereits angesprochen. Der Aspekt der Dynamik dagegen wird sehr gut umgesetzt. Auf Basis der Fähigkeiten der Selbststeuerung und der Adaptivität können die Mitarbeiter auf Störungen im Ablauf oder Neuerungen reagieren. Klemmt beispielsweise ein Rolltor, wodurch die Fertigung nicht mehr beliefert werden kann, wartet der Mitarbeiter nicht vor dem Tor, sondern er arbeitet stattdessen die Fahraufträge für die Schäumung und Spritzgussfertigung ab, bis die Störung behoben wurde. Dies muss der APM ebenfalls erkennen.

Die Echtzeitfähigkeit muss durch die Assistenzgeräte sichergestellt werden. Die Aktorik, Sensorik und Kommunikation des Menschen erfolgt bereits in Echtzeit, dies müssen die Assistenzgeräte abbilden. Unter der Prämisse, dass sie es können, ist der Mensch in der Lage die getroffenen Entscheidungen auch in Echtzeit mit den

betroffenen Kollegen zu teilen, daraus resultiert wiederum die Befähigung der angesprochenen Kollegen in Echtzeit zu reagieren. Mit der in Echtzeit stattfindenden Kommunikation ist eine Entscheidungsfindung in Echtzeit möglich. Beides ist in dem beschriebenen Szenario realistisch. Die Anforderungen an die Positions- und Lagebestimmung werden in der Literatur zumeist auf automatische Systeme wie den APM bezogen, in diesem Zusammenhang kann man sie mit der Adaptivität des Menschen verknüpfen. In dieser Kombination beschreibt es die Fähigkeit des Menschen, zu erkennen wo er sich befindet und mit seinem Assistenzgerät auch an einem ungewohnten Platz produktiv zu werden.

Bezogen auf das in Kapitel 4.2 diskutierte Zielsystem für eine Industrie 4.0-Umgebung erfüllt das beschriebene Werkzeugszenario die Grundanforderungen von Industrie 4.0. Von den Anforderungen an die CPS werden in dem Werkzeugszenario fast alle die für ein flexibles System notwendigen Bedingungen erfüllt. In den gegebenen Schranken wird durch die Befähigung der Mitarbeiter zu direkter Kommunikation die Grundlage zu weiteren Entwicklungen in Richtung Industrie 4.0 gelegt.

5.3 Option 3: Hybridszenario

In diesem dritten Szenario soll vorgestellt werden, wie zum einen Prozesse automatisiert werden und zum anderen die Position des Menschen gestärkt wird. Dabei soll ein kooperatives System mit CPS und den integrierten Mitarbeitern entstehen. Wie das Szenario aussehen kann wird im Folgenden vorgestellt, bewertet und eingeordnet.

5.3.1 Beschreibung der Option

Die im Hybridszenario angestrebte Zusammenarbeit und Aufgabenteilung von CPS und Mitarbeitern soll durch die Kombination der Szenarien eins und zwei erreicht werden. Der Auto Pallet Mover soll den Transport zwischen den Bereichen durchführen und als CPS in die Industrie 4.0-Umgebung integriert werden. Gleichzeitig sollen die Mitarbeiter durch Assistenzgeräte ebenfalls befähigt werden, wie ein CPS an der Kommunikation teilzunehmen und weiterführende Steuerungsaufgaben nach dezentralen und autonomen Prinzipien zu übernehmen. Die Abbildung des Layouts für das Hybridszenario zeigt dem folgend die Informationsflüsse zwischen den CPS und den Assistenzgeräten der Mitarbeiter sowie die Materialflüsse zwischen den Bereichen.¹⁷⁷ Wie im Automatisierungsszenario vorgestellt, verbindet der APM die Bahnhöfe in der Kunststofffertigung, dem Lager, der Fertigung und dem Warenausgang. Die anschließenden Transporte zu den Zielorten werden von den Mitarbeitern manuell durchgeführt. Dadurch, dass wie im Werkzeugszenario alle Mitarbeiter mit Assistenzgeräten ausgestattet sind und die Bahnhöfe ebenfalls als CPS umgesetzt werden, ist eine direkte Kommunikation zwischen allen Prozessteilnehmern möglich. Ein Netzwerk zur dezentralen Steuerung der Transportprozesse kann gebildet werden. Die Steuerung der Produktionsprozesse in Spritzguss, Schäumung und Fertigung wird, der Eingrenzung folgend, außer Acht gelassen. Basierend auf diesen vom PPS ausgelösten Fertigungsaufträgen geben die Mitarbeiter der Fertigung, Schäumung oder Spritzguss Materialbedarfe ans Lager weiter. Dort werden diese kommissioniert, anschließend auf den Bahnhof Lager gestellt und ein Fahrbefehl für den APM ausgelöst. Dieser transportiert die Paletten zum Zielbahnhof, wo daraufhin ein Abholauftrag an das Assistenzgerät des jeweiligen Mitarbeiters gesendet wird. Analog verläuft der

¹⁷⁷ Vgl. Anhang 5

Prozess, wenn in Schäumung, Spritzguss oder Fertigung fertige Paletten abgeholt werden sollen. Die Mitarbeiter stellen die Paletten auf den Bahnhof, lösen mit ihren Assistenzgeräten einen Fahrbefehl aus, der APM führt den Auftrag durch und der Zielbahnhof benachrichtigt anschließend den Empfänger.¹⁷⁸

Grundlage dafür ist die in den anderen beiden Szenarien jeweils beschriebene Einrichtung des APM mit der zugehörigen Infrastruktur. Diese besteht zum einen aus der Positionsbestimmung des APM über Reflektoren an den Hallenwänden und zum anderen aus den Bahnhöfen und der Ausrüstung der Mitarbeiter mit Assistenzgeräten. An dieser Stelle werden die Geräte, wie im Werkzeugszenario, noch nicht genauer definiert, da das Szenario hier nur grundsätzlich skizziert wird. Details werden dann im Rahmen der Maßnahmen in Kapitel 5.6 erarbeitet.

Außerdem müssen Softwareschnittstellen zwischen PPS, Assistenzgeräten, Bahnhöfen und APM programmiert werden. Diese werden benötigt, um einen reibungslosen Austausch von Informationen zwischen den auf unterschiedlicher Hard- und Software basierenden Systemen sicherzustellen.

5.3.2 Darstellung der Effizienzverbesserung

Im Folgenden wird das beschriebene Szenario mit den definierten Kennzahlen auf einen Effizienzverbesserung hin überprüft. Grundlage dafür sind die für das Wertstromdesign erhobenen Daten.¹⁷⁹

5.3.2.1 Gefahrene Strecke / Kapazitätsauslastung

Die Ergebnisse für die gefahrene Strecke bzw. die Kapazitätsauslastung sind vergleichbar mit denen aus dem Automatisierungsszenario, da die Abläufe gleich sind. Lediglich die Mitarbeiter in der Kunststofffertigung werden in diesem Szenario mehr entlastet, da sie mit dem Assistenzgerät weniger Zeit für den Buchungsvorgang benötigen. Da das Buchen immer im Anschluss an den Transport zum Übergabeplatz bzw. Bahnhof erfolgt, zählt dieser Vorgang mit zum hier betrachteten Aufwand.¹⁸⁰

¹⁷⁸ Vgl. Anhang E.22 und E.23

¹⁷⁹ Vgl. Anhang E.22 und E.23

¹⁸⁰ Vgl. Anhang E.24 für eine detaillierte Version und E.25 für die Tabelle 8 ohne Skalierungen

Tabelle 8 - Gefahrene Strecke / Kapazitätsauslastung Hybridszenario; eigene Darstellung

Gefahrene Strecke	IST	Best	Worst 2	Worst 3
Logistik [zp]/Schicht	5,683	2,925	4,778	3,185
Kunststoff [zp]/Schicht	0,916	0,931	0,663	0,663
APM [zp]/Schicht	-	3,301	3,301	3,301
Fertigung [zp]/Schicht	-	0,320	0,320	0,320
Mensch [zp]/Schicht	6,60	2,65	3,45	2,30
Maschine [zp]/Schicht	-	2,74	2,74	1,82
Gesparte [zp]/Schicht		3,95	3,14	4,30
Gesparte [zp]/Monat		109,43	51,39	115,09

Daraus resultieren im Best-Case Einsparungen von 60 % und im Worst 2-Case von 48 %. Im Worst 3-Case können 65 % eingespart werden, jedoch muss hier in Betracht gezogen werden, dass ein zusätzlicher Mitarbeiter eingestellt werden muss.¹⁸¹

5.3.2.2 Wandlungsfähigkeit

Die Kombination aus Assistenzgeräten und der Automatisierung des Transports eröffnet neue Möglichkeiten für die Wandlungsfähigkeit. So können im Best-Case neue Teilnehmer einfach und schnell über die Modularität der Assistenzgeräte in den Prozess aufgenommen werden. Die neue Fertigungszelle kann, mit einem Assistenzgerät ausgerüstet, ohne großen Aufwand sowohl den Bestell-Prozess auslösen als auch vom Bahnhof über ankommende Paletten informiert werden. Auf Änderungen im Layout kann dagegen auch im Best-Case auf Grund der fehlenden Flexibilität und den Schwierigkeiten mit den Anpassungen der Steuerung und den allgemeinen Einstellungen des APM, nur mit hohen Kosten eingegangen werden. Auf Unvorhersehbares im Allgemeinen kann sehr gut eingegangen werden. Durch die Flexibilität der Mitarbeiter und ihrer Assistenzgeräte ist zu erwarten, dass, anders als im Automatisierungsszenario, vergleichsweise kostengünstig reagiert werden kann.

Im Worst-Case kann, entsprechend der im Automatisierungsszenario angesprochenen Einschränkungen durch den APM, weder ein weiterer Teilnehmer integriert werden, noch auf Änderungen im Layout reagiert werden. (vgl. Kap. 5.1.2.2) Auf allgemeine Unvorhersehbarkeiten ist das System durch die Flexibilität der Mitarbeiter und deren Assistenzgeräte jedoch besser vorbereitet. Die direkte Kommunikation und die Erfahrung der Mitarbeiter auf der einen Seite und die Möglichkeit dies durch die Ge-

¹⁸¹ Anmerkung: Tabelle 8 wird ohne Skalierung im Anhang E.25 abgebildet

räte in das System einfließen zu lassen auf der anderen Seite, macht das System deutlich robuster als das weniger vernetzte Automatisierungsszenario.

5.3.2.3 Dispositionsaufwand

Für den Dispositionsaufwand gelten auch im Hybridszenario wie im Automatisierungs- und Werkzeugszenario, dass sich nichts Grundlegendes ändern wird. Durch die weiterhin zentrale Planung kann das PPS, wie im Werkzeugszenario beschrieben, durch die dezentrale Koordination der internen Transportprozesse maximal etwas entlastet werden. Dass die Planung weitgehend manuell durchgeführt wird, ändert sich jedoch nicht.

5.3.2.4 Durchlaufzeit

Durch die gleiche Prozessstruktur des Automatisierungs- und Hybridszenarios¹⁸² und den gleichen Prozesszeiten für die Best- und Worst-Cases sind die Übergangszeiten und die Ersparnisse fast gleichwertig. Der Unterschied zwischen den beiden Szenarien kommt, wie bei der gefahrenen Strecke bzw. der Kapazitätsauslastung, aus dem verkürzten Buchungsvorgang. Wie oben beschrieben, ist der Mitarbeiter deutlich schneller durch den Einsatz eines Assistenzgeräts. Durch die Assistenzgeräte verkürzen sich darüber hinaus die Reaktionszeiten, wie im nächsten Abschnitt beschrieben, wodurch auch die Übergangszeit reduziert wird.

Tabelle 9 - Übergangszeiten Hybridszenario; eigene Darstellung

Ersparnis	
IST	
Best	87,31%
Worst2	-14,50%
Worst3	54,87%

Demzufolge lässt sich, wie in Tabelle 9¹⁸³ abgebildet, die Übergangszeit um bis zu 87 % verkürzen. Auch im Worst 3-Case lassen sich Einsparungen von noch 54 % erzielen. Lediglich im Worst 2-Case nimmt die Übergangszeit durch die Liegezeiten vor und hinter dem im 2-Schicht-Betrieb arbeitenden Lager um 14 % zu.

¹⁸² Vgl. Anhang E.10 und E.11: WSD Automatisierungsszenario und Anhang E.22 und E.23: WSD Hybridszenario

¹⁸³ Anmerkung: Tabelle 9 wird ohne Skalierung im Anhang E.26 abgebildet

5.3.2.5 Flexibilität

Im Hybridszenario kommen die Vorteile von Werkzeug- und Automatisierungsszenario zusammen. Zum einen ist die Logistik durchgehend verfügbar, da der APM nicht an Schichten gebunden ist, zum anderen ermöglichen die Cloud-Services sowie die direkte Kommunikation zwischen den Prozessteilnehmern und CPS anhand der Assistenzgeräte das Reduzieren der Reaktionszeit auf 0 Minuten. Wie im Werkzeug-szenario dargestellt (vgl. Kap. 5.2.3.5) können die Mitarbeiter anhand ihrer Assistenzgeräte dem APM über Prognosen frühzeitig auf Abholaufträge oder entstehende Bedarfe hinweisen. Weiter kann der APM über die Cloud den Arbeitsfortschritt abrufen und somit seine Routen planen. Durch dieses Zusammenspiel kann die Reaktionszeit im Best-Case 0 Minuten betragen. Die Worst-Cases verhalten sich analog zu den Worst-Cases im Automatisierungsszenario. (vgl. Tabelle 10 und Kapitel 5.1.2.5)¹⁸⁴

Tabelle 10 - Reaktionszeit Hybridszenario; eigene Darstellung

Lagerplatz	Best [zp]	Worst 3 [zp]	Worst 2 [zp]
BHF KST	-	41,54	595
BHF Lager	-	20,77	575
BHF KST	-	41,54	595
BHF Lager FL	-	10,38	564
Min/Max	-	41,54	595

5.3.3 Einordnung Industrie 4.0 Kontext

Das vorgestellte Hybridszenario, die Kombination von Assistenzgeräten und einem Auto Pallet Mover, kann eine Mehrheit der Anforderungen an die cyber-physischen Systeme erfüllen. Wie bei den beiden anderen Szenarien findet auch in diesem Szenario keine ganzheitliche Betrachtung statt, da mit einem ersten Schritt Richtung Industrie 4.0 gegangen werden soll. Bezogen auf die Intralogistik kann mit der Hybrid-Lösung ein großer Schritt in die richtige Richtung gegangen werden.

Vor diesem Hintergrund werden die Anforderungen an die heterarchische Organisation zum Großteil umgesetzt. Die dezentrale Steuerung wird, wie beim Werkzeugszenario, von der Mitarbeiterbefähigung durch die Assistenzgeräte

¹⁸⁴ Anmerkung: Tabelle 10 wird ohne Skalierung in Anhang E.27 abgebildet

ermöglicht. Transportaufträge und Materialanforderungen können ohne Umweg über das ERP-System direkt ausgetauscht werden. Damit liegt eine eingeschränkte Autonomie, in der die Mitarbeiter selbstständig ihre Bestände am Arbeitsplatz oder ihre Routen planen müssen, vor. Infolgedessen, dass das Hybridszenario eine Kombination aus Werkzeug- und Automatisierungsszenario ist, sind Cloud-Verwaltung und Modularisierung genauso wenig ausgeprägt. Die Cloud erfährt lediglich dahingehend Verwendung, dass sie bei der Planung der Routen, wie für die Reaktionszeit beschrieben (vgl. Kap. 5.3.2.5), unterstützen kann. In einem nächsten Schritt in der Entwicklung der Industrie 4.0-Umwelt gelten dabei die gleichen Einsatzmöglichkeiten einer Cloud, wie im Rahmen des Werkzeugszenarios vorgestellt. (vgl. Kap. 5.2.4) Ähnliches gilt für die Modularisierung.

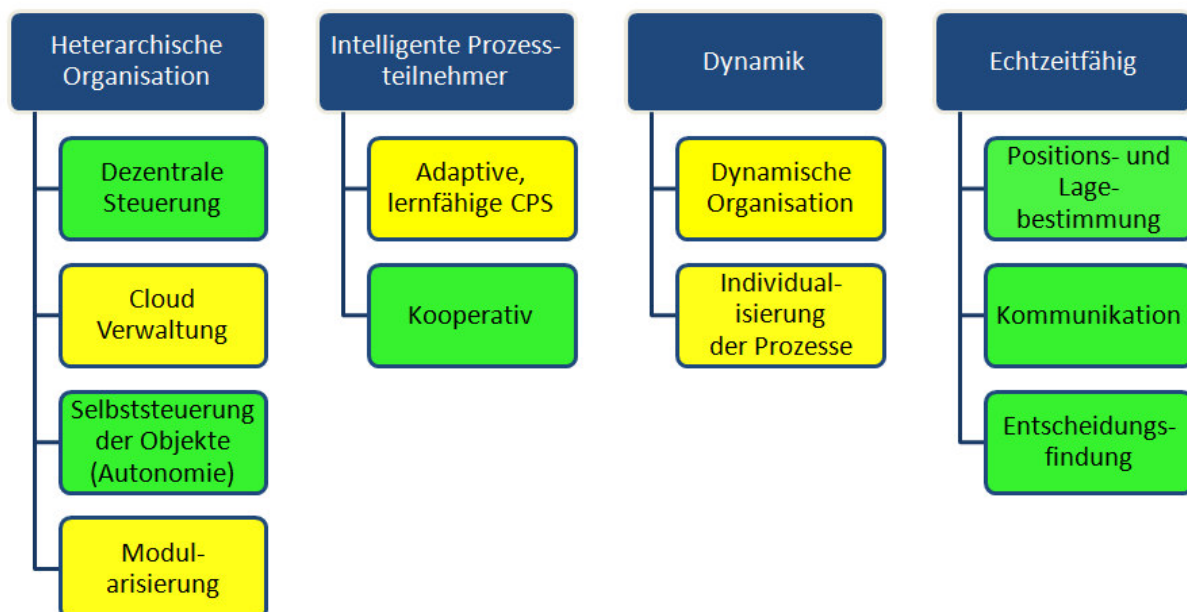


Abbildung 19 - Einordnung Hybridszenario hinsichtlich der CPS Anforderungen; eigene Darstellung

Die Intelligenz der Teilnehmer ist zwar durch die Einfachheit des APM (vgl. Kap. 5.2.4) eingeschränkt, jedoch können die Mitarbeiter durch die kooperative Steuerung des Systems Schwächen des APM auffangen. So können die Mitarbeiter beispielsweise auf ihren Assistenzgeräten eine Meldung empfangen wenn der APM sich längere Zeit nicht bewegt hat, obwohl er einen laufenden Transportauftrag hat. Durch die Möglichkeit, den APM auch manuell zu bewegen, können die Mitarbeiter ihn um Hindernisse führen oder wieder in die Lage versetzen, seinen Auftrag fortzuführen. Dadurch ist die Organisation des Systems deutlich dynamischer als im Automatisierungsszenario. Der APM ist zwar weiterhin durch seine Spurbindung unflexibel, so führt die Verknüpfung und die kooperative Kommunikation mit den Mitarbeitern dazu,

dass diese Schwächen ausgeglichen werden können.

Die Prozessindividualisierung dagegen kann nicht vorangetrieben werden, da sie wie die Modularisierung insbesondere von der Planung und den Produkten abhängig ist.

Die Echtzeitfähigkeit ist durch die Ausbreitung und Verknüpfung der CPS mit eingebetteten Systemen sehr gut umgesetzt. Die Mitarbeiter sind alle in der Lage, Entscheidungen zu treffen und diese in Echtzeit mit den Kollegen und anderen Systemen zu teilen. Zu beachten ist dabei, dass die Assistenzgeräte die in Kapitel 5.2.1 beschriebenen Anforderungen erfüllen. Die Positions- und Lagebestimmung wird analog zu den beiden anderen Szenarien erfüllt. Sie bekommt in diesem Szenario dahingehend eine große Bedeutung, dass sie für die oben beschriebene „Rettung“ des APM erforderlich ist. Nachdem der APM länger als eine definierte Zeit still steht teilt er seine Position und eine Fehlermeldung dem ihm nächsten Mitarbeiter mit. Dieser sieht mit seinem Gerät die Position des APM und behebt die Störung sofern möglich. In diesem Fall ist auch die Adaptivität der Mitarbeiter bedeutsam. Sie müssen das Problem des APM erkennen und lösen. Gegebenenfalls kann über das Assistenzgerät ein Experte kontaktiert oder über die Cloud auf Anleitungen zugegriffen werden.

Kurz zusammengefasst können durch die Kombination aus befähigten Mitarbeitern und dem APM durch gegenseitige Unterstützung der Systeme viele Anforderungen von Industrie 4.0 umgesetzt werden. Wie auch bei Werkzeugszenario erhöht Implementierung von Assistenzgeräten und eines APM das Niveau des logistischen Wissens weiter Richtung Industrie 4.0.

5.4 Vergleich der Szenarien nach Zielerreichung

Eingehend auf die Bewertung der drei Szenarien anhand der Kennzahlen zur Bestimmung der Effizienzverbesserung, werden diese nun zusammengefasst und gegenübergestellt. Dafür wurden die Kennzahlen mit ihren absoluten Werten nebeneinandergestellt, anschließend auf einer Skala von 0 bis 1 mit 0,125 Intervallen, auf die auf- bzw. abgerundet wird, skaliert, wobei der höchste absolute Wert über alle Szenarien und Cases als 1 und der niedrigste als 0 definiert wurde und daraufhin mit den Ergebnissen des paarweisen Vergleichs der Kenngrößen normiert.¹⁸⁵ Die Durchlaufzeit (DLZ) wird dementsprechend mit 40 %, die Flexibilität (FLX) mit 30 %, die Strecke (STR) mit 20 % und die Wandlungsfähigkeit (WFK) mit 10 % gewichtet.¹⁸⁶ Die anschließend gezogenen Summen sollen die Möglichkeit geben, die Szenarien zu vergleichen. Sie beschreiben keinen Umsetzungsgrad von Industrie 4.0, sondern sind nur ein Indikator für die Zielerreichung.

Tabelle 11 - Gegenüberstellung Zielerreichung; eigene Darstellung

		Werkzeugszenario			Automatisierungsszenario			Hybridszenario		
		Worst2	Worst3	Best	Worst2	Worst3	Best	Worst2	Worst3	Best
Skaliert	DLZ	0,25	0,875	1	0	0,75	1	0	0,75	1
	FLX	0	0,875	1	0	0,875	1	0	0,875	1
	STR	0,625	0	0,75	0,625	0,125	0,875	0,75	0,125	1
	WFK	0,5	0,5	1	0	0	0,875	0,125	0,125	1
Normiert	DLZ	0,1	0,35	0,4	0	0,3	0,4	0	0,3	0,4
	FLX	0	0,2625	0,3	0	0,2625	0,3	0	0,2625	0,3
	STR	0,125	0	0,15	0,125	0,025	0,175	0,15	0,025	0,2
	WFK	0,05	0,05	0,1	0	0	0,0875	0,0125	0,0125	0,1
Summe		27,50%	66,25%	95,00%	12,50%	58,75%	96,25%	16,25%	60,00%	100,00%
Mittelwert				62,92%			55,83%			58,75%

Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse. In den Zeilen werden die DLZ, die FLX, die STR und die WFK jeweils absolut, skaliert und normiert dargestellt. Der Dispositionsaufwand wird vernachlässigt, da ihm eine Gewichtung von 0 % zugeordnet wurde. (vgl. paarweiser Vergleich Kap. 4.2.3) In den Spalten werden die Szenarien in jeweils den Worst 2-, Worst 3- und Best-Case unterschieden.

Für die DLZ, die FLX und die STR wurden die in den entsprechenden Kapiteln diskutierten und errechneten Werte verwendet. Die Wert für die WFK basieren auf der Ei-

¹⁸⁵ Anmerkung: In der Tabelle 11 wurde auf die Darstellung der absoluten Werte zum Schutz der Daten verzichtet. Die vollständige Tabelle findet sich in Anhang E.28

¹⁸⁶ Vgl. Anhang 2

nordnung in die 3 Stufen „Ja, das System ist wandlungsfähig; zu geringen Kosten“ mit 0 Punkten, „Ja, das System ist wandlungsfähig; zu hohen Kosten“ mit 1 Punkt und „Nein, das System ist nicht wandlungsfähig“ mit 2 Punkten. Daraus ergeben sich beispielsweise im Worst 3-Case des Automatisierungsszenarios 6 Punkte, da alle drei Fragen mit Nein beantwortet wurden.

Die Ergebniszusammenfassung zeigt sehr deutlich, dass die drei Szenarien, trotz ihrer Unterschiedlichkeit, einen ähnlichen Effekt auf die Effizienzverbesserung haben. Bezogen auf den Mittelwert aus den beiden Worst- und dem Best-Case schneidet das Werkzeugszenario mit 62,9 % vor dem Hybridszenario mit 58,75 % und dem Automatisierungsszenario mit 55,83 % am besten ab, obwohl das Hybridszenario einen etwas besseren Best-Case vorweist. Die Best- und Worst 3-Cases aller drei Szenarien liegen nah beieinander. Die Unterschiede liegen lediglich zwischen 1,25 und 7,5 Prozentpunkten, deutlicher fallen die Unterschiede bei den Worst 2-Cases aus. Hier liegen die Unterschiede bei bis zu 15 Prozentpunkten, was dazu führt, dass aus dem Werkzeugszenario im Mittel die größte relative Effizienzverbesserung resultiert. Das Werkzeugszenario steht im Worst 2-Case für eine größere Effizienzverbesserung als die beiden anderen Szenarien, da die Übergangszeit um mehrere Stunden kürzer ist. (vgl. Anhang E.28, Zeile 1 und 9)

Zusätzlich zeigt die Auswertung den positiven Effekt der Kombination aus Assistenzgeräten und Auto Pallet Mover. Das Hybridszenario ist in jedem Bereich leicht besser oder genau so gut wie das Automatisierungsszenario, insofern sich die positiven Auswirkungen nicht bestreiten lassen. Gleichzeitig wird auch die relative negative Auswirkung des APM deutlich. Das Werkzeugszenario kann im Vergleich zum Hybridszenario mehrheitlich bessere Werte anbieten, lediglich im Worst 3- und im Best-Case Szenario der Kapazität ist es leicht schlechter. Deutlich besser als die beiden anderen Szenarien ist das Werkzeugszenario bezogen auf die Wandlungsfähigkeit. Der Unterschied beträgt bis zu 5 Prozentpunkte.

Neben der Bewertung der Szenarien anhand der Kenngrößen zur Effizienzverbesserung, wurden die Szenarien alle bezogen auf die Anforderungen an die CPS untersucht. Abbildung 20 zeigt eine Übersicht der Ergebnisse.

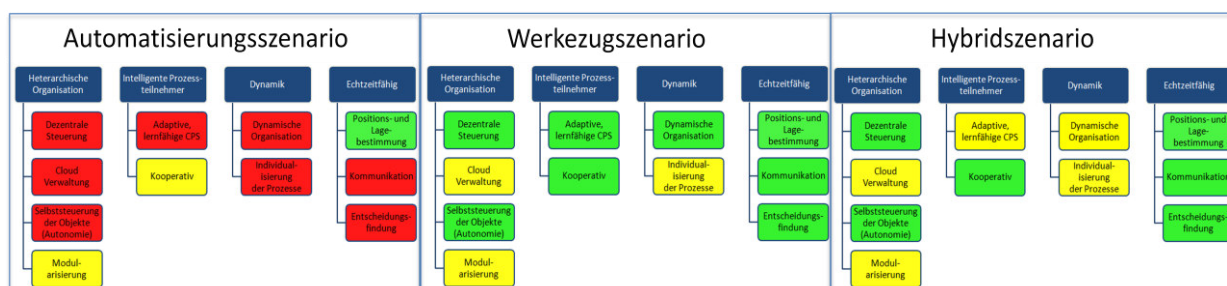


Abbildung 20 - Vergleich der Anforderungserfüllung bezüglich CPS; eigene Darstellung

Die Übersicht zeigt nochmal deutlich und auch im Vergleich, wie wenig das Automatisierungsszenario die Anforderungen an die CPS erfüllt. Werkzeug- und Hybridszenario erfüllen die Anforderungen ähnlich gut, das WerkzeugszENARIO setzt zusätzlich die Anforderungen an die Intelligenz und die Dynamik besser um.

5.5 Einordnung der Szenarien und Handlungsempfehlung

Dem Ergebnis der Effizienzanalyse und dem Vergleich der Anforderungen an die CPS in den Szenarien folgend, ist das WerkzeugszENARIO das zu empfehlende Szenario. Zwar sind Werkzeug- und Hybridszenario in ihren Bewertungen sehr ähnlich, doch lässt der APM das Pendel gegen das Hybridszenario ausschlagen. Der Auto Palett Mover bedeutet zwar eine Mitarbeiterentlastung, jedoch steht er zum einen für hohe Investitionskosten und zum anderen für sehr wenig Wandlungsfähigkeit, Dynamik und Intelligenz. Hinsichtlich der Dynamik und der Intelligenz können die mit Assistenzgeräten ausgerüsteten Mitarbeiter einige Schwächen des APM zwar ausgleichen, dennoch ist der Aspekt der fehlenden Wandlungsfähigkeit sehr kritisch zu betrachten. Die Wandlungsfähigkeit wurde in dieser Arbeit zwar nur nebensächlich betrachtet und im Vergleich mit den anderen Kenngrößen nur mit 10 % gewichtet, so darf sie jedoch nicht vernachlässigt werden. Insbesondere, da hier lediglich ein erster Schritt in Richtung Industrie 4.0 diskutiert wird, birgt die Implementierung eines Systems mit eingeschränkter Wandlungsfähigkeit Gefahren. Langfristig verfolgt Industrie 4.0 das Ziel, Fabriken flexibler, wandelbarer und agiler zu machen und dementsprechend bekommt diese Kenngröße mehr Relevanz und Gewicht im Vergleich zu den anderen Kenngrößen.

Im Zusammenhang mit der Wandlungsfähigkeit sind die Vorteile des Menschen gegenüber automatischen Systemen hervorzuheben. Post beschreibt den Vorteil des Menschen und das Verhältnis zu Maschinen folgendermaßen: „Der Mensch ist un-

wahrscheinlich flexibel und kann innerhalb kürzester Zeit eine wahnsinnige Fülle von Aufgaben beherrschen. Maschinen sind heute oftmals statisch. Die Aufgabe, für die sie ausgelegt sind, können sie gut. Aber eben nur diese eine. Und diese beiden Welten gilt es näherzubringen.“¹⁸⁷ Hier wird genau die Problematik des Automatisierungsszenario und dessen Lösung, das Hybridszenario, beschrieben. Wahlster hat einen ähnlichen Standpunkt: „Die Smart Factory wird nicht menschenleer sein, denn nach 35 Jahren Forschung im Bereich Künstliche Intelligenz ist mir klar, dass Menschen mit ihrer Alltagsintelligenz selbst gegenüber der besten Expertensoftware in Sondersituationen überlegen sind.“¹⁸⁸ Dieser Punkt gewinnt durch die Zunahme der Komplexität in der Industrie 4.0-Umwelt und der einhergehenden Abnahme der Planbarkeit stark an Bedeutung.¹⁸⁹

Post und Wahlster ordnen, wie auch die Ergebnisse der Fraunhofer IAO Studie zur Produktionsarbeit der Zukunft, die Bedeutung menschlicher Arbeit für die Produktion als wichtig bzw. sehr wichtig ein.¹⁹⁰ Gleichzeitig erwarten sie eine Zunahme der Automatisierung, wie sie der APM im Hybridszenario darstellen würde. Der Mensch würde hier an den Grenzen der Flexibilität der Maschine übernehmen, wie es auch von Spath beschrieben wird: „Die Automatisierung hat gerade in der Flexibilität ihre Grenzen. Wenn wir vollautomatisch hochflexiblen Output erzeugen wollen, überschießt die Komplexität. Das bringt hohe Investments und begrenzte Verfügbarkeit mit sich. Daher stößt die Automatisierung hier an die wirtschaftlichen Grenzen. Deshalb werden wir besser abgegrenzte, konsequent auf einen Themenbereich zugeschnittene Automatisierung mit flexibler Verknüpfung durch Menschen einsetzen.“¹⁹¹

Grundsätzlich wird also eine Entwicklung der Industrie 4.0 nach einem Hybridszenario erwartet. Bezogen auf den vorliegenden Anwendungsfall bei der Pfannenberg GmbH sollte jedoch im ersten Schritt kein automatisches System wie der Auto Palett Mover implementiert werden.

Die beschriebenen technischen und organisatorischen Einschränkungen resultieren in der Empfehlung, das Werkzeug- dem Hybridszenario vorzuziehen. Die frühe Implementierung des statischen Systems APM schränkt die Entwicklungsmöglichkeiten

¹⁸⁷ Spath, 2013, S. 53

¹⁸⁸ Spath, 2013, S. 38

¹⁸⁹ Vgl. ten Hompel, 2014, S. 619

¹⁹⁰ Vgl. Spath, 2013, S. 50

¹⁹¹ Spath, 2013, S. 53

zu sehr ein. Insbesondere, da der Betrachtungs- und Anwendungsbereich bereits stark eingeschränkt wurde. Zwar um eine schrittweise Umsetzung der Werkzeuge von Industrie 4.0 zu ermöglichen, doch wird empfohlen, sich der Industrie 4.0-Umgebung über das Werkzeugszenario zu nähern und eine Automatisierung von einfachen, physischen Prozessen in einem späteren Stadium durchzuführen. Dass dieser Schritt gegangen werden muss, zeigen Post, Wahlster und Spath von theoretischer Seite sowie in Ansätzen die erhobenen Kenngrößen. Die Automatisierung selbst ist, im Gegensatz zur heterarchischen und direkten Kommunikation, keine Voraussetzung für Industrie 4.0, wie der Vergleich der Szenarien in Abbildung 20 zeigt. Mit der Umsetzung des Werkzeugszenarios wird darüber hinaus auch das Niveau des logistischen Wissens angehoben. Durch die dynamische Organisation entwickelt sich die bestehende TUL-Logistik zu einer prozessorientierten Logistik.

Das Werkzeugszenario wird empfohlen, da es ermöglicht, die Grundlagen von Industrie 4.0 schrittweise einzuführen, ohne die weitere Entwicklung durch statische Lösungen einzuschränken.

5.6 Maßnahmen

Entgegen der in Kapitel 5.5 getroffenen Handlungsempfehlung zur Umsetzung des Werkzeugszenarios, haben sich die Projektpartner der Pfannenberg GmbH und der Jungheinrich AG für das Hybridszenario entschieden. Gründe dafür sind zum einen unternehmenspolitischer Natur und zum anderen eine andere Einordnung der Szenarien. Darüber hinaus ist der Forschungscharakter des Projekts zu beachten. Eine in den (Industrie 4.0-) Kinderschuhen steckende Technologie kann im Anwendungsfall ungeahnte Potenziale entwickeln. Der Entscheidung der Projektpartner folgend, werden nun Handlungsoptionen für das Hybridszenario vorgestellt.

Basierend auf der getroffenen Handlungsempfehlung und der Beschreibung des Szenarios in Kapitel 5.3, werden in diesem Kapitel weitere erste Maßnahmen zur Präzisierung des Szenarios und als Grundlage für erste Schritte der Umsetzung vorgestellt. Die Maßnahmen werden dabei der auf den Anwendungsfall angepassten Methodik von Erlach folgend systematisiert. (vgl. Abb. 21)

Für die Produktionsstrukturierung wird noch einmal detailliert auf das Layout eingegangen. Der umgestaltete Wertstrom und die Dimensionierung der Bahnhöfe werden im Rahmen der Materialflussgestaltung vorgestellt. Insbesondere die Veränderungen im Wertstrom werden präziser, unter anderem bezogen auf die Prinzipien des Lean Managements, dargestellt.

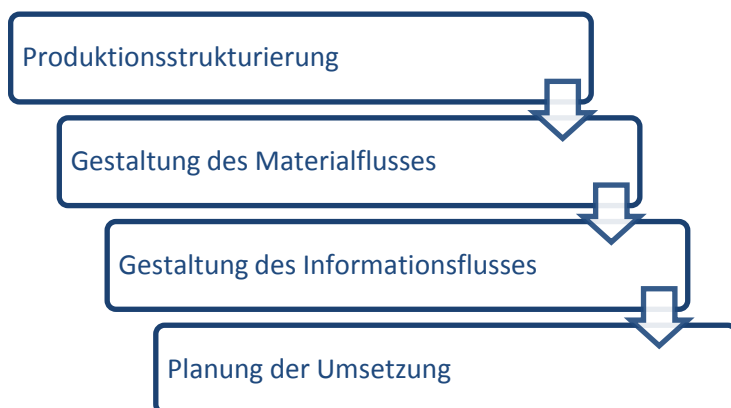


Abbildung 21 - Vorgehensweise Maßnahmenplanung; vgl. Erlach, 2010, S. 125

Zum Informationsfluss werden anschließend mehrere Diagramme mit unterschiedlichen Perspektiven und Fokussierungen vorgestellt. Außerdem wird die Nachrichtenstruktur spezifiziert. In der Planung der Umsetzung wird auf die Assistenzgeräte eingegangen. Für den Auto Pallet Mover wird auf Kapitel 5.1 verwiesen.

5.6.1 Produktionsstrukturierung

In Kapitel 5.3.1 wurde das Szenario bereits vorgestellt und die Änderungen im Layout angesprochen. In diesem Abschnitt sollen die angesprochenen Punkte präzisiert werden. Wie vorgestellt bleibt das Layout in seinen Grundzügen gleich, da auch der Prozess in seinen Grundzügen gleich geblieben ist. Es sind lediglich Schritte weggefallen und andere hinzugekommen. Dies wird im nächsten Abschnitt, Gestaltung des Materialflusses, genauer beschrieben. Durch die Implementierung des Auto Palett Movers müssen Bahnhöfe in der Kunststofffertigung, dem Lager, der Fertigung und dem Warenausgang eingerichtet werden. Zusätzlich muss vor den Bahnhöfen Platz zum Rangieren für den APM reserviert werden. Gleichzeitig werden die bisher für Übergangslager und Puffer verwendeten Flächen frei. Abbildung 22 zeigt anhand der Übersichtsskizze, wo die Bahnhöfe angeordnet werden können (rote Kästen) und wo Flächen frei werden (grün). Die Anhänge E.30, E.31, E.32 und E.33 zeigen die jeweiligen Ausschnitte maßstabsgetreu mit den Bahnhöfen und Rangierbereichen. Außerdem wird in der Abbildung 23 beispielhaft gezeigt, wie die Bahnhöfe bei Jungheinrich umgesetzt werden.

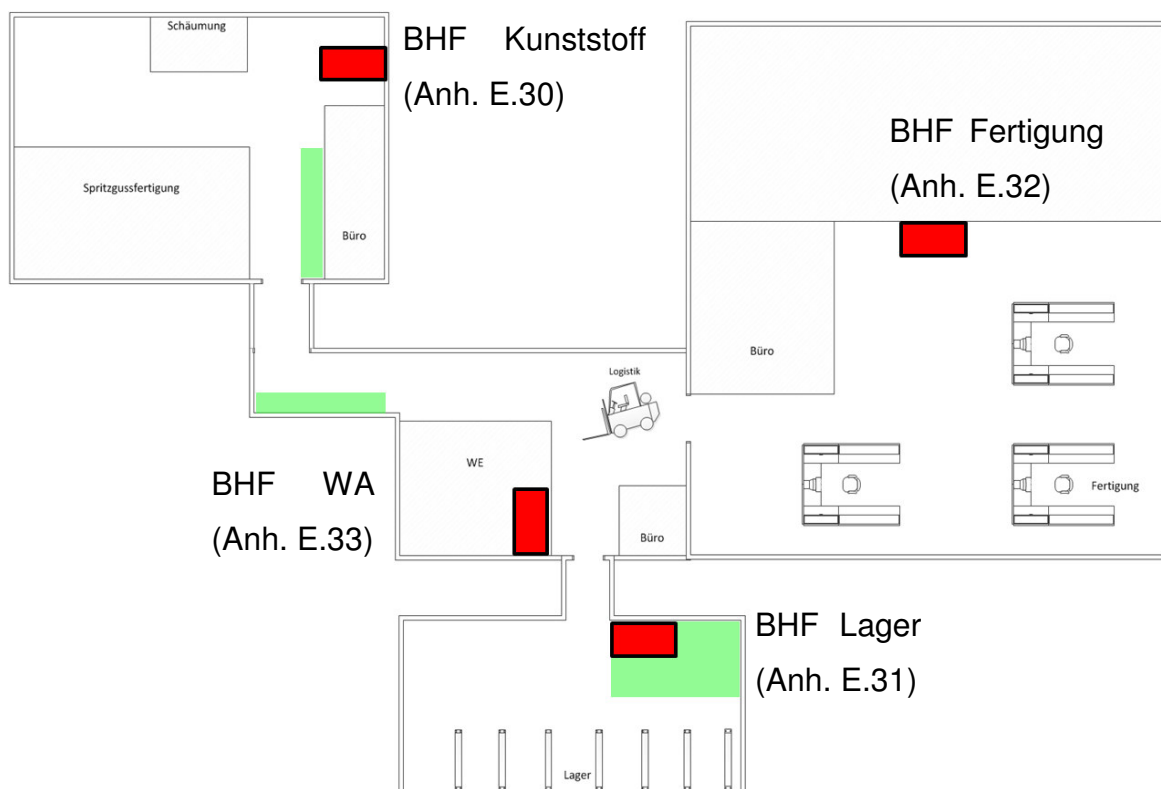


Abbildung 22 - Skizze Layout Pfannenberg mit Bahnhöfen; eigene Darstellung

5.6.2 Gestaltung des Materialflusses

Die Dimensionierung der Bahnhöfe erfolgt, wie die Berechnung der Strecke (vgl. Kap. 4.3.1), auf Basis des Fertigungsprogramms mit dem zugehörigen Materialverbrauch und dem Auftragsvolumen von 2015. Die Volumina wurden dafür über das Jahr auf Monatsbasis gemittelt und in Paletten umgerechnet. Anschließend werden die Volumina auf die Relationen allokiert. Auf der Relation Spritzguss -> Lager werden im Monat 442¹⁹² Paletten transportiert, vom Lager zur Schäumung werden 196 Paletten befördert. Dadurch, dass die geschäumten Deckel in den Kartons liegen müssen, passen weniger Deckel in einen Karton und damit auf eine Palette. Dementsprechend werden von der Schäumung 267 Paletten ins Lager gebracht. Vom Lager in die Fertigung werden 349 Paletten und von der Fertigung in den Warenausgang 384 Paletten transportiert. Die Steigerung in der Anzahl der Paletten liegt auch hier an einer anderen Platzausnutzung und der kundenindividuellen Bestückung von Kartons und Paletten. Bezogen auf die Bahnhöfe bedeuten die dargestellten Palettenmengen, dass den Bahnhof Kunststoff 709 Paletten verlassen, während 267 ankommen. Die 709 Paletten aus dem Bahnhof Kunststoff kommen alle im Bahnhof Lager an. Gleichzeitig verlassen den Bahnhof Lager 545 Paletten. Davon gehen 349 in die Fertigung. Die Fertigung verlassen 384 Paletten, alle in Richtung Warenausgang. Diese Zahlen werden in der Tabelle 12 in der zweiten Spalte dargestellt. In den Spalten drei und vier werden die Werte auf Tagesbasis, bei 20 Werktagen pro Monat, und auf Schichtbasis, bei drei Schichten pro Tag, umgerechnet.

Tabelle 12 - Bahnhofsdimensionierung; eigene Darstellung

BHF	Anzahl Paletten / ...				Anzahl Pal. Plätze			
	Monat	Tag	Schicht	Alle x [ZP]	3-Schicht	2-Schicht	Anz Stellplätze	Breite [m]
BHF KST Outb.	709,3	35,46	11,82	46,85	2		4	2m
BHF KST Inbound	267,3	13,36	4,45	124,32	2			
BHF Lager Outb.	545,1	27,25	9,08	60,97	2	11	4 oder 25(27)	9m
BHF Lager Inb.	709,3	35,46	11,82	46,85	2	14		
BHF Fert Outb.	384,3	19,22	6,41	86,46	3		6	2m
BHF Fert inb.	349,4	17,47	5,82	95,11	3			
BHF WA inb.	384,3	19,22	6,41	86,46	20		20	7m

¹⁹² Anmerkung: Werte sind aus Datenschutz-Gründen skaliert, vgl. Anhang E.29 für die Argumentation und die Tabelle 12 mit den Originalwerten

Die nächsten beiden Spalten geben an, welche Zeit zwischen der Ankunft zweier Paletten vergeht. Dabei gilt für alle Berechnungen, dass die Verteilung gleichmäßig über den ganzen Zeitraum erfolgt.

Mit dieser Basis werden in der rechten Hälfte der Tabelle die Bahnhofsgößen berechnet. Den Bahnhof Kunststoff verlässt alle 46,85 Zeitpunkte eine Palette, bei einer Reaktionszeit des APM von 41,5 Zeitpunkten im Worst-Case sind zwei Palettenplätze zu veranschlagen. Bevor nach 46,85 Zeitpunkten die nächste Palette zum Abholen bereitsteht, hat der APM sie auch im Worst-Case die erste Palette bereits abgeholt. Somit sind zwei Palettenplätze bereits eine Sicherheitslösung. Im Inbound (Ankunftsbereich) des Bahnhofs Kunststoff kommt alle 124,3 Zeitpunkte eine neue Palette an. Bei einer Zykluszeit von 0,52 Zeitpunkten und 216 Deckeln pro Palette benötigt der Mitarbeiter an der Schäummaschine alle 112 Zeitpunkte eine weitere Palette.¹⁹³ Da das Nachliefern der ersten beiden Paletten relativ hoch priorisiert ist, werden auch hier zwei Palettenplätze ausgewiesen. (vgl. Kap. 5.1.2.5) Im Bahnhof Lager kommen alle 46 Zeitpunkte eine Palette an. Die Einlagerung dauert lediglich 2,3 Zeitpunkte.¹⁹⁴ Dementsprechend sind auch hier 2 Plätze eine Sicherheitslösung. Der Bahnhof Lager wird im 60,97 Zeitpunkten-Takt von Paletten verlassen. Die Kommissionierung dauert im Worst-Case 10,38 Zeitpunkte, die Reaktionszeit des APM im Worst-Case beträgt 41,54 Zeitpunkte. Auch hier entsteht durch die Bereitstellung von zwei Palettenplätzen kein Engpass. Zu beachten ist dabei lediglich, dass wenn die Lager-Logistiker nur im 2-Schicht Betrieb arbeiten, genügend Stellplätze für in der Nacht ankommende und abgehende Paletten vorhanden sind.

Die 9,08 Paletten, die das Lager pro Schicht verlassen, müssen am Ende der zweiten Schicht bereitgestellt werden. Daher kommen zu den zwei regulären noch neun Plätze hinzu. In der Nachtschicht kommen derweil 11,82 Paletten an, was gleichbedeutend mit 12 zusätzlichen Palettenplätzen ist. Insgesamt kommt der Bahnhof Lager damit auf 25 Palettenplätze. Wie im Wertstrom-Hybrid ersichtlich,¹⁹⁵ beträgt die maximale Liegezeit einer Palette im Bahnhof Fertigung 31,15 Zeitpunkte. Da jedoch lediglich alle 94,85 Zeitpunkte eine neue Palette ankommt, reicht ein Stellplatz pro Fertigungszelle. Damit wird ein Engpass verhindert, der entsteht wenn mehrere Zel-

¹⁹³ Vgl. Anhang E.22 und E.23

¹⁹⁴ Vgl. Anhang E.22 und E.23

¹⁹⁵ Vgl. Anhang E.22 und E.23

len gleichzeitig bestellen, aber nicht direkt abholen. Nach diesem Prinzip wird auch der Teil des Bahnhofes für die abgehenden Paletten dimensioniert. Alle 86,53 Zeitpunkte wird eine Palette fertig, der APM ist spätestens nach 41,54 Zeitpunkten bereit abzuholen, dennoch werden drei Palettenplätze für den Fall, dass alle drei Fertigungszellen gleichzeitig fertig werden, veranschlagt. Der Bahnhof Warenausgang wird mit dem Tagesmaximum von 19,22 -> 20 Plätzen dimensioniert, da der Werksverkehr nach Bedarf auch mehrmals am Tag fährt, der Spediteur zum Kunden kommt jedoch nur einmal täglich. Daher wird so die Möglichkeit des engpasslosen Zwischenlagerns gegeben.

In der letzten Spalte werden die Anzahl Stellplätze in Breite [m] umgerechnet. Grundlage für diese Umrechnung ist die Auslegung des Bahnhofes. Die Verwendung des im Automatisierungsszenario beschriebenen APM, dem ERC 215a, einem Hochhubwagen, ermöglicht ein Lager mit drei Etagen. Bei einer Palettenbreite von 80 cm und jeweils 10 cm Spielraum auf beiden Seiten benötigt ein Stellplatz 1 m.

Für den Bahnhof Kunststoff wird ein 2x2 (2 Plätze hoch, 2 Plätze breit) Lager empfohlen, für den Bahnhof Lager ein 3x9 und für den Bahnhof Fertigung ein 3x2 Lager. Das Lager Warenausgang kann als 3x7 oder 1x20 Lager umgesetzt werden. Im 1x20 Szenario ist keine Infrastruktur in Form eines Regals nötig, da es als Blocklager umgesetzt wird.

Allgemein ist für die Dimensionierung der Bahnhöfe eine Simulation mit Berücksichtigung der tatsächlichen Verteilung der Palettenaufkommen. Ziel der vorgenommenen Berechnungen war es, einen ersten Hinweis für die Größe der Bahnhöfe zu bekommen, um eine Einordnung ins Layout vornehmen zu können.



Abbildung 23 - 2x3 Bahnhof bei der JH AG; eigene Darstellung

Die Bahnhöfe beschreiben die größte Veränderung im Wertstrom. Sie unterteilen die Transportprozesse in Bereitstellung durch Mitarbeiter, den automatischen Transport durch den APM und eine Abholung durch die Mitarbeiter am Zielort. (vgl. Anhang

E.22 und E.23) Durch diese Reorganisation des Prozesses, wird Verschwendung durch Transporte reduziert, da diese Prozesse nicht mehr von Menschen ausgeführt werden. Gleichzeitig entsteht jedoch Verschwendung durch das wiederholte Ansteuern der Paletten. Diese als unnötige Bewegung definierte Verschwendung wird insbesondere auf der Verbindung Schäumung Lager deutlich. Wird im Ist-Zustand die geschäumte Palette vom Mitarbeiter ins „Lager Übergabeplatz“ gestellt und dann vom Logistiker abgeholt, gleich eingelagert, so wird es im Soll-Zustand vom Mitarbeiter an der Schäumung zuerst auf den Bahnhof Kunststoff gestellt, von dort bringt der APM die Palette zum Bahnhof Lager. Hier übernimmt der Logistiker und lagert die Palette ein. Es kommen insgesamt zwei Prozessschritte hinzu. Durch die Zwischenschaltung des APM und der Bahnhöfe kommen beim Belieferungsprozess der Schäumung sogar vier Prozessschritte hinzu.¹⁹⁶ Auch hier wird zwar durch die Automatisierung Verschwendung reduziert, durch die unnötigen Bewegungen jedoch auch dieselbe erzeugt. Die Rationalisierung hoher Bestände, unnötige Bewegung und eines ineffektiven Prozesses wurden durch die Verbesserung des Buchungsprozesses erreicht. So müssen die Mitarbeiter nicht mehr umständlich im Büro des Produktionsplaners die Buchungen am stationären Rechner durchführen, sie können direkt mit ihrem Assistenzgerät die jeweiligen Teilmengen buchen. Insgesamt zeigt der Vergleich der Wertströme die Reduzierung der Durchlaufzeit durch die Reduzierung von Liege- und Reaktionszeiten deutlich. Außerdem zeigt das Wertstrom-Diagramm die veränderte Ansteuerung der Prozesse. Erfolgt im Ist-Zustand die Ansteuerung entweder über das PPS oder „Push-Go-See“-Steuerung, so werden im Soll-Zustand die Aufträge direkt zwischen den betroffenen Prozessteilnehmern ausgetauscht.¹⁹⁷ Auf die Informationsflüsse wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

¹⁹⁶ Vgl. Anhang E.22 und E.23 WSD Hybridszenario und Anhang E.2 und E.3 WSD Ist

¹⁹⁷ Vgl. Anhang E.22 und E.23 WSD Hybridszenario und Anhang E.2 und E.3 WSD Ist

5.6.3 Gestaltung des Informationsflusses

Der Informationsfluss wird anhand von drei Methoden dargestellt. In einer Übersicht mit Material- und Informationsflüssen zwischen den Bereichen¹⁹⁸, in einer prozessorientierten Sicht¹⁹⁹ und in einem EPK-Diagramm, welches die Kommunikations- und Entscheidungsprozesse zeigt.²⁰⁰

Für das EPK-Diagramm wurde der Übersicht halber eine vereinfachte Syntax und zusätzlich kleine Informationssymbole verwendet, um die Prozessschritte, an den die Assistenzgeräte aktiv genutzt werden, hervorzuheben. Das Diagramm zeigt die Entscheidungsprozesse in den verschiedenen Bereichen sowie die Kommunikationsschnittstellen. So löst beispielsweise eine neue Palette im Bahnhof Fertigung ein Signal in der Fertigung aus, woraufhin die Fertigung unterbrochen, die Palette eingelagert und anschließend die Fertigung wieder aufgenommen wird. Die Darstellung zeigt die dezentrale und kooperative Organisation des Systems sehr deutlich. Die Prozessteilnehmer führen die Planung von Transportprozessen selbstständig durch, melden Materialbedarfe autonom im Lager an und kommunizieren, wenn sich Prozesse berühren, direkt mit einander. So fragt die Schäumung, nach der Auswertung des Fertigungsauftrags in der Spritzgussfertigung an, ob die zu schäumenden Deckel gerade gespritzt werden. Sollte dies der Fall sein, wird die benötigte Menge Deckel direkt von der Spritzgussmaschine zur Schäumung gefahren. Der Prozess über das Lager kann durch diese Situationserkennung in Echtzeit und die dynamische Organisation eingespart werden. Es lässt sich daher zusammenfassen, dass die Anforderungen an Intelligenz, Dynamik, Echtzeit und Heterarchie im Szenario umgesetzt werden.

Die Kommunikationsarchitektur des wird in den beiden anderen Diagrammen übersichtlich und komprimiert dargestellt. So zeigt das prozessorientierte Diagramm, welche Teilnehmer welche Informationen bzw. Nachrichten im jeweiligen Prozess weitergeben. Zudem wird unterschieden, ob die Nachrichten manuell oder automatisch ausgelöst werden. Die Nachrichten folgen einer standardisierten Struktur, die später in diesem Abschnitt dargestellt wird.

¹⁹⁸ Vgl. Anhang 6

¹⁹⁹ Vgl. Anhang 7

²⁰⁰ Vgl. Anhang 8

Es wird in die Prozesse Spritzguss, Schäumung (Beschaffung), Schäumung (Versand), Fertigung (Beschaffung) und Fertigung (Versand) differenziert. So zeigt der Prozess Spritzguss beispielsweise, mit welchen Nachrichten die Prozessteilnehmer kommunizieren, wenn ausgelöst vom PPS, Teile gespritzt, transportiert und eingelagert werden. So schickt der Mitarbeiter in der Spritzgussfertigung dem APM eine Prognose über den zu erwartenden Termin der Fertigstellung. Nach der Fertigstellung bringt der Mitarbeiter die fertige Palette auf den Bahnhof Kunststoff und führt eine Zielbuchung durch. Diese führt er auf Basis des Informationsaustauschs zwischen den Bahnhöfen über freie Gleise (Palettenplätze) und den Daten aus dem Fertigungsauftrag durch. Der APM benötigt eine genaue Angabe, wohin er die Palette bringen soll, er kann sich nicht spontan vor dem Bahnhof für einen freien Stellplatz entscheiden. In der Zielbuchung gibt der Mitarbeiter neben dem Stellplatz auch den „Endkunden“ der Lieferung an, hier den Lagermitarbeiter. Der Bahnhof Kunststoff generiert nun einen Abholauftrag an den APM und schickt gleichzeitig die Fahrauftragsdaten an den Zielbahnhof, den Bahnhof Lager. So bekommt der APM nur die Informationen, die er tatsächlich benötigt. Nachdem der APM den Transport durchgeführt hat, meldet er den Auftrag dem Bahnhof Lager als erfüllt. Dies löst dann automatisch einen Abholauftrag auf dem Assistenzgerät des Mitarbeiters im Lager aus.

Der beschriebene Nachrichten-Prozess erfolgt angepasst, aber ebenfalls nach dem gleichen Prinzip bei den anderen Materialflüssen. Dies zeigt auch der Vergleich der Ablaufdiagramme.²⁰¹

²⁰¹ Vgl. Anhang 7

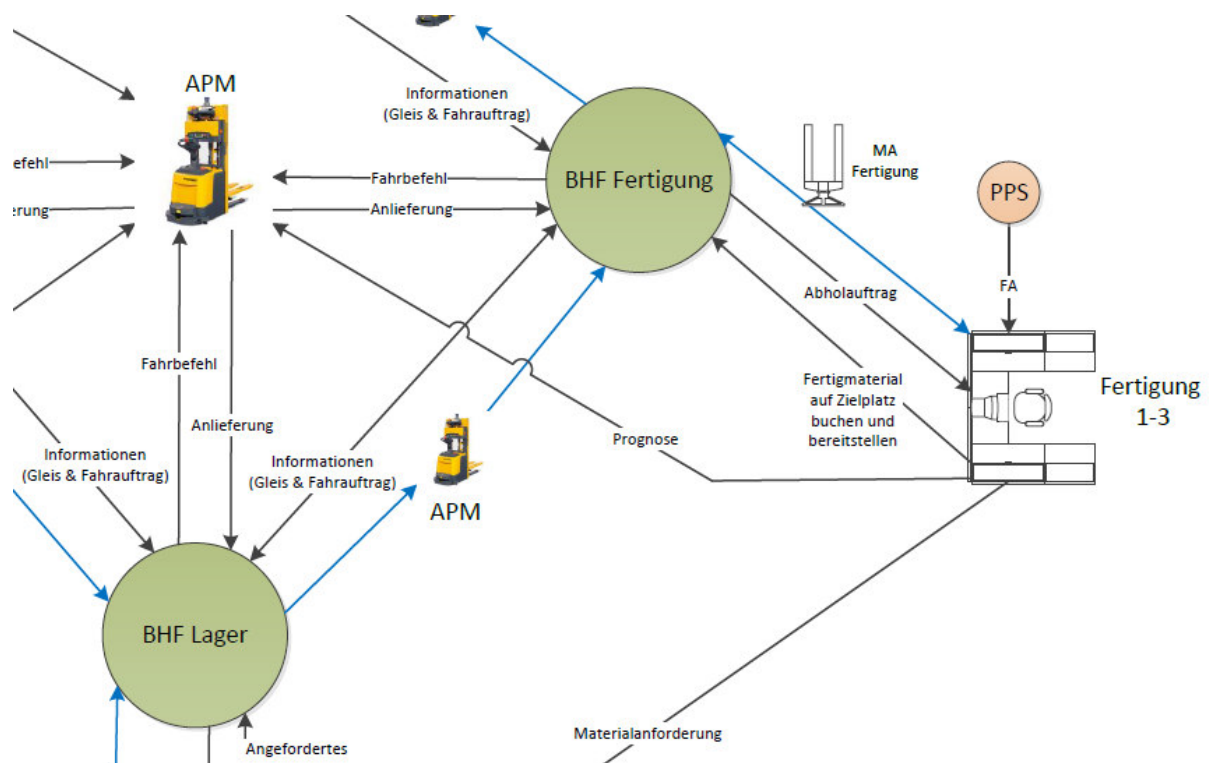


Abbildung 24 - Ausschnitt Übersicht Material- und Nachrichtenflüsse Hybridszenario; eigene Darstellung, Bildquelle APM: Jungheinrich, 2016a

Der Anhang 6 zeigt eine ganzheitliche Übersicht über die Nachrichtenströme zwischen den Prozessteilnehmern. Abbildung 24 zeigt einen Ausschnitt der Übersicht. Mit den blauen gerichteten Kanten werden die Materialbewegungen und die dazugehörigen Ressourcen gezeigt. Für die Nachrichten werden die schwarzen gerichteten Kanten verwendet. Es wird dabei dieselbe Nomenklatur wie in der prozessorientierten Darstellung angewendet. Die grünen Kreise verbildlichen die CPS, für den APM und die Fertigung wurden Skizzen gewählt, eine Abstufung findet nicht statt. Ziel der Darstellung ist eine übersichtliche Abbildung der dezentralen Kommunikationsorganisation. Das Diagramm soll die Zusammenhänge und die Kommunikationswege zwischen den CPS zeigen.

Ein wichtiger Teil der Übersichtlichkeit der Darstellung ist die einheitliche Nomenklatur der Nachrichten, die zwischen den CPS versendet werden. Darüber hilft diese Einheitlichkeit den Mitarbeitern bei der Arbeit mit den Assistenzgeräten. Die Nachrichten sind einheitlich und klar definiert. Sie gelten zudem für alle Bereiche und stehen so einer Job-Rotation²⁰² der Mitarbeiter nicht im Weg.

²⁰² Anmerkung: Job-Rotation beschreibt das Prinzip, bei dem die Mitarbeiter nach einem festen Zyklus die Arbeitsplätze innerhalb des Unternehmens wechseln.

Die nachfolgende Tabelle 13 zeigt die verwendeten Nachrichten und über die Spalten die verschiedenen Informationen. Als relevante Informationen wurden der Artikel, die Anzahl der Teile pro Ladungsträger, der Termin, der Zielort, der Abholort, die Anzahl Paletten und das Zielgleis ausgemacht.

Tabelle 13 - Inhaltsangabe Nachrichten; eigene Darstellung

Nachricht	Artikel	Anz. Teile / Ladungs- träger	Termin	Zielort	Abholort	Anzahl Paletten	Ziel Gleis
FA	X	X	X				
Material Anforderung	X	X	X	X			
Prognose			X		X	X	
Zielbuchung	X	X	X	X	X	X	X
Abholauftrag	X			X	X	X	
Fahrbehl			X		X	X	X
Anlieferung						X	X
Fahrauftragsdaten	X			X		X	X
Freie Gleise							X

Die Zuordnung der Informationen erfolgt der Devise, ein Minimum an Informationen zu verschicken. Lediglich Relevantes soll weitergegeben werden, zum einen um Verschwendung zu vermeiden und zum anderen da die Assistenzgeräte nur beschränkte Möglichkeiten der Anzeige vorweisen.

Der Fertigungsauftrag (FA) beinhaltet das zu produzierende Teil, die Anzahl und den Termin, an dem es fertig sein soll. Die Materialanforderung gibt Artikel und Anzahl weiter, der Termin ist hier jedoch der Fertigungsstart und der Zielort die jeweilige Maschine bzw. Arbeitsplatz. Bei der Prognose teilt der Mitarbeiter dem APM mit, wie viele Paletten zu einem bestimmten Termin an einem Abholort, einem der Bahnhöfe, bereit liegen. Bei der Zielbuchung gibt der Mitarbeiter alle Informationen ein, insbesondere, da hier eine Schnittstelle zum ERP-System vorliegt.²⁰³ Der Abholauftrag wird automatisch nach der Anlieferung auf einem Bahnhof erzeugt. Er teilt dem den Mitarbeiter am Zielort den Abholort und wie viele Paletten von einem Artikel bereit liegen. Der Fahrbehl wird ebenfalls vom Bahnhof generiert. Hier wird jedoch der APM über den Termin, an dem er eine bestimmte Anzahl an Paletten abholen und zum Zielgleis befördern soll, informiert. Der Termin ist dahingehend relevant, da die Paletten für die Nachtschicht bereits am Tag im Bahnhof gepuffert werden, jedoch

²⁰³ Vgl. Anhang 7

erst nach Bedarf ausgeliefert werden sollen. Bei der Anlieferung teilt der APM dem Bahnhof den durchgeführten Transport durch die Anzahl Paletten und das Ziel Gleis mit. Gekoppelt mit den Informationen, die direkt von Bahnhof zu Bahnhof ausgetauscht werden, den Fahrauftragsdaten, hat der empfangende Bahnhof alle benötigten Informationen um den Mitarbeiter am Zielort zu informieren. Über die Nachricht Freie Gleise tauschen die Bahnhöfe untereinander die freien Stellplätze in den jeweiligen Regalen aus. Wie bereits beschrieben, wird diese Information zur Vergebung von Fahrbefehlen an den APM benötigt.

5.6.4 Planung der Umsetzung

Für die beschriebene Dezentralisierung und die Veränderung der Kommunikationsstruktur sind die Assistenzgeräte elementar. Sie werden, wie in Kapitel 5.2 beschrieben, benötigt, um die Mitarbeiter zu einem cyber-physischen System zu entwickeln. In diesem Abschnitt sollen aus dem vorangehend beschriebenen Szenario der Handlungsempfehlung Anforderungen an die Assistenzgeräte entwickelt werden. Darauf aufbauend wird eine erste Tendenz für eine Empfehlung bezüglich der Geräte gegeben.

Aus der heterarchischen Organisation und der kooperativen Herangehensweise der CPS an die individuellen Ziele und Aufgaben lässt sich die Anforderung der Kommunikationsfähigkeit ableiten. Die Mitarbeiter müssen durch ihre Geräte in die Lage versetzt werden die im vorherigen Kapitel beschriebenen Nachrichten zu empfangen und zu senden. Zum einen ist daher eine Anbindung an ein Netzwerk, z.B. WLAN, notwendig und zum anderen müssen die Geräte die Nachrichten dem Mitarbeiter beispielsweise über Anzeigen oder Audio zugänglich machen. Zudem müssen die Mitarbeiter in der Lage sein, die erforderlichen Eingaben zu tätigen. Dies kann über Touch-Displays oder Spracheingabe erfolgen. Dabei ist zu beachten, dass die Mitarbeiter mit den Informationen arbeiten können müssen. So sollen Auftragslisten nicht nur angezeigt werden, sondern auch in ihrer Reihenfolge veränderbar sein. Das Gerät darf keine starre Anzeige, vielmehr muss es ein flexibles Werkzeug sein.

Um die Eingabe von Materialbedarfen fehlerfrei zu gestalten sind Scanner-Funktionen sehr vorteilhaft. Insbesondere für das zügige Melden eines Kanban-Bedarf ist eine schnelle und unkomplizierte Informationsübermittlung erforderlich. Es ist anzustreben, dass der Mitarbeiter die Kanban-Karte scannt und damit im Lager

einen Kommissionierauftrag auslöst. Die Assistenzgeräte sollten in der Lage zu sein, Bar-Codes zu lesen.

Die Kommunikationsfähigkeit soll sich nicht nur auf das Netzwerk beschränken. Es ist vielmehr erforderlich, dass die Geräte auf Daten in der Cloud zugreifen und diese nutzen und anzeigen können, wie beispielsweise Prioritätenlisten und Soll-Zeiten.

Mit Assistenzgeräten ausgerüstet werden müssen die Mitarbeiter an der Schäummaschine um Materialanforderungen und Prognosen zu verschicken sowie Rückmeldungen, Fertigungs- und Abholaufträge zu empfangen. Zusätzlich müssen am Bahnhof Zielbuchungen durchgeführt werden. Die Mitarbeiter in der Spritzgussfertigung müssen dieselben Nachrichten wie die Mitarbeiter in der Schäumung verschicken und empfangen. Anstelle der Materialanforderungen müssen sie lediglich Rückmeldungen verschicken. Die Rückmeldung ist in Tabelle 13 nicht aufgeführt, da sie eine einfache Bestätigung oder Ablehnung der Materialanforderung von der Schäumung beschreibt. Die Mitarbeiter der Fertigung müssen wie die Mitarbeiter der Schäumung Fertigungsaufträge und Abholaufträge empfangen sowie Materialanforderungen und Prognosen versenden. Zudem müssen sie Zielbuchungen am Bahnhof durchführen. Die Mitarbeiter im Lager verschicken keine Nachrichten, sie empfangen lediglich Materialanforderungen und Abholaufträge. Außerdem müssen sie, wie die anderen Mitarbeiter auch, Zielbuchungen am Bahnhof durchführen. An den Bahnhöfen werden neben den manuell versendeten Zielbuchungen auch automatische Nachrichten generiert. Die Bahnhöfe senden auf Basis der empfangenen Zielbuchung und Anlieferung Abhol- und Fahraufträge. Außerdem senden und empfangen sie Informationen über volle und leere Stellplätze. Der Auto Palett Mover empfängt Prognosen und Fahraufträge zur Routenplanung und versendet Anlieferungen, nachdem er einen Transport durchgeführt hat.

Abbildung 25 zeigt eine erste Zuordnung von Assistenzgeräten für die jeweiligen Bereiche. Die Mitarbeiter an der Schäumung, Spritzguss und Fertigung erhalten Smart-Watches, an den Bahnhöfen werden Datenfunkterminals und Blitzleuchten installiert, der APM und der Stapler des Lagermitarbeiters bekommen ebenfalls Datenfunkterminals, zudem bekommt der Lagermitarbeiter noch ein Head Mounted Display.

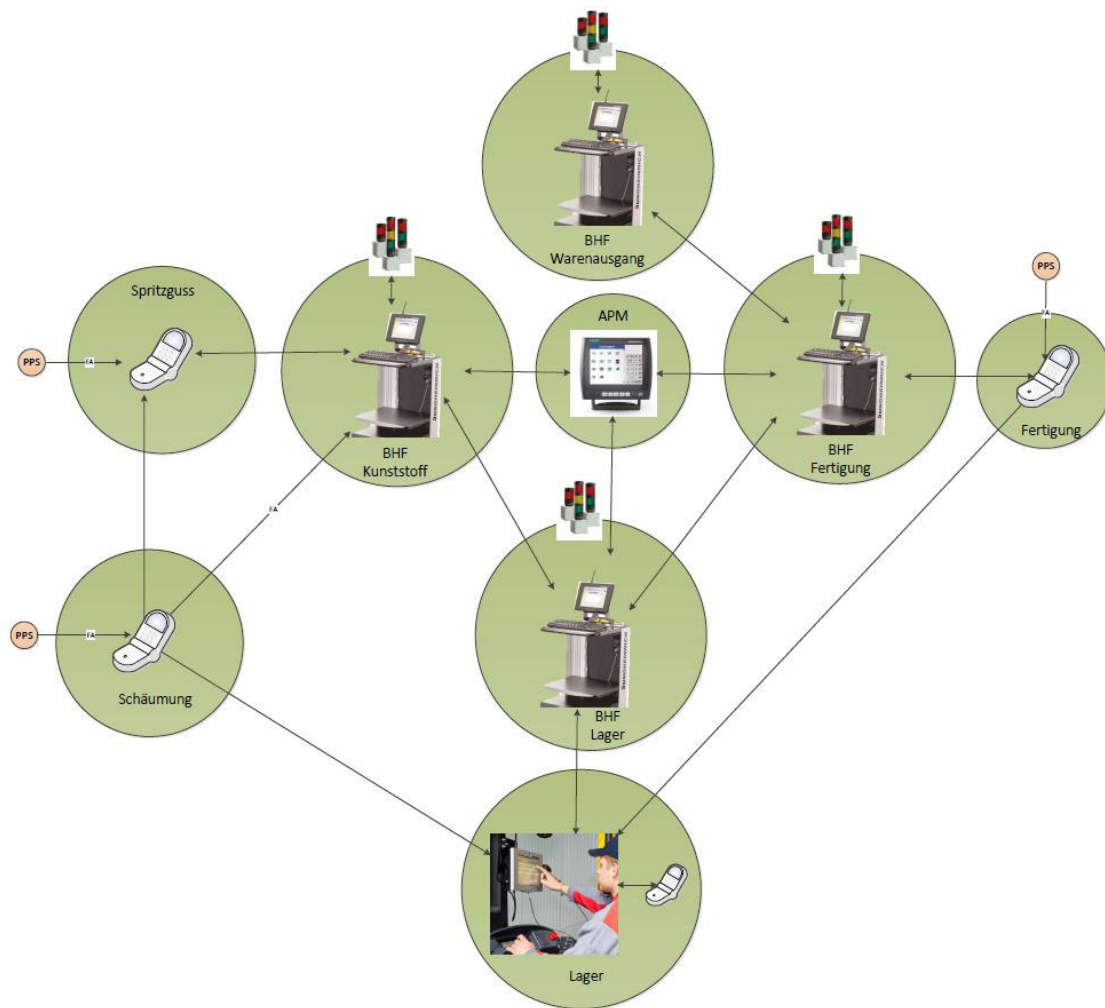


Abbildung 25 - Kommunikationsarchitektur mit Assistenzgeräten; eigene Darstellung,
 Bildquellen: DFT: JH 2016b s.10; DFT im Fahrzeug: Jungheinrich 2016c;
 Anmerkung: Assistenzgeräte werden symbolisiert durch das Mobiltelefon

Die Zuordnung basiert auf den oben beschriebenen Anforderungen von Seiten des Prozesses und den Anforderungen an die Assistenzgeräte, beschrieben in Kapitel 5.2.1. Die Smart-Watches bieten die Möglichkeit, auf einem Display Eingaben zu tätigen und Nachrichten zu lesen. Darüber hinaus könne sie über Bluetooth oder WLAN verbunden werden. Zudem sind Smart-Watches mit Kameras verfügbar, wodurch sie Barcodes lesen können. Die Pearl SimValley AW-414.Go²⁰⁴ beispielsweise verfügt über eine Mobilfunk und WLAN Schnittstelle, Kamera und ein 1,5“ Display. Über das Mikrofon ist eine Spracheingabe möglich, mit dem Vibrationsalarm und dem Lautsprecher kann die Uhr dazu den Nutzer auf sich aufmerksam machen.²⁰⁵ Die Uhren sind im Gegensatz zu Tablets zu empfehlen, da sie die Anforderung, den

²⁰⁴ Anmerkung: Die genannte Smart-Watch ist lediglich ein Beispiel. Es wird keine Empfehlung geben.

²⁰⁵ Vgl. Chip, 2015

Nutzer in seiner primären Tätigkeit durch kontinuierliche und unauffällige Bereitschaft zu unterstützen, wenn er die Hilfe aktiv einfordert, besser erfüllen. Zwar haben Tablets durch ihre Größe bessere Ein- und Ausgabemöglichkeiten, doch ist die Größe auch gleichzeitig ein Nachteil, da das Tablet nicht am Handgelenk getragen werden kann und so die Anforderung der kontinuierlichen Bereitschaft („Observable“) nicht erfüllt.

Zwar ist bei der Nutzung von Geräten aus dem Endkundenbereich zu beachten, dass die Geräte Schwächen bei der Robustheit aufweisen, dafür sind sie im Gegensatz zu Industrielösungen auf dem neusten Stand der Technik und sind durch ihre weite Verbreitung bei den Nutzern bekannt und akzeptiert.²⁰⁶

Die Schwächen einer Smart-Watch bezüglich Eingabe von Informationen sind zweitrangig, da die anspruchsvollste Meldung, die Zielbuchung an einem Datenfunkterminal am Bahnhof erfolgt. Die Datenfunkterminals sind mit dem Netzwerk verknüpfte Geräte, die über Eingabegeräte, Tastatur, und Bildschirm verfügen. Zusätzlich können sie mit einem Drucker zum Erstellen von Labels etc. ausgerüstet werden. Zu beachten ist die eingeschränkte Mobilität des Datenfunkterminals. Im angedachten Einsatzbereich, ist Mobilität jedoch nicht erforderlich, da die Mitarbeiter zum Bahnhof kommen.



Abbildung 26 - Datenfunkterminal, Jungheinrich, 2016b, S. 10

Die Datenfunkterminals sind in der Lage die Anforderungen bezüglich der Nachrichten zu erfüllen. Zielbuchungen können durchgeführt werden, der integrierte Rechner kann automatisch Anlieferungen empfangen, Abhol- und Fahraufträge versenden sowie mit anderen Terminals Informationen austauschen. (vgl. Abb. 26)

Zusätzlich können an den Bahnhöfen Blitzleuchten der Pfannenberg GmbH installiert werden, um die Mitarbeiter auf die verschiedenen Zustände des Lagers hinzuweisen. So kann für eine angelieferte Palette eine grüne Lampe und wenn alle Stellplätze belegt sind eine rote Lampe leuchten. Zusätzlich ist die Verwendung von eigenen Produkten Identifikationsfördernd.

²⁰⁶ Vgl. Werthmann, 2014, S. 40f.

Ein weiterer Datenfunkterminal wird im Stapler des Lagerlogistikers und am APM installiert. So kann zum einen der Mitarbeiter im Lager die Materialanforderungen und Abholaufträge empfangen und bearbeiten und zum anderen können die Mitarbeiter, wenn sie den APM im manuellen Modus übernehmen, die Auftragslisten einsehen und steuern. Über den Datenfunkterminal ist die in Kapitel 5.3.3 beschriebene Entstörung des APM möglich. Einerseits kann der APM über das DFT einen Mitarbeiter alarmieren, andererseits kann der Mitarbeiter mit dem DFT zum CPS werden und so aktiv im System mitarbeiten.

Der Lagerlogistiker kann zusätzlich zum DFT noch durch ein Head Mounted Display, eine Datenbrille, unterstützt werden. Mit einer solchen Brille bleibt er mit dem DFT verknüpft, auch wenn er den Stapler verlässt; beispielsweise um Artikel per Hand zu kommissionieren. Mit der Brille können dem Mitarbeiter Informationen wie Kommissionierlisten oder Artikelstandorte im Sichtfeld eingeblendet werden.²⁰⁷ Weiter kann der Mitarbeiter mit der Datenbrille fotografieren, also Barcodes scannen, und über die Internetverbindung kommunizieren.²⁰⁸ Der Vorteil der Datenbrillen ist, dass sie die Anforderungen an die Assistenzgeräte voll erfüllen. Sie unterstützen den Mitarbeiter, ohne ihn von seiner primären Tätigkeit abzuhalten.

Die Smart-Watches, Datenfunkterminals und die Datenbrille sollen eine erste Tendenz für die Auswahl der Assistenzgeräte geben. In der Umsetzung müssen für die definierten Anforderungen an die Geräte passende Objekte auf dem Markt gefunden werden. Ziel dieser Ausführung ist es die Anforderungen an die Objekte von Seiten des Prozesses zu verdeutlichen.

²⁰⁷ Vgl. Ulrich, 2014, S. 24

²⁰⁸ Vgl. Seyrkammer, 2015, S. 20

5.7 Thematische Zusammenfassung

Nachdem eine Handlungsempfehlung gegeben und Maßnahmen definiert wurden, sollen abschließend in diesem Kapitel die eingangs gestellten Fragen beantwortet werden. Dazu werden die erarbeiteten Ergebnisse kurz zusammengefasst.

- Wie komme ich von der Industrie 3.0 zur Industrie 4.0?

Eine Industrie 4.0-Umwelt zu schaffen erfordert eine Weiterentwicklung des Niveaus des logistischen Wissens. Es wird ein ganzheitlicher Ansatz benötigt, um die Anforderungen an die CPS umzusetzen. Heterarchie, Intelligenz, Dynamik und Echtzeitfähigkeit müssen von Unternehmensseite implementiert werden, um mit der zunehmenden Komplexität des Marktes umgehen zu können. Eine zunehmende Automatisierung der Prozesse spiegelt den Ansatz von Industrie 4.0 dabei nicht wider, vielmehr wird eine heterarchische Organisation mit kooperativer und direkter Kommunikation angestrebt.

- Was sind die Anforderungen an die CPS?

Die Anforderungen an die CPS sind Heterarchie, Intelligenz, Dynamik und Echtzeitfähigkeit. Mit diesen Fähigkeiten können die CPS im System agil auf Kundenanfragen reagieren. Während die Heterarchie vom Management umgesetzt werden muss, indem es die Hierarchisierung auflöst und die Prozessteilnehmern autonom handeln lässt, sind bei der Intelligenz und der Dynamik auch die Anbieter von Intralogistiklösungen gefragt. Produkte wie der APM sind erst Industrie 4.0-tauglich, wenn sie sich auf veränderliche Umgebungen selbstständig einstellen können. Bis die Automatisierungstechnik diese Flexibilität und Intelligenz kostengünstig abbilden kann, ist der Mensch mit einem Assistenzgerät eine sehr mächtige Übergangslösung.

- Welche Entwicklungspotenziale können realisiert werden?

Wie die Auswertung der Szenarien gezeigt hat, kann bereits durch die Implementierung erster Industrie 4.0-Technologie die Durchlaufzeit deutlich reduziert werden. Durch die Möglichkeit der direkten Kommunikation zwischen den Prozessteilnehmern können Warte- und Liegezeiten deutlich reduziert werden. Werden die Prinzipien der heterarchischen Organisation umgesetzt, entfällt der Bedarf einer zentralen Planung, da die CPS sich selbst organisieren. Damit steigt zwar der Aufwand an organisatori-

scher Arbeit bei den einzelnen CPS, jedoch können gleichzeitig bei den physischen Arbeiten Kapazitäten durch Synergieeffekte und bessere Koordination eingespart werden. Weitere Entwicklungspotenziale ergeben sich durch eine Steigerung der Flexibilität und der Wandelungsfähigkeit. Durch die Fähigkeit schnell und flexibel auf Kundenanforderungen reagieren zu können, entsteht ein höherer Servicegrad und damit ein Wettbewerbsvorteil.

- Welche konkreten Handlungsoptionen (Maßnahmen) können ergriffen werden?

Welche Handlungsoptionen ergriffen werden können, hängt von der Entwicklungstendenz und der Entscheidung Mensch oder Maschine ab. Je nachdem, ob eine Automatisierung oder ein Job-Enrichment angestrebt wird, bieten sich unterschiedliche Technologien an. Dabei ist auch ein Mittelweg, eine Hybridlösung, möglich. Konkrete Maßnahmen stellen beispielsweise die Implementierung von Assistenzgeräten oder automatischen Transportlösungen dar.

Literaturverzeichnis

- (Acatech, 2011) Acatech (Hrsg.): Cyber-Physical Systems. Innovationsmotor für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion (acatech POSITION), Heidelberg (Springer), 2011
- (Aehnelt, 2014) Aehnelt, Mario; Bader, Sebastian: Mobile Informationsassistenten für die Montage, in: Weidner, Robert et al.: Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen. Erste Transdisziplinäre Konferenz, Hamburg, 2014
- (Alpar, 2014) Alpar, Paul et Al.: Anwendungsorientierte Wirtschaftsinformatik, Berlin Heidelberg (Springer), 2014
- (Arnold, 2008) Arnold, Dieter et al.: Handbuch Logistik, Berlin Heidelberg (Springer), 2008
- (Ashby, 1956) Ashby, W. Ross: An introduction to Cybernetics, New York (Wiley), 1956
- (Bauernhansl, 2014) Bauernhansl, Thomas: Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma, in: Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael; Vogel-Heuser, Birgit: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer), 2014
- (Baumgarten, 2000) Baumgarten, Helmut; Walter, Stefan: Trends und Strategien in der Logistik 2000+, Berlin (Technische Universität) 2000

- (Becker, 2008) Becker, Thorsten: Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren, Berlin Heidelberg (Springer), 2008
- (Becker, 2012) Becker, Jörg; Probandt, Wolfgang; Vering, Oliver: Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung, Berlin Heidelberg (Springer), 2012
- (Behrens, 2006) Behrens, Christian et al.: Ein Multi-Agentensystem für Selbststeuerung in der Transportlogistik, in: Fachtagungsberichte VDE Kongress 2006. Innovations for Europe (2006), S. 29-34
- (Bischoff, 2015) Bischoff, Jürgen (Hrsg.): Erschließen der Potenziale der Anwendung von ‚Industrie 4.0‘ im Mittelstand, Mülheim an der Ruhr 2015
- (Brumme, 2010) Brumme, Hendrik; Schröter, Norbert; Schröter, Ingo: Supply Chain Management und Logistik, Stuttgart (Kohlhammer), 2010
- (Bühl, 1987) Bühl, W. L.: Die Grenzen der Autopoiesis, in: Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie 39 (1987), S. 225-254
- (Büttner, 2014) Büttner, Karl-Heinz; Brück, Ulrich: Use Case Industrie 4.0-Fertigung im Siemens Elektronikwerk Amberg, in: Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael; Vogel-Heuser, Birgit: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer), 2014

- (Chip, 2015) Redaktion Chip: Pearl SimValley AW-414.Go: Smartphone und Smartwatch vereint - Test: Pearl SimValley AW-414.Go (Smartwatch), 2015
http://www.chip.de/artikel/Pearl-SimValley_AW-414.Go-Smartwatch-Test_79156535.html (14.05.2016)
- (Delfmann, 2010) Delfmann, Werner et al.: Eckpunktepapier zum Grundverständnis der Logistik als wissenschaftliche Disziplin in: Delfmann, Werner; Wimmer, Thomas (Hrsg.): Strukturwandel in der Logistik – Wissenschaft und Praxis im Dialog, Hamburg (Deutscher Verkehrs-Verlag), 2010
- (Dickmann, 2007) Dickmann, Philipp: Schlanker Materialfluss – mit Lean Production, Kanban und Innovationen, Berlin Heidelberg (Springer), 2007
- (Dombrowski, 2014) Dombrowski, Uwe; Riechel, Christoph; Evers, Maren: Industrie 4.0 – Die Rolle des Menschen in der vierten industriellen Revolution, in: Kerstens, Wolfgang; Koller, Hans; Lödding, Hermann (Hrsg.): Industrie 4.0 - Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern, Berlin (Gito), 2014
- (Erlach, 2010) Erlach, Klaus: Wertstromdesign – Der Weg zur Schlanken Fabrik, Berlin Heidelberg (Springer), 2010
- (Gehrke, 2011) Gehrke, Jan: Relevanzbasierte Informationsbeschaffung für die informierte Entscheidungsfindung intelligenter Agenten, Dissertation, Universität Bremen, 2011

- (Gomber, 1996) Gomber, Peter; Schmidt, Claudia; Weinhardt, Christof: Synergie und Koordination in dezentral planenden Organisationen, in: Wirtschaftsinformatik 38.3 (1996), S. 299-307
- (Grässle, 2007) Grässle, Patrick; Baumann, Henriette; Baumann, Philippe: UML 2 projektorientiert; Bonn (Galileo Press), 2007
- (Gronau, 2014) Gronau, Norbert: Der Einfluss von Cyber-Physical Systems auf die Gestaltung von Produktionssystemen, in: Kerstens, Wolfgang; Koller, Hans; Lödding, Hermann (Hrsg.): Industrie 4.0 – Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern, Berlin (Gito), 2014
- (Grünwald, 2015) Grünwald, Walter: Zu Besuch in der Fabrik 4.0, in: Format, 39 (2015), S. 6-10
- (Günthner, 2010) Günthner, Willibald A.; ten Hompel, Michael (Hrsg.): Internet der Dinge in der Intralogistik, Berlin Heidelberg (Springer), 2010
- (Günthner, 2011) Günthner, Willibald A.; Tenerowicz, Peter: Modularisierung und Dezentralisierung in der Intralogistik - Auf dem Weg zur zellularen Fördertechnik, in: Industrie Management (2011), 01, S. 25-29
- (Günthner, 2013) Günthner, Willibald A. et al.: Schlanke Logistikprozesse – Handbuch für Planer, Berlin Heidelberg (Springer Verlag), 2013

- (Henke, 2015) Henke, Michael; Hegmanns, Tobias: Geschäftsmodelle für die Logistik 4.0 - Herausforderungen und Handlungsfelder einer grundlegenden Transformation, in: Vogel-Heuser, Birgit et al.: Handbuch Industrie 4.0, Berlin Heidelberg (Springer), 2015
- (Hirsch-Kreinsen, 2015) Hirsch-Kreinsen, Hartmut et al.: Social Manufacturing and Logistics – Ein Leitbild der technologischen, organisatorischen und sozialen Herausforderungen der Industrie 4.0 – Zwischenbericht des Forschungsprojektes, Dortmund (TU Dortmund), 2015
- (ten Hompel, 2011) ten Hompel, Michael; Heidenblut, Volker: Taschenlexikon Logistik, Berlin Heidelberg (Springer), 2011
- (ten Hompel, 2014) ten Hompel, Michael; Henke, Michael: Logistik 4.0, in: Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael; Vogel-Heuser, Birgit: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer), 2014
- (Jungheinrich, 2016a) Jungheinrich AG: Typenblatt ERC 215a, 2016
- (Jungheinrich, 2016b) Jungheinrich AG: Datenfunksysteme, 2016
- (Jungheinrich, 2016c) Jungheinrich AG: Datenfunkterminal, 2016
http://www.jungheinrich.de/typo3temp/_processed_/csm_Einsatz2_Datenfunk_1_38a1ca43c1.jpg (29.05.2016)
- (Kaczmarek, 2015) Kaczmarek, Nicol: Industrie 4.0 – Flexibilisierungsstrategie der Zukunft?, Bachelorthesis, HAW Hamburg, 2015

- (Kuhlang, 2010) Kuhlang, Peter: Produktivitätssteigerung durch die Kombinierte Anwendung von MTM und Wertstromdesign, in: Britzke, Bernd (Hrsg.): MTM in einer globalisierten Wirtschaft, München (FinanzBuch), 2010
- (Mann, 1998) Mann, Steve: Wearable Computing as means for Personal Empowerment, in: Keynote Address for The First International Conference on Wearable Computing, Fairfax VA, Kanada, 1998
- (Martin, 2014) Martin, Heinrich: Transport- und Lagerlogistik, Wiesbaden (Springer), 2014
- (Merkel, 2016) Merkel, Angela: Rede von Bundeskanzlerin Merkel bei der Eröffnung der Hannover Messe 2016 am 24. April 2016, 2016
<https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Rede/2016/04/2016-02-25-bkin-eroeffnung-hannovermesse.html>
(04.05.16)
- (Meyer, 2005) Meyer, Urs B.; Creux, Simone; Weber Marin, Andrea: Grafische Methoden der Prozessanalyse, München (Hanser), 2005
- (NDR, 2016) Norddeutscher Rundfunk: "Industrie 4.0": Revolution auch in Hamburg?, in Hamburg Journal – 05.01.2016 19:30 Uhr, 2016
http://www.ndr.de/fernsehen/sendungen/hamburg_journal/Industrie-40-Revolution-auch-in-Hamburg,hamj45418.html
(02.02.16)

- (Neumüller, 2015) Neumüller, Rudolf: Hamburger Dialogplattform Industrie 4.0, 2015
<http://www.industrie40.hamburg/mittelstand40nord>
(04.04.2016)
- (Nüttgens, 2002) Nüttgens, Markus; Rump, Frank J.: Syntax und Semantik Ereignisgesteuerter Prozessketten (EPK), in: Desel, J.; Weske, M. (Hrsg.): Promise 2002 - Prozessorientierte Methoden und Werkzeuge für die Entwicklung von Informationssystemen, Proceedings des GI-Workshops und Fachgruppentreffens (2002) 21, S. 64-77
- (Nyhuis, 2012) Nyhuis, Peter; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien, Berlin Heidelberg (Springer), 2012
- (Nyhuis, 2014) Nyhuis, Peter; Mayer, Jonas; Kuprat, Thorben: Die Bedeutung von Industrie 4.0 als Enabler für logistische Modelle in: Kerstens, Wolfgang; Koller, Hans, Lödding, Hermann (Hrsg.): Industrie 4.0 – Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern, Berlin (Gito), 2014
- (Peters, 2011) Peters, Theo; Ghadriri, Argang: Neuroleadership - Grundlagen, Konzepte, Beispiele, Wiesbaden (Springer), 2011
- (Pfannenbergs, 2015) Pfannenbergs GmbH: Innovative Schaltschrankklimatisierung mit Cloud-basierter Fernüberwachung, 2015
<http://www.pfannenbergs.com/de/news/article/sps-ipc-drives-2015-auf-dem-weg-in-richtung-industrie-40/1/>
(03.05.2016)

- (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, 2014)
Presse- und Informationsamt der Bundesregierung: Die Fabrik der Zukunft, 2014
<https://www.bundeskanzlerin.de/Content/DE/Artikel/2014/04/2014-04-04-merkel-hannover-messe.html> (04.05.2016)
- (Ramsauer, 2013) Ramsauer, Christian: Industrie 4.0 – Die Produktion der Zukunft, in: WINGbusiness (2013) 3, S. 6-12
- (Schließmann, 2014) Schließmann, Alexander: iProduction, die Mensch-Maschine Kommunikation in der Smart Factory, in: Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael; Vogel-Heuser, Birgit: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer), 2014
- (Schlund, 2013) Schlund, Sebastian; Gerlach, Stefan: Der Mensch im industriellen Holozän. Economic Engineering (2013) 4, S. 22-26
- (Schmidt, 2006) Schmidt, Mario: Der Einsatz von Sankey-Diagrammen im Stoffstrommanagement, Pforzheim, 2006
- (Schneider, 2011) Schneider, Oliver; Hohenstein, Frank; Günthner, Willibald A.: Bewertung von Methoden hinsichtlich einer ganzheitlichen Prozessdarstellung, in: Logistics Journal: not reviewed publication (2011), S. 1-18

- (Scholz-Reiter, 2014) Scholz-Reiter, Bernd; Harjes, Florian; Rippel, Daniel: Von der Selbststeuerung zu Cyber Physischen Systemen, in: Schuh, Günther (Hrsg.); Stich, Volker: Enterprise-Integration – Auf dem Weg zum kollaborativen Unternehmen, Berlin Heidelberg (Springer), 2014
- (Schuh, 2012) Schuh, Günther; Stich, Volker (Hrsg.): Produktionsplanung und –steuerung 1 – Grundlagen der PPS, Berlin Heidelberg (Springer), 2012
- (Seyrkammer, 2015) Seyrkammer, Sabine: Wearable Computing Technology: Potenzielle Einsatzmöglichkeiten in der Industrie, Hamburg (Diplomica), 2015
- (Spath, 2013) Spath, Dieter et al.: Produktionsarbeit in der Zukunft - Industrie 4.0, Stuttgart (Fraunhofer), 2013
- (Töpfer, 2009) Töpfer, Armin: Lean Six Sigma, Berlin Heidelberg (Springer), 2009
- (Ulrich, 2014) Ulrich, Magdalena: Freihändig arbeiten, in: Spreitzer, Thomas (Hrsg.): Best Practice (2014) 3, S. 24-27
- (VDI 3300, 1973) Verein Deutscher Ingenieure: Materialfluß-Untersuchungen, Düsseldorf (VDI Verlag), 1973
- (Veigt, 2013) Veigt, Marius et al.: Entwicklung eines Cyber-Physischen Logistiksystems, in: Industrie Management 29 (2013) 1, S. 15-18

-
- (Verl, 2014) Verl, Alexander; Lechler, Armin: Steuerung aus der Cloud, in: Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael; Vogel-Heuser, Birgit: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer), 2014
- (Weber, 2012) Weber, Jürgen: Logistikkostenrechnung, Berlin Heidelberg (Springer), 2012
- (Wenger, 2002) Wenger, Daniel: Modellierung eines Geschäftsprozesses mit der Unified Modeling Language (UML), Seminararbeit, Universität Fribourg (CH), 2002
- (Werthmann, 2014) Werthmann, Dirk; Lewandowski, Marco; Freitag, Michael: Benutzerschnittstelle im Kontext von Industrie 4.0, in: Industrie Management 30 (2014) 4, S. 39-44
- (Windelband, 2012) Windelband, Lars; Spöttl, Georg: Diffusion von Technologien in die Facharbeit und deren Konsequenzen für die Qualifizierung am Beispiel des „Internet der Dinge“. In: Faßhauer, U.; Fürstenau, B.; Wuttke, E. (Hrsg): Berufs- und wirtschaftspädagogische Analysen - Aktuelle Forschungen zur beruflichen Bildung, Opladen (Budrich), 2012
- (Windt, 2006) Windt, Katja: Selbststeuerung intelligenter Objekte in der Logistik, in: Freund, Alexandra (Hrsg.); Hütt, Marc: Selbstorganisation – Ein Denksystem für Natur und Gesellschaft, Köln (Böhlau), 2006

- (Yousefifar, 2014) Yousefifar, Ramin et al.: Dezentrale selbstorganisierte Grobplanung von Intralogistiksystemen mit Hilfe eines Software-Agentensystems, in: Logistics Journal : Proceedings (2014), S. 1-12
- (Zimmermann, 2008) Zimmermann, Jens: Adaptive Multi-Agenten-Systeme zur Steuerung komplexer Produktionssysteme, Hagen, 2008

Anhang

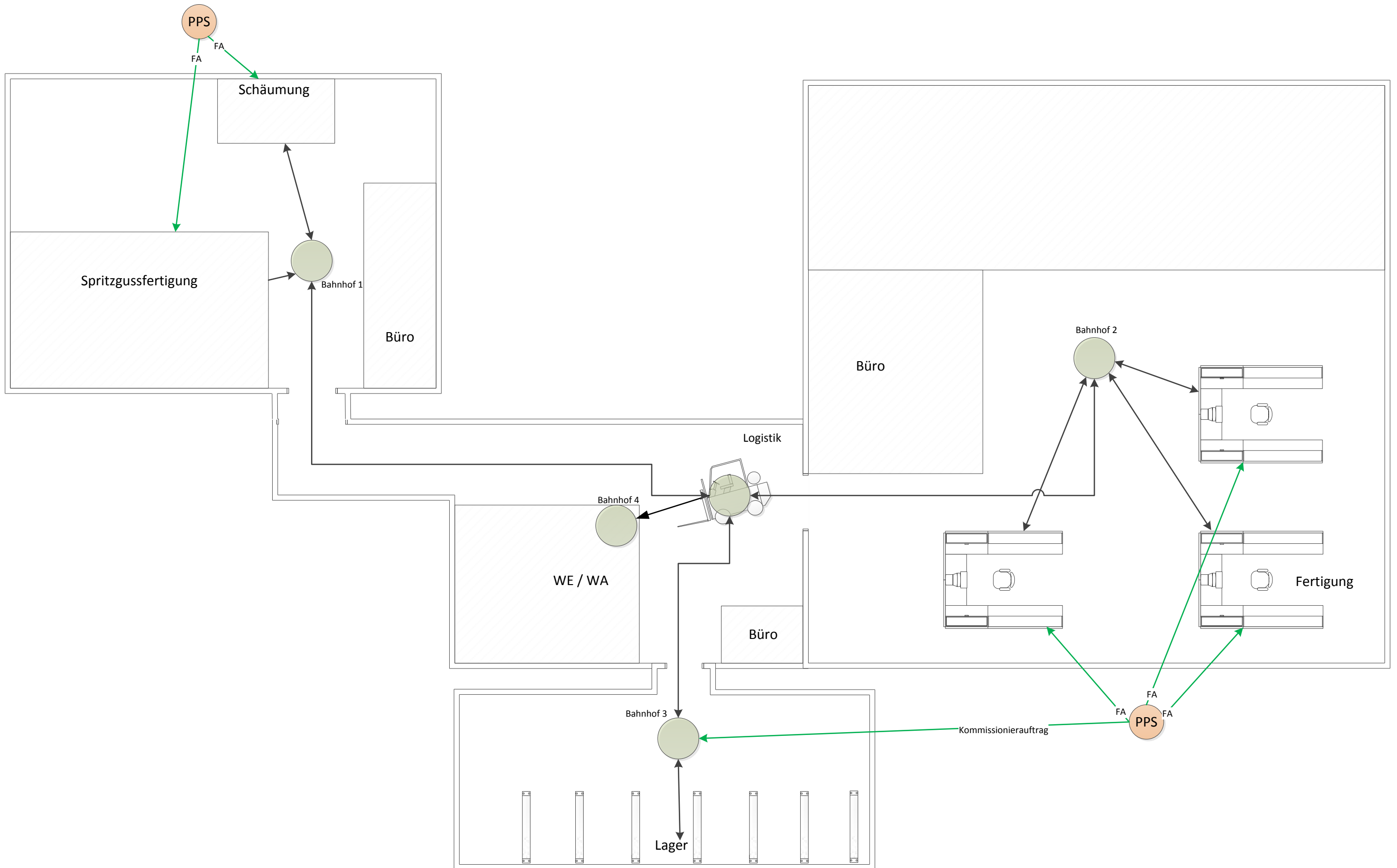
Anhang 1: Paarweiser Vergleich Soll-Industrie 4.0

I3.0	DLZ	Flex.	Strecke	Kapa.	Dispo.	Summe
DLZ		2	2	1	2	7
Flex.	0		1	0	2	3
Strecke	0	1		0	1	2
Kapa.	1	2	2		2	7
Dispo.	0	0	1	0		1
I4.0	DLZ	Flex.	Strecke	Kapa.	Dispo.	Summe
DLZ		0	2	2	2	6
Flex.	2		2	2	2	8
Strecke	0	0		1	2	3
Kapa.	0	0	1		2	3
Dispo.	0	0	0	0		0

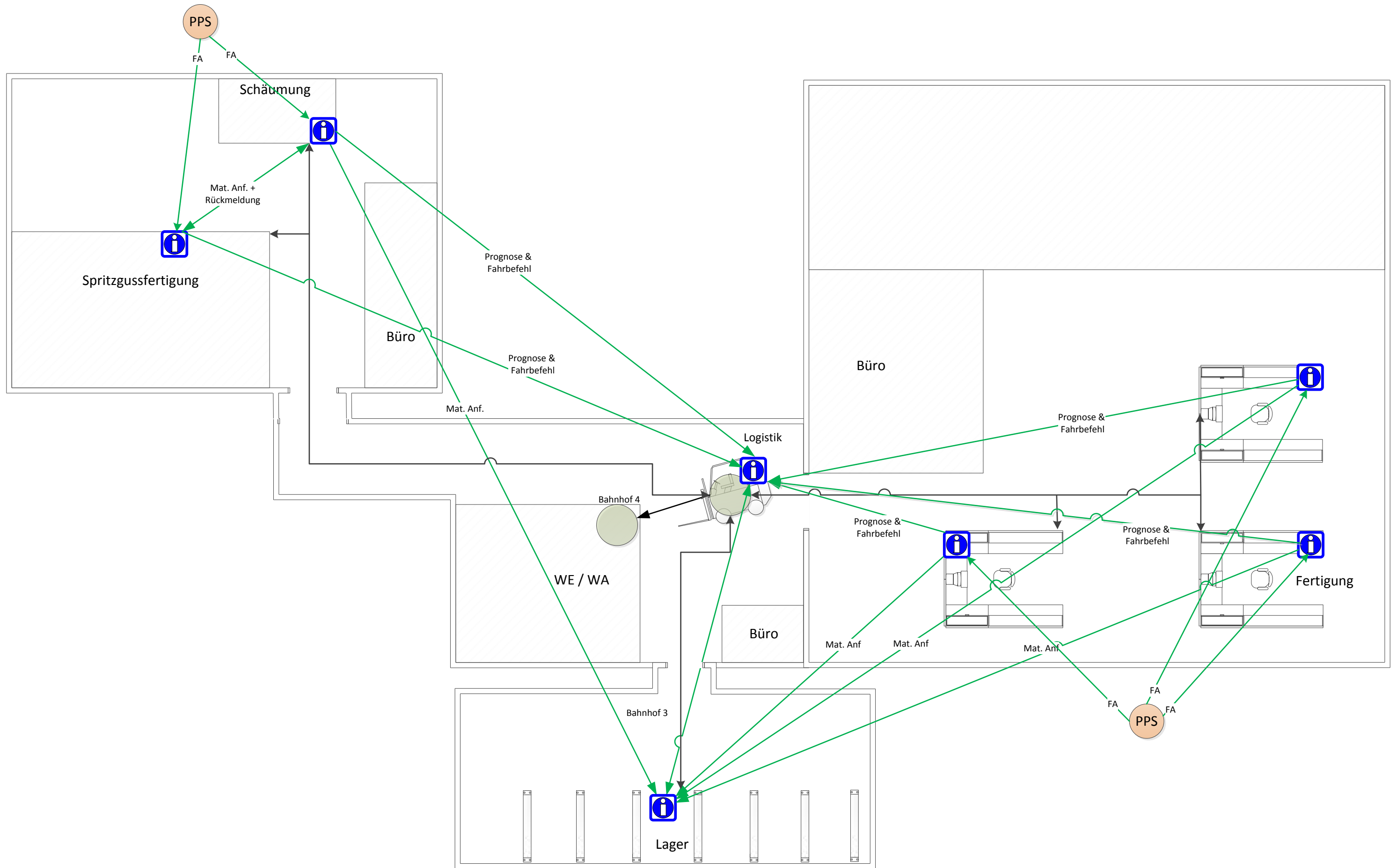
Anhang 2: Paarweiser Vergleich Soll-Industrie 4.P Pfannenber

I3.0	DLZ	Flex.	Strecke	Kapa.	Dispo.	Summe
DLZ			2	2	2	8
Flex.	0			1	2	3
Strecke	0	0	1		1	2
WFK	0	0	0	1		1
Dispo.	0	0	2	2	2	6
I4.0	DLZ	Flex.	Strecke	Kapa.	Dispo.	Summe
DLZ			2	2	2	8
Flex.	0			2	2	6
Strecke	0	0	0		2	4
WFK	0	0	0	0	2	2
Dispo.	0	0	0	0	0	0

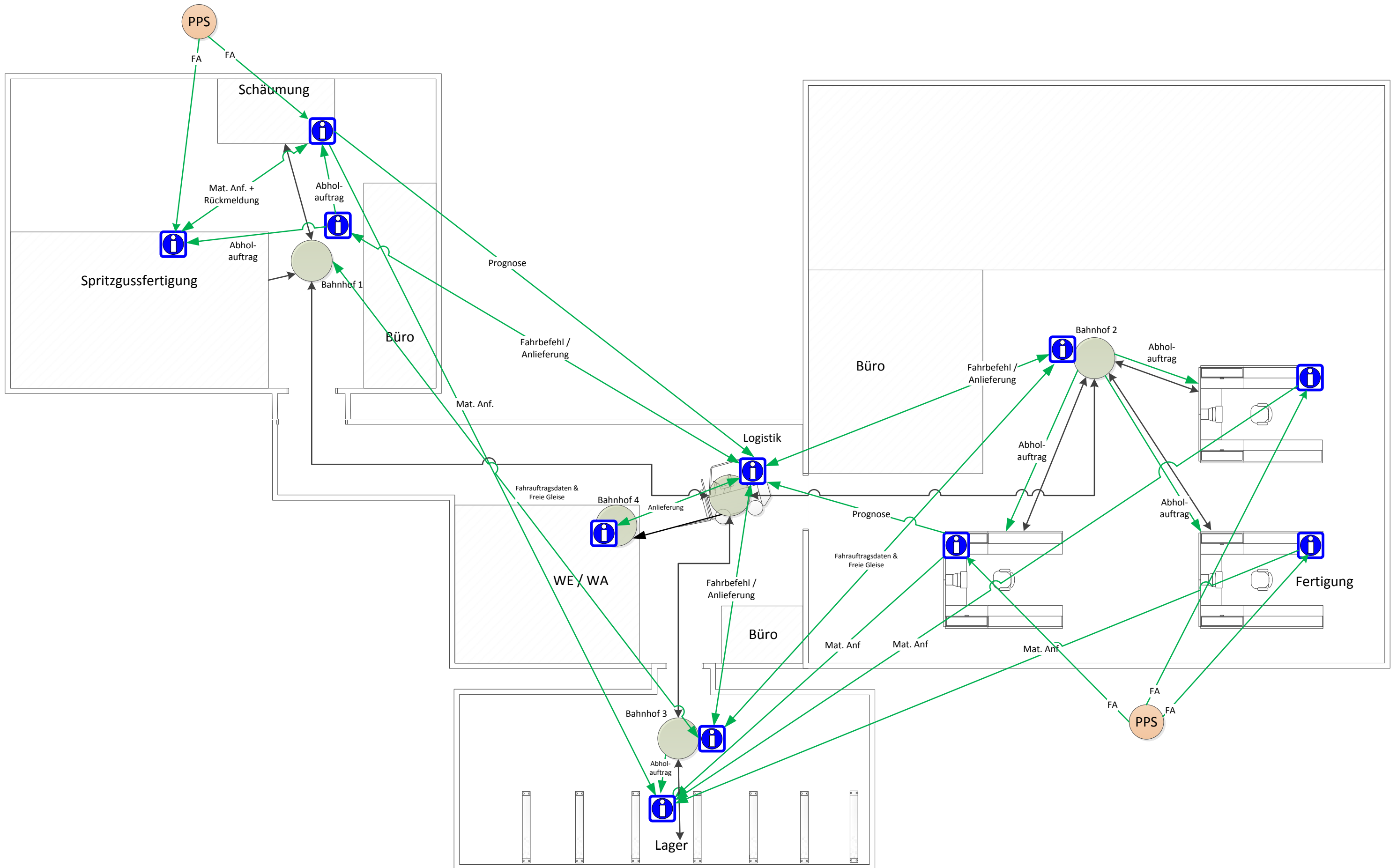
Anhang 3: Skizze Layout Automatisierungsszenario



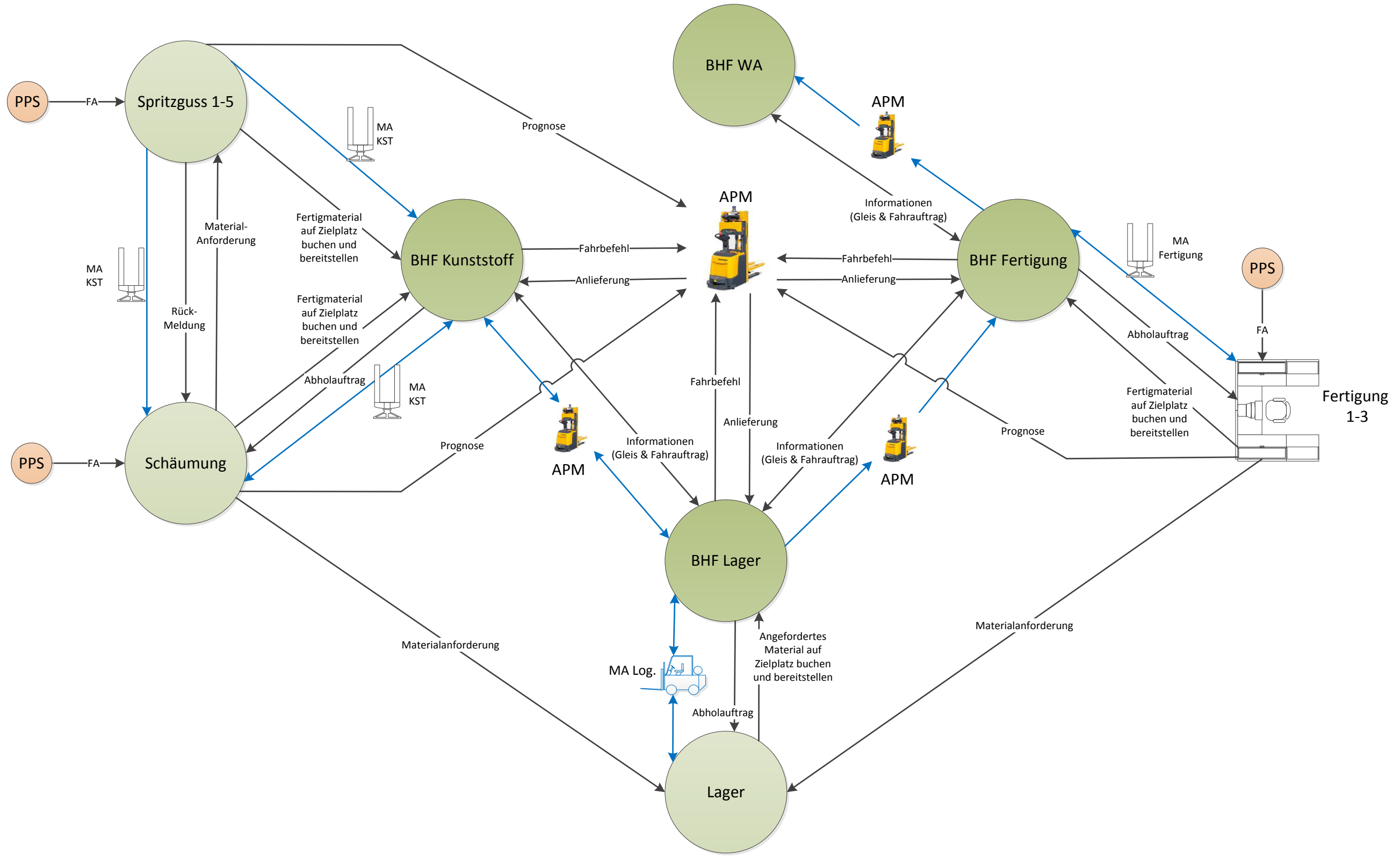
Anhang 4: Skizze Layout Werkzeugszenario



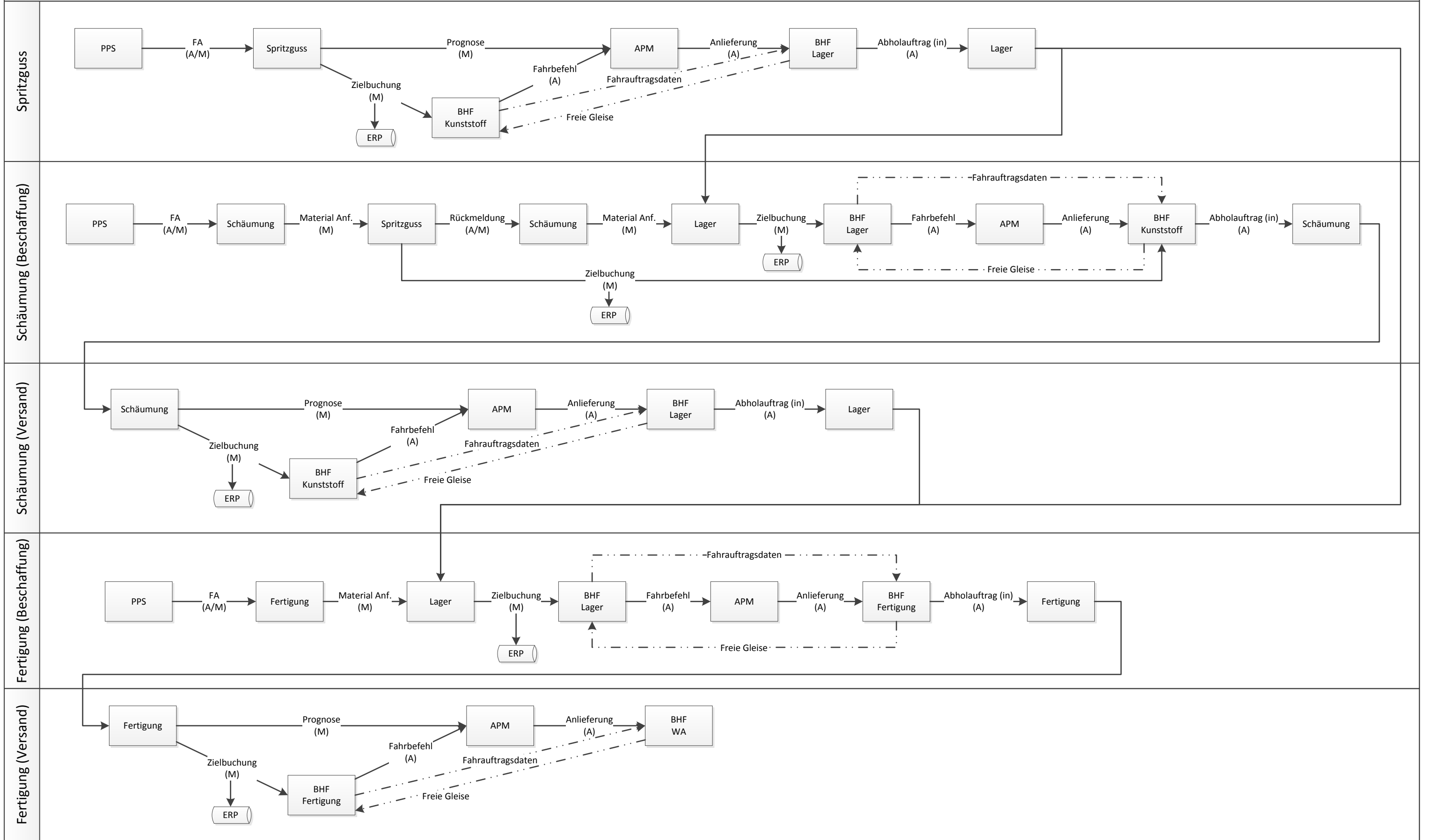
Anhang 5: Skizze Layout Hybridszenario



Anhang 6: Material- und Informationsflüsse Hybridszenario

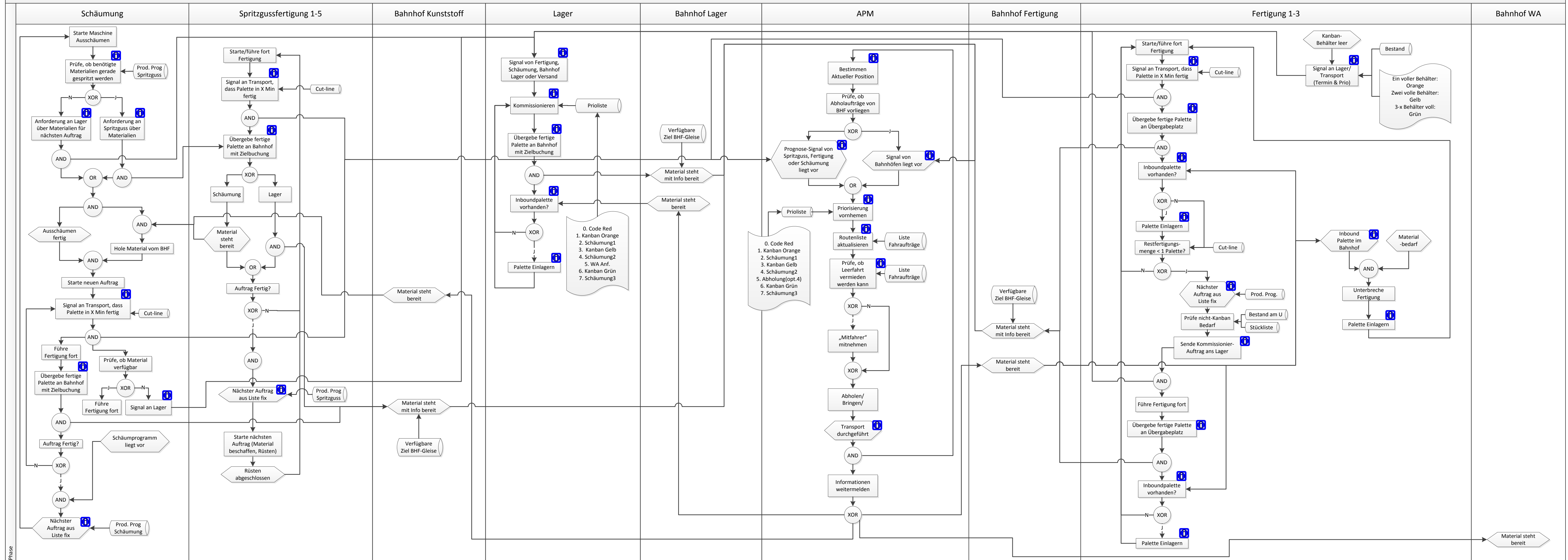


Anhang 7: Informationsflüsse Hybridszenario - prozessorientierte Sicht



Anhang 8: EPK-Diagramm Kommunikations- und Entscheidungsprozesse Hybrid-szenario

Kommunikationsarchitektur Soll-Szenario



Phase

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift