



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterthesis

Vor- und Zuname:

Julian Ebel



Titel:

**Industrie 4.0 und Lean Production – Ergänzung oder
Widerspruch?**

Abgabedatum:

20.06.2016

Betreuende Professorin:

Prof. Dr. Kontny

Zweiter Prüfender:

Prof. Dr. Röhrs

Fakultät Wirtschaft & Soziales

Department Wirtschaft

Studiengang:

International Logistics and Management Master of Science

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Tabellen- und Abbildungsverzeichnis.....	VI
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung und Abgrenzung	2
1.3 Stand der Forschung	4
1.4 Methodische Vorgehensweise	6
2 Lean Production	8
2.1 Entwicklung und Einordnung	8
2.1.1 Lean Production im Laufe der Zeit	8
2.1.2 Definition von Lean Production	9
2.1.3 Begriffsabgrenzung.....	10
2.2 Ziele.....	10
2.2.1 Übergeordnete Ziele	10
2.2.2 Vermeidung nicht-wertschöpfender Tätigkeiten (Muda).....	11
2.2.3 Vermeidung von Überbelastung (Muri)	12
2.2.4 Vermeidung von Unausgeglichenheit (Mura)	13
2.3 Lean-Prinzipien und -Werkzeuge	13
2.3.1 Das TPS-Haus	13
2.3.2 Streben nach Perfektion – Kaizen.....	14
2.3.3 Flussorientierung.....	16
2.3.3.1 Bedeutung	16
2.3.3.2 Taktzeit.....	17
2.3.3.3 One Piece Flow	19
2.3.3.4 Kanban-Steuerung	22
2.3.3.5 Milkrun.....	24
2.3.3.6 SMED	25
2.3.4 Jidoka.....	27
2.3.4.1 Bedeutung	27
2.3.4.2 Andon-Systeme.....	28
2.3.4.3 Poka Yoke	29

2.3.4.4	Total Productive Maintenance	29
2.3.4.5	U-Zelle	32
3	Industrie 4.0.....	34
3.1	Entwicklung und Einordnung	34
3.1.1	Die vierte industrielle Revolution	34
3.1.2	Definition von Industrie 4.0.....	37
3.1.3	Begriffsabgrenzung	38
3.2	Ziele.....	38
3.3	Technologische Grundlagen.....	39
3.3.1	Kernelemente von Industrie 4.0	39
3.3.1.1	Cyber-Physische Systeme	39
3.3.1.2	Internet der Dinge.....	40
3.3.1.3	Internet der Dienste	41
3.3.1.4	Smart Factory	42
3.3.2	Prinzipien von Industrie 4.0	44
3.3.2.1	Interoperabilität.....	44
3.3.2.2	Virtualisierung.....	44
3.3.2.3	Dezentralisierung.....	45
3.3.2.4	Echzeitfähigkeit	45
3.3.2.5	Service-Orientierung.....	45
3.3.2.6	Modularisierung.....	46
3.4	Industrie 4.0-Technologien in der Smart Factory	46
3.4.1	Klassifizierung nach Technologieparadigmen	46
3.4.2	Intelligentes Produkt.....	46
3.4.3	Intelligente Maschinen	48
3.4.4	Intelligente Assistenzsysteme	51
3.4.5	Intelligente Transportsysteme	53
4	Lean Production und Industrie 4.0.....	56
4.1	Anwendungsgebiete	56
4.2	Grundsätzliche Kompatibilität	58
4.3	Entwicklung einer Kompatibilitäts-Matrix	62
4.4	Streben nach Perfektion im Kontext von Industrie 4.0	64
4.4.1	Kaizen vs. Intelligentes Produkt	64
4.4.2	Kaizen vs. Intelligente Maschinen	64

4.4.3	Kaizen vs. Intelligentes Assistenzsysteme	65
4.4.4	Bewertung	67
4.5	Flussorientierung im Kontext von Industrie 4.0	68
4.5.1	Taktzeit im Kontext von Industrie 4.0	68
4.5.1.1	Taktzeit vs. Intelligente Maschinen	68
4.5.1.2	Taktzeit vs. Intelligente Assistenzsysteme	71
4.5.1.3	Taktzeit vs. Intelligente Transportsysteme	72
4.5.1.4	Bewertung	72
4.5.2	One Piece Flow im Kontext von Industrie 4.0.....	73
4.5.2.1	One Piece Flow vs. Intelligentes Produkt	73
4.5.2.2	One Piece Flow vs. Intelligente Maschinen	74
4.5.2.3	One Piece Flow vs. Intelligentes Assistenzsystem	75
4.5.2.4	One Piece Flow vs. Intelligente Transportsysteme.....	76
4.5.2.5	Bewertung	76
4.5.3	Kanban-Steuerung im Kontext von Industrie 4.0.....	77
4.5.3.1	Kanban-Steuerung vs. Intelligentes Produkt	77
4.5.3.2	Kanban-Steuerung vs. Intelligente Maschinen	81
4.5.3.3	Kanban-Steuerung vs. Intelligente Assistenzsysteme	83
4.5.3.4	Kanban-Steuerung vs. Intelligente Transportsysteme	84
4.5.3.5	Bewertung	86
4.5.4	Milkrun im Kontext von Industrie 4.0	87
4.5.4.1	Milkrun vs. Intelligentes Produkt.....	87
4.5.4.2	Milkrun vs. Intelligente Maschinen.....	89
4.5.4.3	Milkrun vs. Intelligente Assistenzsysteme	90
4.5.4.4	Milkrun vs. Intelligente Transportsysteme	91
4.5.4.5	Bewertung	92
4.5.5	SMED im Kontext von Industrie 4.0	94
4.5.5.1	SMED vs. Intelligentes Produkt	94
4.5.5.2	SMED vs. Intelligente Maschinen	94
4.5.5.3	SMED vs. Intelligente Assistenzsysteme.....	96
4.5.5.4	SMED vs. Intelligente Transportsysteme.....	97
4.5.5.5	Bewertung	97
4.6	Jidoka im Kontext von Industrie 4.0	99
4.6.1	Andon im Kontext von Industrie 4.0	99

4.6.1.1	Andon vs. Intelligente Maschinen	99
4.6.1.2	Andon vs. Intelligente Assistenzsysteme.....	100
4.6.1.3	Bewertung	101
4.6.2	Poka Yoke im Kontext von Industrie 4.0	102
4.6.2.1	Poka Yoke vs. Intelligente Produkte	102
4.6.2.2	Poka Yoke vs. Intelligente Maschinen	102
4.6.2.3	Poka Yoke vs. Intelligente Assistenzsysteme.....	103
4.6.2.4	Bewertung	104
4.6.3	TPM im Kontext von Industrie 4.0	105
4.6.3.1	TPM vs. Intelligente Maschinen.....	105
4.6.3.2	TPM vs. Intelligente Assistenzsysteme	107
4.6.3.3	Bewertung	109
4.6.4	U-Zelle im Kontext von Industrie 4.0	110
4.6.4.1	U-Zelle vs. Intelligente Maschinen.....	110
4.6.4.2	U-Zelle vs. Intelligente Assistenzsysteme	112
4.6.4.3	U-Zelle vs. Intelligente Transportsysteme	114
4.6.4.4	Bewertung	115
5	Schlussbetrachtung	117
5.1	Ergebnisse.....	117
5.2	Fazit.....	119
5.3	Abschließende Empfehlungen.....	123
5.4	Ausblick	124
	Quellen der Tabellen und Abbildungen.....	XI
	Literaturquellen	XVII
	Bücher.....	XVII
	Aufsätze	XXI
	Zeitschriften	XXVI
	Online.....	XXX
	Sonstige	XXXIV
	Eidesstattliche Erklärung	XXXVII
	Anhang.....	XXXVIII
	Darstellungen des TPS-Hauses.....	XXXVIII

Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Tab. 1: Bewertungsschema der Kompatibilitäts-Matrix	63
Tab. 2: Kompatibilitäts-Matrix zwischen Lean-Werkzeugen und Industrie 4.0- Technologieparadigmen	117
Abb. 1: Das TPS-Haus	13
Abb. 2: KVP im PDCA-Zyklus.....	15
Abb. 3: Grundprinzip des One Piece Flow im Vergleich zur konventionellen Losproduktion	19
Abb. 4: Grundprinzip eines Kanban-Systems.....	22
Abb. 5: Schritte zur Realisierung von SMED	26
Abb. 6: Die fünf Säulen des TPM-Konzepts	30
Abb. 7: Industrielle Revolutionen.....	34
Abb. 8: Darstellung einer Smart Factory	42
Abb. 9: Auflösung der Automatisierungspyramide durch CPS	43
Abb. 10: Entwicklungsstufen intelligenter Produkte.....	47
Abb. 11: Lose verkettete autonome Produktionsmodule	50
Abb. 12: Bsp. für autonome Fördertechnikmodule	53
Abb. 13: Bsp. für autonome Transportfahrzeuge.....	54
Abb. 14: Geeignete Fertigungstypen der Lean Production.....	56
Abb. 15: Reduzierung von Medienbrüchen als zusätzliches Optimierungsziel durch Industrie 4.0.....	59
Abb. 16: Komplexitätsreduzierung durch Assistenzsysteme an den Grenzen von Lean Production	61
Abb. 17: Simulationsbasierte Entscheidungs-unterstützung durch intelligente Assistenzsysteme.....	66
Abb. 18: Optimierte Umsetzung des PDCA-Ablaufs.....	66
Abb. 19: Aufbau der Matrix Produktion.....	71
Abb. 20: iBin der Firma Würth	79
Abb. 21: inBin des Fraunhofer IML.....	79
Abb. 22: Kombination aus inBin und zellularen Transportfahrzeugen	84

Abb. 23: Einsatzmöglichkeiten von Tablet-Computer und Pocket-Scanner im Rahmen eines Milkruns	91
Abb. 24: Eingesetztes intelligentes Transportsystem zur Realisierung des Injektionsprinzips	91
Abb. 25: Nach dem Injektionsprinzip gestalteter Fertigungsbereich.....	91
Abb. 26: Bsp. für Pick-by-Light- und Put-to-Light-Technologien.....	104
Abb. 27: Bsp. für Pick-by-Vision-Technologie	104
Abb. 28: Ressourcen-Cockpit zur Unterstützung des Instandhaltungsprozesses ...	108
Abb. 29: Bsp. für Instandhaltung mittels Augmented-Reality	108
Abb. 30: Bsp. für Einsatz eines mobilen Montageassistenten in U-Zelle.....	113
Abb. 31: Mobiler Montageassistent zur Visualisierung aller Auftragsinformationen	113
Abb. 32: Logistik-Kapsel für den Transport von Zwischenprodukten und Material zu U-Zellen	114
Abb. 33: Bsp. für Transportfahrzeug zur Bestückung und Werkstückentnahme	114
Abb. 34: TPS-Haus nach Gerberich	XXXVIII
Abb. 35: TPS-Haus nach Krallmann.....	XXXVIII
Abb. 36: TPS-Haus nach Liker	XXXVIII
Abb. 37: TPS-Haus nach Albat.....	XXXVIII

Abkürzungsverzeichnis

AR	Augmented Reality
CIM	Computer-Integrated-Manufacturing
CPS	Cyber-Physische Systeme
CPLS	Cyber-Physisches Logistiksystem
CPPS	Cyber-Physisches Produktionssystem
CyPAS	Concept for a Cyber Physical Assembly System
FTS	Fahrerloses Transportsystem
GPS	Ganzheitliche Produktionssysteme
FIFO	First-In-First-Out
Fraunhofer IAO	Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation
Fraunhofer IML	Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik
Fraunhofer IPA	Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
Fraunhofer IWB	Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik
IKT	Internet- und Kommunikationstechnologie
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
RFID	Radio-Frequency-Identification
SMED	Singe-Minute-Exchange-of-Dies
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerungen
TPS	Toyota Produktionssystem
TPM	Total Productive Maintenance

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Seit Beginn der 1990er Jahre haben viele produzierende Unternehmen ihre Produktion nach den unter dem Begriff „Lean Production“ bekannt gewordenen Prinzipien, Konzepten und Methoden des Toyota Produktionssystems umgestellt, um ihre Produktivität und Wettbewerbsfähigkeit zu steigern. Heutzutage stellen Kaizen, Kanban, One Piece Flow, Poka Yoke, Total Productive Maintenance etc. den Status Quo für die Gestaltung effizienter Produktionssysteme in unterschiedlichen Industriebranchen dar.¹ Im Zuge des wachsenden globalen Wettbewerbs sehen sich produzierende Unternehmen nun einem zunehmenden Termin-, Qualitäts- und Kostendruck sowie einer schwankenden Nachfragesituation ausgesetzt. Darüber hinaus führt eine steigende Nachfrage nach kundenindividuellen Produkten zu einer wachsenden Anzahl an Varianten im Produktionsprozess. Dies resultiert in einem deutlichen Anstieg der Komplexität in modernen Produktionssystemen und zwingt Unternehmen dazu, die Produktivität und Flexibilität ihrer Prozesse ständig zu erhöhen.² Hier stößt Lean Production allmählich an seine Grenzen. Ein Ausweg soll nun mit dem flächendeckenden Einzug der Internet- und Kommunikationstechnologie in die Produktion gefunden werden.³ Unter dem viel diskutierten, von der deutschen Bundesregierung propagierten Zukunftsmodell „Industrie 4.0“ lassen sich futuristisch klingende Schlagwörter wie „Smart Factory“, „Internet der Dinge“ oder „Cyber-Physische-Systeme“ zusammenfassen.⁴ In Zukunft sollen intelligente Produktionsressourcen in der Produktion u.a. eigenständig Informationen austauschen, Vorschläge für zu ergreifende Maßnahmen anbieten sowie Aktionen selbstständig auslösen können.⁵ Dadurch soll „die Fähigkeit, schnell und flexibel auf Kundenanforderungen zu reagieren und hohe Variantenzahlen bei niedrigen Losgrößen wirtschaftlich zu produzieren [...] zunehmen und [sich] so die Wettbewerbsfähigkeit noch einmal erhöhen“⁶. Demnach werden sich zahlreiche neue Möglichkeiten zur Organisation, Beherrschung und Steuerung der Produktion durch

¹ Vgl. Kolberg/Zühlke, 2015, S.1870.

² Vgl. Deuse et al., 2015, S.99.

³ Vgl. Spath et al., 2013a, S.2.

⁴ Vgl. Hermann/Pentek/Otto, 2015, S.3f.

⁵ Vgl. Kagermann/Wahlster/Helbig, 2013, S.5.

⁶ Spath et al., 2013a, S.2.

Industrie 4.0 ergeben. Um diese Vision in die Realität umzusetzen, müssen Unternehmen ihre vorhandenen Technologien und ihr Produktionssystem schrittweise anpassen.^{7,8} Für produzierende Unternehmen, die die Prinzipien der Lean Production in ihren Produktionssystemen verankert haben, stellt sich daher nun die Frage, wie sie Industrie 4.0-Technologien effektiv in die eigene Produktion integrieren können.^{9,10} Allerdings ist es bisher nur schwer möglich einen Mehrwert aus der allgemeinen Berichterstattung zu Industrie 4.0 für das eigene Produktionsumfeld zu generieren.¹¹ Dies macht es notwendig, sich intensiver mit dem Zusammentreffen von Lean Production und Industrie 4.0 auseinanderzusetzen.

1.2 Zielsetzung und Abgrenzung

Da Industrie 4.0 keine konkreten Inhalte für die operative Umsetzung beinhaltet, wird eine alleinige Einführung von Internet- und Kommunikationstechnologie (IKT) in der Produktion nicht zum gewünschten Erfolg führen. Auch hier sind Gestaltungsprinzipien, Konzepte und Methoden notwendig, auf denen Industrie 4.0 mit seinen informationstechnischen Lösungen aufbaut.¹² Laut einiger Experten kann die Grundlage dafür von Lean Production geschaffen werden.¹³ Johann Soder, Technik-Geschäftsführer der SEW Eurodrive, ist gar davon überzeugt, „dass man diese Basis der Lean Production haben muss, um Industrie 4.0 sinnvoll einzusetzen“¹⁴.

Diese Annahme wirft die Forschungsfrage auf,

ob und inwiefern sich die Konzepte und Methoden der Lean Production mit dem technologischen Ansatz der Industrie 4.0 vereinen lassen.

Ausgehend von dieser Frage wird in dieser Arbeit ein mögliches Zusammenspiel von Lean Production und Industrie 4.0 analysiert, um mehr Klarheit über die Beziehung der beiden Konzepte zu erlangen. In diesem Zusammenhang muss untersucht werden, welche Lean-Elemente weiterhin Anwendung im Industrie 4.0-Kontext finden

⁷ Vgl. Fallenbeck/Eckert, 2014, S.398.

⁸ Vgl. Kagermann/Wahlster/Helbig, 2014, S.23.

⁹ Vgl. Frank, 2014, S.17.

¹⁰ Vgl. Bick, 2014, S.47.

¹¹ Vgl. Frank, 2014, S.17.

¹² Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015b, S.159.

¹³ Vgl. Kaspar/Schneider, 2015, S.18.

¹⁴ Fagner, 2015, S.77.

können, ob und wie diese angepasst werden müssen und welche Konzepte und Methoden durch eine fortschreitenden Digitalisierung und eine steigende Komplexität in der Produktion auf lange Sicht ersetzt werden.

Einige Pionier-Unternehmen sowie Forschungsinstitute haben bereits Industrie 4.0-Anwendungen getestet oder eingeführt.¹⁵ In der vorliegenden Arbeit sollen daher Synergiepotenziale zwischen Lean-Elementen und Technologien aus dem Umfeld der Industrie 4.0 mithilfe von Beispielen aus der Forschungs- und Unternehmenspraxis nachgewiesen werden. Darüber hinaus sollen Praxisbeispiele, die einen Widerspruch zwischen den beiden Ansätzen aufzeigen, eingeordnet und beurteilt werden. Abgesehen davon sind Analysen auf theoretischer Ebene vorgesehen. In diesen sollen in der Literatur getroffene Annahmen, beschriebene Rahmenbedingungen und Voraussetzungen zu den gewählten Elementen von Lean Production und Industrie 4.0 genutzt werden, um eine Einschätzung zur Kompatibilität der beiden Ansätze abzugeben.

Die Untersuchungen der Synergien und Widersprüche aus praktischer und theoretischer Sicht sollen die Grundlage für eine quantitative Bewertung der Kompatibilität zwischen Lean Production und Industrie 4.0 in einer Matrix bilden. Diese soll eine systematische Darstellung und Bewertung des Zusammenspiels der beiden Ansätze sowie die Möglichkeit einer abschließenden Beantwortung der Forschungsfrage gewährleisten. Die Bewertung soll es lean organisierten Unternehmen ermöglichen, etwaige Synergien und Potenziale auf der einen Seite sowie Widersprüche und Risiken auf der anderen Seite aus den dargestellten Kombinationsmöglichkeiten von Lean-Elementen und Industrie 4.0-Technologien ableiten zu können.

Dabei muss beachtet werden, dass die Vision einer totalen Vernetzung von Industrie 4.0 nicht in einem einzigen Sprung zur Realität werden wird. Unternehmen werden Evolutionszyklen bei der Einführung von Industrie 4.0 durchlaufen und dabei unterschiedliche Integrationsgrade von Industrie 4.0-Technologien aufweisen.¹⁶ Dementsprechend sind die dargestellten Beispiele aus der Forschungs- und Unternehmenspraxis für die unterschiedlichen Integrationsgrade mehr oder minder

¹⁵ Vgl. Bick, 2014, S.47.

¹⁶ Vgl. Wegener, 2014, S.356.

geeignet. Argumentationen können sich im Rahmen der Analyse daher nur punktuell auf unterschiedliche Integrationsgrade von Industrie 4.0 beziehen. Hinzu kommt, dass auch die Lean-Elemente in jedem Unternehmen unterschiedlich ausgeprägt, gewichtet sowie unternehmens- und branchenspezifisch angepasst sind. Daraus ergibt sich, dass die vorliegende Arbeit nicht den Anspruch haben kann, allgemeingültige Empfehlungen darüber abzugeben, welche Industrie 4.0-Technologien auf welche Weise in lean organisierten Unternehmen einzusetzen sind. Die Vorschläge in dieser Arbeit sollen lediglich Anhaltspunkte zur Orientierung geben.

Um möglichst viele Überschneidungspunkte der beiden Ansätze zu untersuchen und eine willkürliche Zuordnung von Beispielen zu vermeiden, sollen bei den Ausführungen dennoch möglichst elementare Elemente von Industrie 4.0 und Lean Production gegenübergestellt werden. Zahlreiche Elemente beider Ansätze werden in der Literatur unterschiedlich ausgeführt, eingeordnet oder zusammengefasst, weshalb passende Verallgemeinerungen gewählt werden müssen. Dies impliziert, dass nicht jede einzelne auf dem Markt verfügbare Industrie 4.0-Technologie aus der Lean-Perspektive bewertet und nicht jedes Werkzeug der Lean Production aus der Industrie 4.0-Sicht betrachtet werden kann.

Die Ausführungen zu Industrie 4.0 sollen zweckmäßig für einen Vergleich mit Lean Production sein, weshalb allzu tiefe, informationstechnische Details oder auch sicherheitsrelevante Fragestellungen zu Industrie 4.0 in dieser Arbeit nicht enthalten sind. Darüber hinaus sind gesellschaftliche Fragestellungen, wie bspw. die Rolle des Menschen in der Smart Factory, nicht Gegenstand der Untersuchungen und werden daher, basierend auf der herrschenden Meinung in der Literatur, als gegeben erachtet.

1.3 Stand der Forschung

Es existieren bereits einige Forschungsansätze und Fachartikel, in denen das Spannungsfeld zwischen Industrie 4.0 und Lean Production thematisiert wird. Diesbezügliche Untersuchungen beschränken sich jedoch entweder auf einzelne Beispiele und ziehen daraus allgemeine Schlüsse für das Zusammenspiel der beiden Ansätze (z.B. Schlick et al., 2014; Frank, 2014; Kaspar/Schneider, 2015; Hofmann,

2014; Soder, 2014) oder stellen lediglich allgemeine, undetaillierte Überlegungen zu einer Kombination von Elementen beider Ansätzen an (z.B. Roy/Mittag/Baumeister, 2015, Kolberg/Zühlke, 2015; Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015a; Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015b; Bick, 2014). Abgesehen davon gibt es Studien, in denen das Meinungsbild von Praktikern zum Thema Industrie 4.0 und Lean Production erforscht wird (z.B. Frenzel, 2015). Ein umfassender, systematischer und detaillierter Vergleich zwischen den elementaren Konzepten und Methoden der Lean Production und Industrie 4.0-Technologien wurde bisher nicht vorgenommen. Kolberg und Zühlke sprechen die Notwendigkeit einer solchen Analyse an. Sie fordern eine umfassende Arbeit, welche den Rahmen für Integrationsmöglichkeiten von Industrie 4.0-Technologien in eine Lean Production schafft. Darin soll begründet werden, welche und inwiefern Industrie 4.0-Technologien eine schlanke Produktion unterstützen können. Weiterführend wird geraten, passende Praxisbeispiele zur dieser Thematik aufzuführen. Auf den Erkenntnissen aufbauend sollen identifizierte Nutzenpotenziale bewertet werden.¹⁷ An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an.

Das Thema Industrie 4.0 ist für viele Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Universitäten hochaktuell, weshalb bereits vielfältige Beiträge von Akademikern und Praktikern existieren. Diese stellen den Begriff Industrie 4.0 sehr unterschiedlich dar und ordnen ihm zahlreiche, sich teilweise überschneidende Elemente zu. Eine allgemeingültige, akademische Definition des Begriffs wurde bisher nicht einmal von den Hauptinitiatoren, dem "Arbeitskreis Industrie 4.0" oder der "Plattform Industrie 4.0", vorgenommen. Das Fehlen konzeptioneller und terminologischer Grundlagen erschwert eine wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem Thema.¹⁸ Dies hat auch zur Folge, "dass die meisten Unternehmen in Deutschland keine klare Vorstellung davon haben, was Industrie 4.0 eigentlich ist und wie sie aussehen wird"¹⁹. Die vorliegende Arbeit hat daher mitunter die Aufgabe, die Grundlagen zu Industrie 4.0 auf der Basis von Annahmen möglichst allgemeingültig darzustellen. Diese orientieren sich insbesondere an dem von Bauernhansl/ten Hompel/Vogel-Heuser für Anwender herausgegebenen Sammlung „Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik“, dem von der Promotorengruppe Kommunikation der

¹⁷ Vgl. Kolberg/Zühlke, 2015, S.1873.

¹⁸ Vgl. Hermann/Pentek/Otto, 2015, S.3f.

¹⁹ „Industrie 4.0 – viele Unternehmen sind überfordert“, 2014, S.1.

Forschungsunion Wirtschaft-Wissenschaft herausgegebenen Bericht
„Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 – Abschlussbericht
des Arbeitskreises Industrie 4.0“ und dem auf einer Literaturanalyse basierenden
Working Paper „Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios“ von
Hermann/Pentek/Otto. Daneben sind weitere Forschungsberichte und diverse
Fachartikel relevant.

Die Literatur zum Thema Lean Production ist hingegen weitaus übersichtlicher und
eindeutiger. Nichtsdestotrotz existieren auch hier unterschiedliche Definitionen des
Begriffs sowie zahlreiche Ausprägungen und Darstellungsformen der Lean-Konzepte
und Methoden. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf die elementaren, am
besten mit den Industrie 4.0-Elementen vergleichbaren Elemente.

1.4 Methodische Vorgehensweise

Es handelt sich um eine theoretische Arbeit auf Literaturbasis, in der abstrakte
Zusammenhänge beschrieben und erklärt werden.²⁰ „Die Anwendung der Theorie
erfolgt deduktiv, d.h. es wird vom Abstrakten, Allgemeinen [den Grundlagen zu Lean
Production und Industrie 4.0] auf das Spezielle“²¹ (die Analyse des Zusammenspiels
der beiden Ansätze) geschlossen. Kern der theoretischen Arbeit ist ein Vergleich, bei
dem die beiden in der Theorie dargestellten theoretischen Ansätze gegenübergestellt
und in ihrer Kompatibilität bewertet werden. Dafür ist folgende Vorgehensweise
vorgesehen:

Zunächst werden die Grundlagen zum Thema Lean Production in Kapitel 2
geschaffen. Darin wird der Begriff zuerst in seiner Entwicklung beschrieben, definiert
und abgegrenzt. Anschließend werden die Ziele von Lean Production beschrieben.
Ausgehend davon erfolgt eine theoretische Auseinandersetzung mit den
elementaren Lean-Prinzipien, Konzepten und Methoden, die die Basis für einen
systematischen Vergleich an späterer Stelle schafft.

Kapitel 3 widmet sich den Grundlagen zum Thema Industrie 4.0. Analog zu Kapitel 2
wird zunächst die Entwicklung des Begriffs beschrieben, eine Begriffsdefinition und -
abgrenzung vorgenommen sowie anschließend die Ziele von Industrie 4.0

²⁰ Vgl. Oehlich, 2015, S.8.

²¹ Oehlich, 2015, S.8.

dargestellt. Aus der Definition lassen sich Kernelemente von Industrie 4.0 sowie Prinzipien, die Industrie 4.0-Technologien auszeichnen, ableiten. Die Beschreibung dieser soll ein grundlegendes technologisches Verständnis im Umgang mit Industrie 4.0 schaffen. Auf dieser technologischen Grundlage aufbauend wird eine Klassifizierung diverser Industrie 4.0-Technologien in Technologieparadigmen vorgenommen. Dies bezweckt eine Bündelung diverser Anwendungsmöglichkeiten von Industrie 4.0-Technologien und schafft somit die Basis für eine systematische Gegenüberstellung von Industrie 4.0 und den in Kapitel 1 präsentierten Lean-Konzepten und Methoden.

In Kapitel 4 folgt der Kern der Arbeit – die Auseinandersetzung mit dem Spannungsfeld zwischen Lean Production und Industrie 4.0. Ausgehend von einer Erläuterung der Anwendungsgebiete von Lean Production und Industrie 4.0, wird zunächst die grundsätzliche Kompatibilität zwischen Industrie 4.0 und den Zielen, Grundprinzipien und dem Umgang mit Komplexität einer schlanken Produktion geprüft. Darauf aufbauend wird die Forschungsfrage im Detail untersucht. Hierzu werden die einzelnen Lean-Konzepte und Methoden den Technologieparadigmen von Industrie 4.0 in einer Matrix gegenübergestellt. Die jeweilige Bewertung der Kompatibilität zwischen Lean-Konzept bzw. -Methode und Technologieparadigma im Rahmen der Matrix erfolgt auf Basis einer detaillierten Untersuchung der Synergien und Widersprüche.

Im Schlusskapitel werden zunächst die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt. Es folgen eine Schlussfolgerung und ein Vergleich dieser Erkenntnisse mit dem bisherigen Stand der Forschung im Fazit sowie abschließende Empfehlungen für Unternehmen im Umgang mit Industrie 4.0. Schließlich werden weitere, noch zu untersuchende Fragestellungen im Ausblick angesprochen.

2 Lean Production

2.1 Entwicklung und Einordnung

2.1.1 Lean Production im Laufe der Zeit

Der Begriff „Lean Production“, zu Deutsch „Schlanke Produktion“, erlangte durch die MIT-Studie „The Machine That Changed The World: The Story of Lean Production“ von Womack/Jones/ Roos aus dem Jahre 1991 weltweite Bekanntheit. Mit diesem Begriff bezeichneten die Autoren ursprünglich sämtliche bei japanischen Automobilherstellern zu dieser Zeit vorgefundenen Produktionssysteme, die nach dem Vorbild des Toyota Produktionssystems (TPS) entwickelt wurden.^{22,23} Das TPS selbst war die Antwort des in den 1950er Jahren in einer wirtschaftlichen Krise befindlichen japanischen Automobilherstellers Toyota auf die Marktanforderungen, eine breite Fahrzeugpalette in kleinen Stückzahlen für einen kleinen Binnenmarkt zu fertigen.²⁴ Der Toyota-Ingenieur Taiichi Ohno und sein externer Berater Shigeo Shingo verknüpften die Vorteile der Massenproduktion (Schnelligkeit, geringe Stückkosten) mit denen der handwerklichen Produktion (Flexibilität und hohe Qualität) zu einem neuen Produktionskonzept, das eine enorme Produktivität, hohe Qualitätsstandards und flexible Anpassungen an sich ändernde Kundenwünsche ermöglichte.²⁵ So entwickelte sich die Fertigung von Toyota innerhalb von ca. 25 Jahren zu einer weltweit überlegenen Fertigung.²⁶ Eine Besonderheit des TPS war, dass es damals geltende Konzepte der Produktionswirtschaft, wie bspw. die hierarchische Produktionsplanung und -steuerung, in Frage stellte²⁷ und dabei von allem weniger benötigte als die Massenproduktion (Personal, Produktionsfläche, Investitionen in Werkzeuge, Zeit für Produktentwicklungen, Lagerbestände), während es gleichzeitig die Fertigung einer größeren Produktvielfalt mit weniger Fehlern ermöglichte²⁸.

Die Elemente der Lean Production haben sich bewährt und stellen heutzutage die Basis für effizienten und modernen Materialfluss dar. Namenhafte produzierende

²² Vgl. Womack/Jones/ Roos, 1992, S.10.

²³ Vgl. Vahrenkamp, S.252.

²⁴ Vgl. Womack/Jones/ Roos, 1992, S.54f.

²⁵ Vgl. Gerberich, 2011, S.96.

²⁶ Vgl. Dickmann, 2009, S.7.

²⁷ Vgl. Vahrenkamp, 2008, S.252.

²⁸ Vgl. Womack, Jones/ Roos, 1992, S.19.

Unternehmen haben die Prinzipien, Konzepte und Methoden in Anlehnung an das TPS in ihren unternehmensspezifischen, sog. ganzheitlichen Produktionssystemen verankert.²⁹ Ausgehend von der Automobilindustrie findet Lean Production heute bspw. Anwendung im Sondermaschinenbau, der Medizintechnik, in der Konsumgüterindustrie oder im Handwerk.³⁰

2.1.2 Definition von Lean Production

„Lean“ steht für schlanke, von Verschwendungen befreite Prozesse. Die Grundidee von Lean Production ist, in sämtlichen Prozessen nur die Ressourcen (Personal, Zeit, Raum, Material, Investitionen) einzusetzen, die auch tatsächlich benötigt werden.³¹ Lean Production bezeichnet sich daher als eine abgestimmte Sammlung von Prinzipien, Konzepten und Methoden zur Gestaltung von Produktionssystemen, bei der alle Tätigkeiten auf die Wertschöpfung am Produkt ausgerichtet und nicht wertschöpfende Tätigkeiten, sog. Verschwendungen, auf ein Minimum reduziert werden.³² Die schlanke Produktionsweise hebt sich gegenüber der klassischen Produktionsweise insbesondere durch einen möglichst ununterbrochenen, abgestimmten Materialfluss statt hoher Umlaufbestände, eine verbrauchs- statt prognoseorientierte Produktionssteuerung, Fehlervermeidung statt kostenintensiver Nacharbeit sowie eigenverantwortliche und vielfältige Arbeit in Selbststeuerung statt monotoner und fremdbestimmter Tätigkeiten ab.^{33,34} Dieser Anspruch erfordert hochqualifizierte Mitarbeiter, die eine Unternehmenskultur der kontinuierlichen Verbesserung leben.³⁵ Zudem setzt Lean Production auf Komplexitätsreduzierung durch den Einsatz effizienter Methoden, die i.d.R. mit einfachen Mitteln (Papier und Bleistift³⁶) und minimaler IT-Unterstützung umsetzbar sind.³⁷

Es wird ersichtlich, dass eine auf einen Satz beschränkte Definition nicht ausreicht, um ein umfassendes Verständnis des Lean-Ansatzes zu erhalten³⁸. Daher werden die auf dem TPS basierenden Prinzipien, Konzepte und Methoden in Kapitel 2.3 konkretisiert.

²⁹ Vgl. Dombrowski et al, 2009, S.29ff.

³⁰ Vgl. Dickmann, 2009, S.6.

³¹ Vgl. Syska, 2006, S.85.

³² Vgl. Groth/Kammel, 1994, S.31.

³³ Vgl. Kolberg/Zühlke, 2015, S.1870.

³⁴ Vgl. Syska, 2006, S.85ff.

³⁵ Vgl. Syska, 2006, S.85ff.

³⁶ „Die Smart Factory in Produktionsnetzwerken“, 2013, S.15.

³⁷ Vgl. Bick, 2014, S.46.

³⁸ Vgl. Groth/Kammel, 1994, S.24.

2.1.3 Begriffsabgrenzung

Die Bedeutung des damals von Womack/Jones/ Roos geprägten Begriffs der Lean Production mit seiner Fokussierung auf die Produktion hat sich im Laufe der Zeit zu einem weitreichenden, unternehmensübergreifenden Management-Konzept, auch „Lean Management“ genannt, ausgedehnt.³⁹ Zudem haben sich Disziplinen wie Lean Administration, Lean IT, Lean Marketing oder Lean Development herausgebildet, die die Lean-Prinzipien auf produktionsfernere Prozesse anwenden, um diese wertschöpfungsorientiert zu gestalten.⁴⁰ Viele Werke behandeln die Begriffe Lean Production und Lean Management als Synonyme.⁴¹ Im weiteren Verlauf der Arbeit soll sich der Begriff Lean Production jedoch ausschließlich auf die nach dem Modell des TPS entwickelten Prinzipien, Konzepte und Methoden, die ihre Anwendung in der Fertigung finden, beziehen.⁴²

2.2 Ziele

2.2.1 Übergeordnete Ziele

Oberstes Ziel des TPS ist die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit durch die Fertigung von Produkten in höchster Qualität, zu niedrigsten Kosten und in kürzester (Durchlauf)-Zeit.⁴³ Das Hauptaugenmerk bei der Verfolgung dieser drei konkurrierenden Zieldimensionen liegt im Rahmen von Lean Production auf einer kontinuierlichen Verbesserung der Effizienz des Produktionssystems durch vollständige Vermeidung von Verschwendungen in den Prozessen und deren konsequente Ausrichtung an den Bedürfnissen des Kunden.⁴⁴ Das TPS definiert dabei drei Verschwendungsformen – nicht wertschöpfende Tätigkeiten (Muda), Überbelastung (Muri) und Unausgeglichenheit (Mura) – deren Vermeidung durch den Einsatz der Lean-Konzepte und -Methoden angestrebt wird.⁴⁵ Diese werden im Folgenden beschrieben.

³⁹ Vgl. Eberhard, 2013, S.19.

⁴⁰ Vgl. Black, 2008, S.9.

⁴¹ z.B.: „Lean Production meint nicht nur den Produktionsprozess im engeren Sinne, sondern ist ein umfassendes Konzept, das alle Bereiche der Wertschöpfung einschließt, also auch die der eigentlichen Produktion vor- und nachgelagerten, wie Marketing und Vertrieb“ (Hartmann, 1992, S.177).

⁴² Vgl. Zäpfel, 2001, S.1.

⁴³ Vgl. Liker, 2014, S.64.

⁴⁴ Vgl. Gorecki/Pautsch, 2011, S.8.

⁴⁵ Vgl. Monden, 1998, S.36.

2.2.2 Vermeidung nicht-wertschöpfender Tätigkeiten (Muda)

Prozesse werden im TPS in wertschöpfende, unterstützende und nicht-wertschöpfende Prozesse gegliedert. Wertschöpfende Prozesse tragen unmittelbar zum Wertzuwachs der Produkte bei. Unterstützende Prozesse tun dies nicht unmittelbar, sind aber für den Produktionsprozess erforderlich. Nicht wertschöpfende Aktivitäten (Muda) sind hingegen all diejenigen, die Fläche, Aufwand oder Zeit in Anspruch nehmen, ohne den Wert des Produktes zu erhöhen. Sie gelten daher als zu vermeidende Verschwendung. Im Rahmen von Muda werden folgende sieben Verschwendungsarten unterschieden, die sich teilweise gegenseitig bedingen:⁴⁶

Transporte sind grundsätzlich unterstützende Prozesse, da Werkstücke, Material oder Werkzeuge zwangsläufig durch die Fertigung transportiert werden müssen. Allerdings sollten unnötige, unausgelastete Transporte oder Umwege vermieden werden. Unnötige Transporte entstehen durch Überproduktion oder ein nicht flussgerechtes Produktionslayout.⁴⁷

Bestände in Form von Material, Zwischen- oder Fertigprodukten verdecken Probleme in der Fertigung, da sie u.a. gehalten werden, um eine unzureichende Liefertreue, hohe Ausschussquoten, schlecht abgestimmte Prozesse oder Maschinenausfälle auszugleichen. Zudem führen sie zu höheren Durchlaufzeiten, Transport und Lagerkosten.⁴⁸

Die Verschwendungsart Bewegung umfasst unnötige Bewegungen bei der Prozessdurchführung wie bspw. unnötige Handgriffe, Suchvorgänge oder Beschaffen von Material und Werkzeugen aus Bereichen abseits des Arbeitsplatzes. Ursache ist eine ineffiziente Arbeitsplatzgestaltung, die auch zu Unfällen oder schlechter Qualität führen kann.⁴⁹

Warten beschreibt sämtliche Zeiträume (Leer- und Liegezeiten), in denen keine Wertschöpfung stattfindet. Leerzeiten entstehen, wenn Mitarbeiter oder Maschinen auf Informationen, Material oder Produkte warten. Liegezeiten von Produkten

⁴⁶ Vgl. Monden, 1998, S.36.

⁴⁷ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.36.

⁴⁸ Vgl. Liker/Meier, 2008, S.67.

⁴⁹ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.37f.

entstehen i.d.R. durch eine unzureichende Abtaktung der Prozessschritte oder Pufferbestände, die vor einem Prozessschritt auf ihre Bearbeitung warten.⁵⁰

Überproduktion entsteht, wenn mehr produziert wird als der Kunde zum jeweiligen Zeitpunkt bereit ist abzunehmen. Sie gilt als Verschwendung, da unklar ist, ob die produzierten Einheiten jemals vom Kunden erworben werden und somit umsatzwirksam werden. Überproduktion bindet Ressourcen in der Fertigung, die zur Befriedigung der tatsächlichen Kundenbedarfe eingesetzt werden könnten und generiert Bestände in der Fertigung.⁵¹

Die Verschwendungsart Unnötige Bearbeitungsschritte bezeichnet Prozesse oder Technologien, die zur Herstellung des Endprodukts unnötig komplex ausfallen⁵² und vom Kunden nicht honoriert werden⁵³. Beispiele sind die Herstellung einer unnötig hohen Oberflächengüte, nur weil die Maschine technisch dazu der Lage ist oder Kontrollmessungen, die für den Einsatzzweck des Produkts irrelevant sind.⁵⁴

Schließlich gelten Fehler als Verschwendung, da die bisher geleistete Wertschöpfung am Produkt unnötige Ressourcen gebunden hat, die keinen Umsatz generieren.⁵⁵ Zudem führen Fehler zu Nacharbeit oder Neuproduktion und somit zu Fehlerbehebungskosten, die nach der sog. 10er-Regel der Fehlerkosten mit jeder Prozessstufe um den Faktor 10 ansteigen.⁵⁶

2.2.3 Vermeidung von Überbelastung (Muri)

Die zweite Verschwendungsform Muri – Verschwendung durch Überbelastung – beschreibt die Belastung von Menschen und Maschinen über ihre natürliche Belastungsgrenze hinaus. Personelle Überbelastung wirkt sich in Stress, schlechtem Betriebsklima, Qualitätsproblemen oder Unfällen aus, während mechanische Überbelastung zu Maschinenausfällen und Defekten führt.⁵⁷

⁵⁰ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.35f.

⁵¹ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.33f.

⁵² Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.36f.

⁵³ Vgl. Liker/Meier, 2008, S.67.

⁵⁴ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.36f.

⁵⁵ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.37f.

⁵⁶ Vgl. Liker/Meier, 2008, S.67.

⁵⁷ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.33.

2.2.4 Vermeidung von Unausgeglichenheit (Mura)

Die dritte Verschwendungsform Mura beschreibt die ungleichmäßige Auslastung von Menschen und Maschinen. Diese entsteht durch unregelmäßige Produktionspläne aufgrund von Absatzschwankungen, ungleiche Prozesszeiten bzw. Arbeitsinhalte oder schwankende Produktionsvolumina durch Maschinenstillstände und Fehlteile. Mura wird als Ursache von Muda und Muri gesehen. Einerseits können nicht wertschöpfende Tätigkeiten (Muda) entstehen, wenn Maschinen, Mitarbeiter und Material vorgehalten werden, obwohl diese durchschnittlich geringer ausgelastet werden. Andererseits kann es in Fällen überdurchschnittlicher Auslastungen zu Überbelastung (Muri) kommen.⁵⁸

2.3 Lean-Prinzipien und -Werkzeuge

2.3.1 Das TPS-Haus

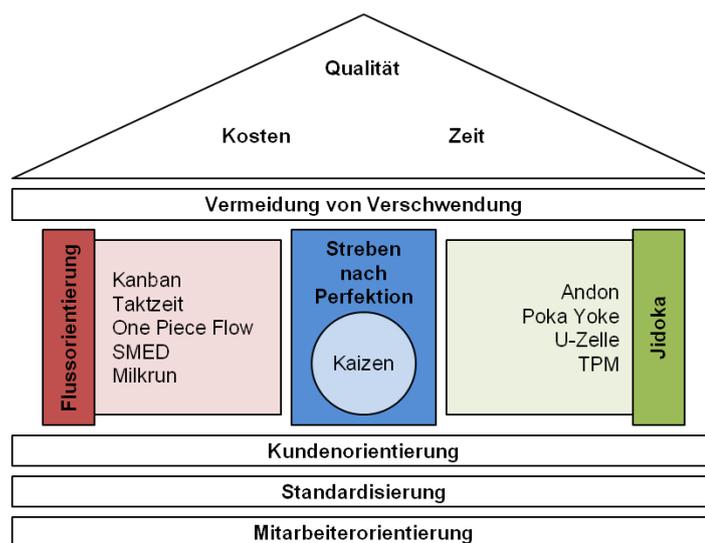


Abb. 1: Das TPS-Haus

Es existieren zahlreiche Versuche, die Lean-Prinzipien und Konzepte systematisch darzustellen. In Anlehnung an diverse Darstellungen von Fujio Chos TPS-Haus⁵⁹ können die Gestaltungsprinzipien der Lean Production, wie in Abb. 1 dargestellt, in drei senkrechte Säulen und ein Fundament aus Querschnittselementen, auf dem diese Säulen aufbauen, gegliedert werden. Die drei Säulen bündeln jeweils diverse Konzepte und Methoden des Lean-Gedankens⁶⁰ (im Folgenden als Lean-Werkzeuge

⁵⁸ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.33.

⁵⁹ Beispielhafte, unterschiedlichen Darstellungen des TPS-Hauses, s. Anhang, S.XXXVIII.

⁶⁰ Im hier dargestellten TPS-Haus sind jene Konzepte und Methoden aufgeführt, die den Grundgedanken der Lean Production am ehesten wiedergeben und für einen systematischen Vergleich mit den

bezeichnet) – deren Zusammenspiel die Vermeidung von Verschwendungen zum Ziel hat. Dies wirkt sich positiv auf die Zieldimensionen Qualität, Kosten und Zeit aus, die das Dach des Hauses bilden. Die Lean-Werkzeuge verfolgen teilweise mehr als ein übergeordnetes Gestaltungsprinzip, weshalb diese in der Literatur unterschiedlich zugeordnet sind.

Das Streben nach Perfektion (s. Kapitel 2.3.2) kann als Kernprinzip der schlanken Produktion gesehen werden. Die äußeren Säulen repräsentieren das logistisch orientierte⁶¹ Prinzip der Flussorientierung (s. Kapitel 2.3.3) und das qualitätsorientierte⁶² Prinzip Jidoka (s. Kapitel 2.3.4). Die Querschnittselemente Kundenorientierung, Prozessorientierung sowie Mitarbeiterorientierung stellen Grundprinzipien der Lean Production dar, die die drei zentralen Säulen miteinander verbinden und Bestandteil jedes Lean-Werkzeugs sind. In erster Linie basieren die Werkzeuge der zentralen Säulen auf einer bedingungslosen Orientierung an den Kundenbedürfnissen, denn Wertschöpfung definiert sich aus der Sicht des Kunden (Kundenorientierung).⁶³ Um langfristig verschwendungsarme Prozesse zu erreichen, müssen diese im Rahmen der Lean-Werkzeuge standardisiert werden⁶⁴, da Standards Arbeitsabläufe stabilisieren und Abweichungen durch die Einhaltung aller Beteiligten begrenzen⁶⁵ (Standardisierung). Schließlich müssen Standards von den Mitarbeitern ausgeführt, gelebt und ständig weiterentwickelt werden, weshalb die Lean-Philosophie den Mitarbeiter als wichtigsten Produktionsfaktor anerkennt (Mitarbeiterorientierung).⁶⁶

2.3.2 Streben nach Perfektion – Kaizen

Womack und Jones beschreiben das Streben nach Perfektion als zentralen Grundgedanken des Lean-Thinkings.⁶⁷ Die Umsetzung der Lean Prinzipien ist dabei keine einmalige Aktivität, sondern ein fortlaufender Prozess.⁶⁸ Obwohl Perfektion nie erreicht werden kann, soll das Streben danach die nötige Inspiration für die

Technologieparadigmen von Industrie 4.0 geeignet sind. Daher sind Konzepte wie bspw. Just-in-Time-Anlieferungen oder 5S nicht Teil dieser Arbeit.

⁶¹ Vgl. Erlach, 2010, S.303.

⁶² Vgl. Erlach, 2010, S.303.

⁶³ Vgl. Womack/Jones, 2004, S.25f.

⁶⁴ Vgl. Gerberich, 2011, S.103.

⁶⁵ Vgl. Krebs et al., 2011, S.912ff.

⁶⁶ Vgl. Gerberich, 2011, S.103.

⁶⁷ Vgl. Womack/Jones, 2004, S.115ff.

⁶⁸ Vgl. Dickmann, 2009, S.20.

gewünschten Fortschritte geben und bei den Mitarbeitern ein Bewusstsein für Verschwendungen schaffen.⁶⁹

Kaizen, was so viel wie „Veränderung zum Besseren“ bedeutet, verkörpert dieses Streben nach Perfektion.⁷⁰ Gemeint ist damit eine Denkweise der Lean-Philosophie, nach der die kontinuierliche Suche nach Verbesserungsmöglichkeiten in allen Bereichen und von den Mitarbeitern aller Hierarchiestufen verinnerlicht werden soll.⁷¹ Kaizen zielt mithilfe eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP) darauf ab, die Kundenforderungen durch schrittweise Perfektionierung bestehender Produkte und Prozesse zu erfüllen. Dies soll durch permanentes Aufdecken und Eliminieren von Verschwendungen gelingen. Zudem trägt Kaizen zu einer höheren Identifikation der Mitarbeiter mit den Tätigkeiten bei, da im Rahmen des KVP alle Mitarbeiter zu Verbesserungsvorschlägen angeregt werden.⁷² Wichtiger Bestandteil von Kaizen ist das Gemba-Prinzip: Verbesserungspotenziale sollen am Ort des Geschehens (jap. Gemba) identifiziert und Optimierungsansätze dort entwickelt werden, da die Ursachen für Verschwendungen direkt am Ort der Wertschöpfung am besten analysiert werden können.^{73,74} Bei der Ursachen- und Lösungsfindung soll auf die Kompetenz der Mitarbeiter vor Ort zurückgegriffen werden, da diese täglich mit den Prozessen konfrontiert sind und mit ihrem Fachwissen viele Verbesserungsvorschläge einbringen sowie Hindernisse beurteilen können.⁷⁵

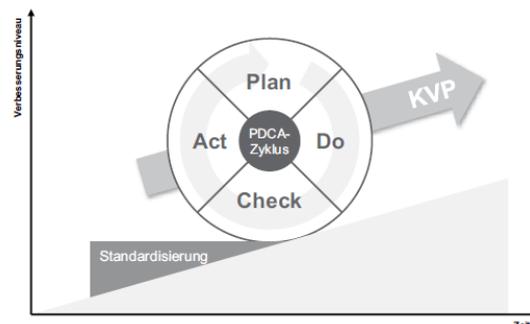


Abb. 2: KVP im PDCA-Zyklus

Eine systematische Vorgehensweise des KVP stellt der in Abb. 2 dargestellte PDCA-Kreis nach Deming dar. Er umschreibt einen sich ständig wiederholenden Zyklus, der in die Phasen Plan, Do, Check, Act gegliedert ist. Zu Beginn eines jeden

⁶⁹ Vgl. Womack/Jones, 2004, S.115ff.

⁷⁰ Vgl. Kaminske, Brauer, 2003, S.96.

⁷¹ Vgl. Imai, 1993, S.15.

⁷² Vgl. Rothlauf, 2004, S.380ff.

⁷³ Vgl. Womack, 2006, S.30.

⁷⁴ Vgl. Takeda, 2009, S.166.

⁷⁵ Vgl. Dickmann, 2009, S.20f.

Verbesserungsvorhabens wird der Prozess abgebildet, Potenziale aufgedeckt, Ziele festgelegt und die Methoden zur Umsetzung der Verbesserungsvorschläge ausgewählt (Plan). Im zweiten Schritt wird der Plan mit schnell realisierbaren Mitteln in kleinem Umfang umgesetzt und der neue Prozess getestet (Do). Daraufhin wird der neue Prozess auf die Realisierung der festgelegten Ziele überprüft sowie Abweichungen und deren Ursachen mithilfe systematischer Instrumente (z.B. Ursache-Wirkungs-Diagramme) aufgedeckt und eliminiert (Check). Die letzte Phase des Zyklus sieht vor, Maßnahmen für ein erneutes Auftreten der Probleme zu definieren und den neuen Prozess als Standard zu implementieren (Act). Im Anschluss beginnt der Zyklus erneut, um weitere Verbesserungen des Prozesses bzw. ein neues Optimierungsvorhaben zu planen.⁷⁶

Im Rahmen des KVP kann zwischen Mitarbeiter-KVP und Experten-KVP unterschieden werden. Im Mitarbeiter-KVP bilden die Shopfloor-nahen Mitarbeiter die treibende Kraft im Verbesserungsprozess.⁷⁷ Dabei stellt das sog. KVP-Board ein wichtiges Hilfsmittel zur Visualisierung der Status einzelner Verbesserungsprojekte und Ablaufplanung des KVP auf dem Shopfloor dar.⁷⁸ Beim Experten-KVP werden hingegen Führungskräfte oder besonders qualifizierte Mitarbeiter auf dem Shopfloor aktiv, um komplexere und aufwendigere Verbesserungsprojekte durchzuführen. Ziel ist hierbei meist die Analyse eines ganzen Prozessabschnittes und dessen Optimierung.⁷⁹ Die sog. Wertstromanalyse, die mit Durchschnittswerten und Verallgemeinerungen arbeitet, stellt hierbei ein aufwandsarmes und übersichtliches Lean-Werkzeug zur Erfassung des Ist-Zustands dar.⁸⁰

2.3.3 Flussorientierung

2.3.3.1 Bedeutung

Die Flussorientierung als elementares Prinzip der Lean Production wird durch die linke Säule des TPS-Haus dargestellt. Sie vereint Lean-Werkzeuge, die einen kontinuierlichen, gleichmäßigen Fluss von Material, Produkten, Arbeitsschritten und den zugehörigen Informationen ermöglichen. Das Hauptaugenmerk der

⁷⁶ Vgl. Binner, 2002, S.32.

⁷⁷ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.56.

⁷⁸ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.60.

⁷⁹ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.56.

⁸⁰ Vgl. Erlach, 2010, S.31f.

Flussorientierung liegt auf der Eliminierung von Unterbrechungen im Fluss, da diese zu Wartezeiten und somit nach der Lean-Philosophie zu Verschwendungen führen.⁸¹ In der Folge können Umlaufbestände und somit Durchlaufzeiten reduziert werden.⁸² Der Wertschöpfungsprozess wird u.a. zum Fließen gebracht, indem die Fertigung objekt- statt verrichtungsorientiert organisiert wird⁸³, Kapazitäten entflochten, d.h. eindimensionale Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen der Arbeitsplätze aufgebaut werden⁸⁴, Prozessschritte aufeinander abgestimmt⁸⁵ sowie Losgrößen und Rüstzeiten verringert werden. Dadurch sollen Durchlaufzeiten verkürzt, die tatsächliche Nachfragemenge der Kunden in die Fertigung übertragen und eine flexible Reaktion auf Nachfrageänderungen ermöglicht werden.^{86,87,88} Im Folgenden werden die der Flussorientierung zugehörigen Lean-Werkzeuge erläutert.

2.3.3.2 Taktzeit

Eine kundenorientierte Produktion zielt im Sinne von Lean Production darauf ab, genau die Menge an Produkten herzustellen, die von den Kunden nachgefragt werden.⁸⁹ Daher erfolgt eine Ausrichtung der Produktion am sog. Kundentakt. Dieser gibt die Zeit an, in der ein Produkt fertiggestellt werden muss, um dem Kundenbedarf im betrachteten Zeitraum zu entsprechen.⁹⁰ Die Produktionsquote wird mit der Verkaufsquote synchronisiert.⁹¹ Folglich berechnet sich der Kundentakt über die Formel

$$\text{Kundentakt} = \frac{\text{effektive Arbeitszeit im Betrachtungszeitraum}}{\text{kumulierte Nachfragemenge im Betrachtungszeitraum}} \quad (1).^{92}$$

Der Kundentakt gibt auch die Taktzeit vor, in der ein Produkt idealerweise jeden Bearbeitungsschritt durchlaufen sollte, um die Kundennachfrage termin- und mengengerecht zu erfüllen. Dies soll einen möglichst gleichmäßigen

⁸¹ Vgl. Womack/Jones, 2004, S.31.

⁸² Vgl. Liker, 2014, S.120ff.

⁸³ Vgl. Womack/Jones, 2004, S.79.

⁸⁴ Vgl. Womack/Jones, 2004, S.76f.

⁸⁵ Vgl. Syska, 2006, S.145f.

⁸⁶ Vgl. Gerberich, 2011, S.125.

⁸⁷ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.96f.

⁸⁸ Vgl. Womack/Jones, 2004, S.77f.

⁸⁹ Vgl. Syska, 2006, S.145ff.

⁹⁰ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.100.

⁹¹ Vgl. Womack/Jones, 2004, S.71f.

⁹² Vgl. Maier/Erlach/Ehrt, 2015, S.28.

Produktionsrhythmus ermöglichen.^{93,94} Da der Berechnung des Kundentakts ein kumulierter Bedarf aller Kundenaufträge zugrundegelegt wird, wird eine termin- und mengengerechte Erfüllung aller Kundenaufträge jedoch nur bei einer exakt gleichmäßigen Nachfrage innerhalb der definierten Zeitperiode erreicht.⁹⁵ Eine schwankende Nachfrage innerhalb der Zeitperiode würde hingegen zeitweise zu Über- oder Unterproduktion (Muda) führen. Daher wird eine konstante Taktzeit im Falle von Nachfrageschwankungen häufig mithilfe einer sog. Glättung und Nivellierung des Produktionsprogramms (Heijunka) und eines Endwarenlagers, welches die gleichmäßige Produktion von der Nachfrage entkoppelt, realisiert.^{96,97} Dabei werden die schwankenden Fertigungsaufträge unter Berücksichtigung der Liefertermine in ein regelmäßiges Produktionsprogramm mit gleichen Tagesmengen überführt (Nivellierung) und in kleine, wiederkehrende Lose⁹⁸ aufgeteilt (Glättung). Dies vermeidet Mura (Unausgeglichenheit) und Überbelastung (Muri) und ermöglicht es, eine getaktete, gleichmäßige Produktion bei geringen Umlaufbeständen und Durchlaufzeiten trotz schwankender Nachfrage aufrecht zu erhalten.^{99,100} Eine Variation des Kapazitätsangebots (Arbeitszeitverkürzung oder -verlängerung) entsprechend der Nachfrageschwankungen stellt eine mögliche Alternative zu Heijunka zur Sicherstellung konstanter Taktzeiten dar.^{101,102} Theoretisch ist auch eine tägliche Anpassung der Taktzeit an das schwankende Auftragsvolumen denkbar.¹⁰³

Infolge der Produktionstaktung entsteht zunächst ein harmonisierter, kontinuierlicher Produktionsfluss. Darüber hinaus ist sogar die Realisierung eines One Piece Flow (s. Kapitel 2.3.3.3) möglich, wenn die Zykluszeiten¹⁰⁴ verketteter Arbeitsstationen durchgängig an die Taktzeit angeglichen werden können.¹⁰⁵ Dadurch können Pufferlager und Durchlaufzeiten weiter reduziert werden.¹⁰⁶

⁹³ Vgl. Syska, 2006, S.145ff.

⁹⁴ Vgl. Maier/Erlach/Ehrat, 2015, S.28.

⁹⁵ Vgl. Erlach, 2010 S.48.

⁹⁶ Vgl. Liker/Meier, 2008, S.198.

⁹⁷ Vgl. Erlach, 2010, S.53.

⁹⁸ Fertigungslos: Die Menge einer Charge, Serie, Sorte, die hintereinander ohne Umrüstung der Fertigung hergestellt wird (vgl. Erlach, 2010, S.67).

⁹⁹ Vgl. Syska, 2007, S.56f.

¹⁰⁰ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.118f.

¹⁰¹ Vgl. Erlach, 2010, S.54.

¹⁰² Vgl. Maier/Erlach/Ehrat, 2015, S.28.

¹⁰³ Vgl. Gerberich, 2011, S.137.

¹⁰⁴ Zykluszeit: Zeitintervall, in dem ein Teil oder ein Produkt in einem Produktionsprozess fertiggestellt wird (vgl. Erlach, 2010, S.62).

¹⁰⁵ Vgl. Syska, 2006, S.145f.

¹⁰⁶ Vgl. Takeda, 2009, S. 109.

Werden Produktionsprozesse von einigen Varianten (einer Produktfamilie) nicht benötigt bzw. übersprungen oder gibt es für einige komplexere Varianten zusätzliche Produktionsprozesse, muss die Leistungsanforderung an diesen Produktionsprozessen über einen prozessspezifischen Kundentakt korrigiert werden. Gleiches gilt, wenn ein Wertstrom zum Teil aus parallelen Zweigen besteht oder es abweichende Zykluszeiten an einer Station gibt. Zusätzlich muss der Produktionsfluss aufgrund der unterschiedlichen Taktzeiten dann über ein Kanban-System (s. Kapitel 2.3.4.) mit Pufferlager entkoppelt werden.¹⁰⁷

2.3.3.3 One Piece Flow

Abb. 3 zeigt das Grundprinzip des One Piece Flow im Vergleich zur konventionellen Losproduktion. Bei der Fertigung in einer bestimmten Losgröße werden nur wenige Teile eines Loses zeitgleich bearbeitet. Den Großteil der Zeit wartet ein Teil auf seine Bearbeitung oder auf die Fertigstellung der anderen Teile des Loses, um im Verbund weitergegeben werden zu können. Diese Wartezeit und ein damit verbundener Bestandsaufbau zwischen den Prozessschritten (Muda) kann vermieden werden, indem Teile nach ihrer Bearbeitung sofort weitertransportiert werden.¹⁰⁸

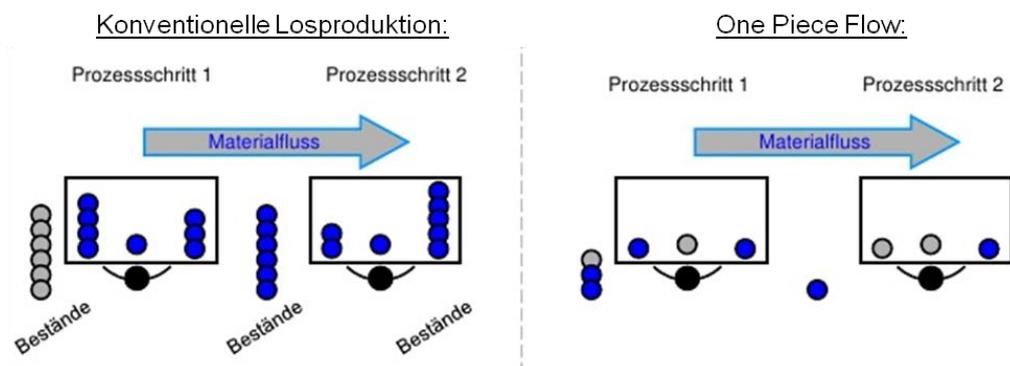


Abb. 3: Grundprinzip des One Piece Flow im Vergleich zur konventionellen Losproduktion

Diese Vorgehensweise spiegelt der One Piece Flow, zu Deutsch „Einzelstückfluss“, wieder. Er repräsentiert die Idealform des Fließprinzips, da nach diesem Prinzip jedes Teil nach seiner Bearbeitung einzeln, d.h. ohne Zwischenlagerung an den Folgeprozess zur dortigen Bearbeitung weitergeleitet wird. Dadurch reduziert sich die Gesamtzeit, die ein Teil im System verbringt und somit seine Durchlaufzeit. Transportvorgänge für jedes Teil auszulösen ist aufgrund des insgesamt höheren

¹⁰⁷ Vgl. Erlach, 2010, S.77.

¹⁰⁸ Vgl. Thonemann, 2010, S.344.

Transportaufwandes für das Los i.d.R. nur dann lohnend, wenn die Arbeitsplätze eng beieinander liegen.¹⁰⁹ Zudem ist ein Chargenprozess, d.h. die Bearbeitung von mehreren Teilen im Verbund, für die Realisierung eines One Piece Flow hinderlich, da in diesem Fall mehrere Teile zur selben Zeit fertiggestellt werden und zur Weitergabe bereitliegen.¹¹⁰

Entgegen einiger Auffassungen in der Literatur¹¹¹, ist der One Piece Flow nicht zwangsläufig mit einer Fertigungslosgröße von eins gleichzusetzen. Aufeinanderfolgende Teile fließen zwar einzeln, können jedoch durchaus zur selben Variante gehören und somit ohne Erfordernis einer Umrüstung nacheinander gefertigt werden. Die Einheit von Transport- und Fertigungslos wird für die Realisierung des One Piece Flow also lediglich aufgelöst.¹¹² Nichtsdestotrotz bewirkt eine Fertigungslosgröße von eins i.d.R. einen One Piece Flow, da das Einzellos nach seiner Bearbeitung nicht auf weitere Teile warten muss und folglich sofort weitergegeben werden kann.¹¹³ Die Einführung eines One Piece Flow unterstützt zudem die Fertigung kleiner Lose hinsichtlich der Zielsetzung kurzer Durchlaufzeiten und maximaler Flexibilität.¹¹⁴

Eine One Piece Flow-Strecke kann organisatorisch auf drei unterschiedliche Arten gestaltet werden. Oftmals wird der One Piece Flow mit der Festplatzvariante, bei der jedem Mitarbeiter eine Station fest zugewiesen ist, gleichgesetzt. Der begrenzte Arbeitsinhalt des Mitarbeiters erhöht seine Routine. Zudem entfallen Wege zwischen den Stationen, sodass diese Variante die theoretisch höchste Ausbringung aufweist. Allerdings existieren auch Varianten eines flexibleren Personaleinsatzes. Um Wartezeiten wertschöpfend zu nutzen, können die Mitarbeiter zwischen den Stationen wechseln. Denkbar ist sogar ein mitarbeitergebundener Arbeitsfluss, bei dem ein Mitarbeiter das Werkstück bei seiner Bearbeitung auf der ganzen One Piece Flow-Strecke begleitet.¹¹⁵ Da sog. U-Zellen aufgrund ihres Layouts insbesondere die letzten beiden Varianten durch kurze Wege und bessere Kommunikationsmöglichkeiten ansprechen, wird ein diesbezüglicher One Piece Flow

¹⁰⁹ Vgl. Dickmann, 2009, S.18.

¹¹⁰ Vgl. Eberhard, 2013, S.11.

¹¹¹ z.B.: „One Piece Flow heißt mit der Losgröße eins zu produzieren“ (Grabner, 2012, S.183).

¹¹² Vgl. Thonemann, 2010, S.344.

¹¹³ Vgl. Lödding, 2005, S.99.

¹¹⁴ Vgl. Dickmann, 2009, S.18.

¹¹⁵ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.103f.

dem Konzept der U-Zelle zugeordnet (s. Kapitel 2.3.4.5). Da bei der Betrachtung eines One Piece Flow i.d.R. die Festplatzvariante angenommen wird, beschränken sich weitere Ausführungen in dieser Arbeit, die explizit mit dem One Piece Flow in Verbindung gebracht werden, auf diese Variante (s. Kapitel 4.5.2).

Ein One Piece Flow ist dann ideal, wenn er völlig ohne Pufferbestände (Muda) auskommt. Diese können bei der Festplatzvariante nur dann entstehen, wenn aufeinanderfolgende Arbeitsstationen ungleiche Bearbeitungszeiten je Stück aufweisen, unterschiedliche Rüstzeiten benötigen oder sequentiell gerüstet werden.^{116,117} Daher sollten die verketteten Arbeitsstationen gleiche Taktzeiten (vgl. Kapitel 2.3.3.2) als Vorgabe für die jeweiligen Bearbeitungszeiten aufweisen.¹¹⁸ Der Umlaufbestand innerhalb einer Linie entspricht dann der Anzahl der Arbeitsplätze.¹¹⁹ Allerdings sind One Piece Flow-Strecken sehr fragil gegenüber schwankenden Bearbeitungszeiten und Störungen, da sich diese direkt auswirken.¹²⁰ Um Unregelmäßigkeiten auszugleichen¹²¹ werden in der Praxis daher notwendigerweise standardisierte Puffer¹²² der Größe eins¹²³ zwischen den Arbeitsstationen eingesetzt und die Nachproduktion jeweils bei Entnahme angestoßen.¹²⁴ Je weiter die Prozesse auseinander liegen und je schwankender die Bearbeitungszeiten der aufeinanderfolgenden Arbeitsplätze sind, desto eher ist ein Nachfragesog mithilfe von Kanban (s. Kapitel 2.3.3.4) einzusetzen.¹²⁵ Daher finden sich oft abgegrenzte One Piece Flow-Strecken in Kombination mit vor- und nachgelagerten Kanban-Regelkreisen wieder.¹²⁶

¹¹⁶ Vgl. Lödding, 2005, S.101.

¹¹⁷ Vgl. Gerberich, 2011, S.131f.

¹¹⁸ Vgl. Dickmann, 2009, S.18.

¹¹⁹ Vgl. Gerberich, 2011, S.131.

¹²⁰ Vgl. Lödding, 2005, S.101.

¹²¹ Vgl. Liker, 2014, S.180.

¹²² Vgl. Yagyu, 2007, S.176.

¹²³ Vgl. Takeda, 2009, S.58.

¹²⁴ Vgl. Liker/Meier, 2008, S.123.

¹²⁵ Vgl. Liker, 2014, S.181.

¹²⁶ Vgl. Dickmann, 2009, S.18.

2.3.3.4 Kanban-Steuerung

Charakteristisch für eine schlanke Produktion ist auch eine Umstellung der Produktionssteuerung vom Push-Prinzip auf das Pull-Prinzip.¹²⁷ Im Gegensatz zum Push-Prinzip¹²⁸ sieht das Pull-Prinzip vor, Produktionsvorgänge direkt oder indirekt durch einen eingehenden Kundenauftrag auszulösen. Dazu wird auf Basis eingegangener Kundenaufträge ein geglätteter und nivellierter Produktionsplan für die letzte Produktionsstufe (z.B. Endmontage) im Rahmen von Heijunka (vgl. Kapitel 2.3.3.2) erstellt.¹²⁹ Die Entnahme von Vorprodukten durch die letzte Produktionsstufe zur Erfüllung des Produktionsplans erzeugt eine Nachfrage in der vorgelagerten Produktionsstufe und löst dort eine Nachproduktion aus. Dieses Prinzip setzt sich kaskadenförmig über die jeweils vorgelagerten Produktionsstufen fort, wodurch ineinander verwobene, sich selbst steuernde Regelkreise mit gegenläufigem Material- und Informationsfluss entstehen.^{130,131} Die Aufträge werden sozusagen durch die Produktion gezogen (Englisch „Pull“). Demnach stellt die Produktion ein Abbild des tatsächlichen Verbrauchs dar, sodass im Vergleich zum Push-Prinzip Absatzrisiken vorgefertigter Produkte im Sinne von Überproduktion (Muda) minimiert sowie Umlaufbestände und Durchlaufzeiten drastisch reduziert werden können.^{132,133}

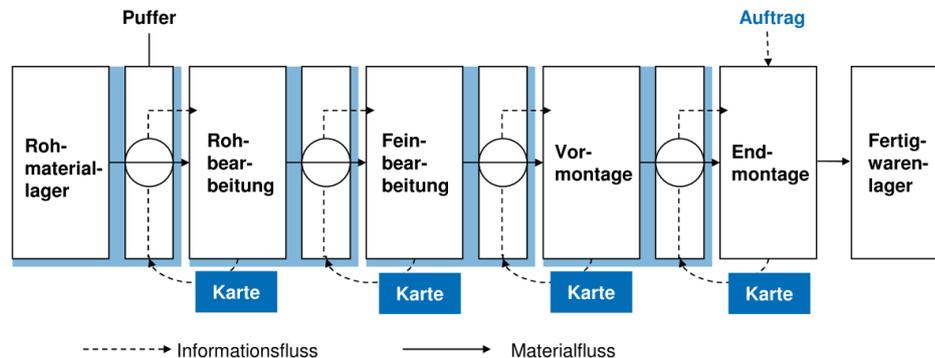


Abb. 4: Grundprinzip eines Kanban-Systems

Die klassische Umsetzung des Pull-Prinzips im TPS erfolgt durch sog. Kanban-Systeme. Abb. 4 zeigt dessen Grundprinzip: In der ursprünglichen Form von Kanban (japanisch für „Karte“) werden die jeweiligen Produktionsstufen mithilfe von Karten

¹²⁷ Vgl. Dickmann, 2009, S.17.

¹²⁸ Push-Prinzip: Hierbei werden die Produktionsaufträge mithilfe eines zentral erstellten Produktionsplans für jede Produktionsstufe zeitlich determiniert und somit von der ersten bis zur letzten Produktionsstufe durch den Produktionsprozess „geschoben“ (Englisch „Push“) (Vgl. Günther/Tempelmaier, 2011, S.336).

¹²⁹ Vgl. Yagyu, 2007, S.76.

¹³⁰ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.111.

¹³¹ Vgl. Günther/Tempelmaier, 2011, S.336.

¹³² Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.45.

¹³³ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.110f.

verknüpft. Charakteristischerweise besitzt jeder Regelkreis einen sog. Supermarkt¹³⁴, ein nach dem First-In-First-Out (FIFO)-Prinzip aufgebautes Pufferlager zur Versorgung mit Vorprodukten, die für jede zu fertigende Variante in definierten Mengen und standardisierten Behältern vorliegen. Die Kanban-Karten sind i.d.R. jeweils einem bestimmten Behälter zugeordnet. Sie dienen einerseits als Informationsträger (z.B. Behältermenge, Anzahl umlaufender Kanban-Karten oder Teilenummer). Andererseits löst die Kanban-Karte die Nachproduktion der Behältermenge aus, indem sie bei Verbrauch des Inhalts aus dem Pufferlager an die vorgelagerte Produktionsstufe weitergeleitet und dort i.d.R. in eine übersichtlich gestaltete Kanban-Plantafel gesteckt wird.¹³⁵

Supermärkte kommen als Schnittstellen zwischen Produktionsstufen dort zum Einsatz, wo es nicht möglich ist, einen One Piece Flow zum angrenzenden Produktionsprozess zu realisieren. Gründe dafür können unterschiedliche oder schwankende Takt- oder Rüstzeiten oder notwendige Transportprozesse sein, die dazu führen, dass die Wiederbeschaffungszeit der Vorprodukte länger ist, als die Zeit in der diese verbraucht werden.¹³⁶

Die Kanban-Bestände zur Entkopplung zweier Produktionsstufen sollten so dimensioniert werden, dass einerseits Engpässe in der Nachversorgung, andererseits aber auch unnötige Bestände vermieden werden. Der optimale Bestand eines Produkts und Regelkreises entspricht der optimalen Anzahl an Kanban-Karten¹³⁷, die sich für jedes Teil aus der Formel

Anz. Karten je Teilenr.

$$= \frac{\text{Verbrauch pro Zeiteinheit} \cdot \text{Wiederbeschaffungszeit} + \text{Sicherheitsbestand}}{\text{Standardmenge}} \quad (2)$$

ergibt. Die Standardmenge bezeichnet dabei die Anzahl der Teile in einem Kanban-Behälter und somit gleichzeitig die nachzuproduzierende Menge je Kanban-Karte.¹³⁸

Die durch Heijunka bestimmte Losgröße ergibt sich folglich als ganzzahliges

¹³⁴ Supermarkt: Dieses Bild lässt sich dadurch erklären, dass die benötigten Güter ebenso wie in Regalen eines Supermarktes bereit gestellt werden, nachdem sich Kunden daraus bedient haben (vgl. Erlach, 2010, S.190).

¹³⁵ Vgl. Klaus/Krieger/Krupp, 2012, S.259.

¹³⁶ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.100.

¹³⁷ Vgl. Dickmann, 2009, S.168.

¹³⁸ Vgl. Klug, 2010, S.182.

Vielfaches dieser Menge.¹³⁹ Der Verbrauch pro Zeiteinheit entspricht der Anzahl an Teilen, die von der Produktionsstufe im betrachteten Zeitraum verbraucht werden. Die Wiederbeschaffungszeit ist die Zeit, in der die Lücke eines entnommenen Behälters wieder aufgefüllt werden kann und ist daher abhängig von Takt-, Rüst- und Transportzeiten. Je länger die Wiederbeschaffungszeit ist, desto mehr Karten werden benötigt. Schließlich dient der Sicherheitsbestand der Abdeckung von Störungen des Behälterflusses im Regelkreis und von Bedarfsschwankungen, die durch unterschiedliche Bearbeitungszeiten verschiedener Varianten ausgelöst werden. Je größer die Schwankungsbreite der Umlaufzeit ist, desto größer muss der Sicherheitsbestand gewählt werden. Wichtig ist, dass bei der Kanban-Steuerung Bedarfsschwankungen nicht über die Anpassung der Losgröße, sondern ausschließlich über die Erhöhung oder Verringerung der Umlauffrequenz eines Kanban-Behälters ausgeglichen werden. Da nach Überschreiten einer kritischen Bedarfsgrenze die Versorgung jedoch nicht mehr rechtzeitig sichergestellt werden kann, darf die Bedarfsmenge bei Kanban nur innerhalb einer bestimmten Schwankungsbreite variieren. Prinzipiell ist eine Kompensation eines solchen Versorgungseingpasses durch eine Erhöhung des Sicherheitsbestands und somit der Bestandsmengen im Kreislauf möglich. Diese Vorgehensweise widerspricht jedoch dem Kanban-Ziel einer bestandsminimalen Fertigung.¹⁴⁰ Da außerdem für jede Variante eigene Bestände in den Supermärkten gehalten werden müssen, nimmt die Tauglichkeit von Kanban mit hoher Variantenvielfalt ab.¹⁴¹

2.3.3.5 Milkrun

Das Milkrun-Konzept wird im Rahmen des TPS für den innerbetrieblichen Materialtransport verwendet. Der Begriff Milkrun entwickelte sich in Anlehnung an das Prinzip des täglichen Milchauffüllens in amerikanischen Gemeinden. Dieses sieht vor, nur dann eine Flasche Milch auszuliefern, wenn zuvor ein Bedarf durch eine leere Flasche signalisiert wurde.¹⁴² Demnach wird unter einem Milkrun ein innerbetriebliches Transportsystem verstanden, bei dem die verbrauchsgesteuerte, sequenzielle Belieferung von mehr als zwei Senken mit unterschiedlichen Materialien

¹³⁹ Vgl. Klaus/Krieger, 2004, S.287.

¹⁴⁰ Vgl. Klug, 2010, S.181f.

¹⁴¹ Vgl. Erlach, 2010, S.191.

¹⁴² Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.118.

durch ein gemeinsames, zirkulierendes Transportmittel erfolgt.¹⁴³ Statt einzelner Transporte von und zu einzelnen Anlagen, erfolgt ein zyklischer Linienverkehr¹⁴⁴ i.d.R. in festen Zeitintervallen und auf einer festgelegten Route zwischen Lager und Arbeitsstationen. Die Verbrauchssteuerung erfolgt grundsätzlich per Kanban, d.h. der Milkrun-Fahrer sammelt die Kanban-Karten und die leeren Behälter der verbrauchten Materialien an den Arbeitsstationen ein, holt die entsprechend der Kanban-Informationen vorkommissionierten Ladungsträger in einem zentralen Lager ab und liefert diese an die Pufferlager der Arbeitsplätze.¹⁴⁵ Der Milkrun unterstützt demzufolge den Fluss in kleinen Kanban-Losen, wodurch ein unnötig hoher Materialbestand an den Arbeitsplätzen (Muda) vermieden wird.¹⁴⁶ Zudem bewirkt das Konzept eine Bündelung von Transporten. Dadurch können Leerfahrten vermieden, die Anzahl an Transporten verringert und ein gleichmäßiger Materialfluss (Vermeidung von Mura) sichergestellt werden.¹⁴⁷ Abgesehen vom Materialtransport aus einem zentralen Lager kann der Milkrun im Rahmen der Produktionssteuerung durch Kanban auch das Einsammeln und den Weitertransport von Zwischenprodukten zwischen den Arbeitsstationen übernehmen.¹⁴⁸ Um eine systematische Analyse im Rahmen dieser Arbeit zu ermöglichen, ist daher eine differenzierte Abgrenzung gegenüber dem zur Produktionssteuerung genutzten Kanban-System (vgl. Kapitel 2.3.3.4) notwendig. Aus diesem Grund wird das Milkrun-Konzept im Folgenden ausschließlich auf den Materialtransport aus einer zentralen Quelle und nicht auf den Transport von Zwischenprodukten zwischen Arbeitsstationen angewendet.

2.3.3.6 SMED

Die Auflage verkleinerter Lose als Folge der Anwendung von Heijunka und Kanban für eine flexiblere Reaktion auf Bedarfsschwankungen und eine Verringerung der Bestände führt zu einer erhöhten Rüsthäufigkeit.^{149,150} Da Umrüstungen jedoch zu Wartezeiten (Muda) und zum Verlust kostenintensiver Produktionszeit führen, müssen Umrüstzeiten auf das absolute Minimum, das die Maschinen zulassen,

¹⁴³ Vgl. Wiegel et al., 2013, S.51f.

¹⁴⁴ Vgl. Syska, 2006, S.61f.

¹⁴⁵ Vgl. Wiegel et al., 2013, S.51f.

¹⁴⁶ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.118.

¹⁴⁷ Vgl. Wiegel et al., 2013, S.51f.

¹⁴⁸ Vgl. Frank, 2014, S.19.

¹⁴⁹ Vgl. Dickmann, 2009, S.249.

¹⁵⁰ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.118.

reduziert werden.¹⁵¹ Dieser Forderung geht die Methode SMED nach. SMED steht für „Single-Minute-of-Dies“, zu Deutsch „Ein-Minuten-Austausch-von-Formen“.¹⁵² Ziel der Methode ist es, Vorrichtungen und Formen im einstelligen Minutenbereich – bestenfalls sogar innerhalb einer Minute – auszutauschen, um das Betriebsmittel auf die Produktion des nachfolgenden Produkts vorzubereiten.¹⁵³ Nach diesem Ansatz lassen sich Rüstvorgänge in zwei Arten unterscheiden. Interne Rüsttätigkeiten, wie bspw. der eigentliche Werkzeugwechsel, das Justieren der Werkzeuge oder das Einstellen der Prozessparameter, können i.d.R. nur bei stillstehender Maschine vorgenommen werden. Die Durchführung von externen Rüstvorgängen, wie z.B. die Bereitstellung und Vorbereitung aller benötigten Werkzeuge, Materialien und Informationen ist hingegen auch bei laufender Produktion, d.h. außerhalb der Anlage denkbar.¹⁵⁴

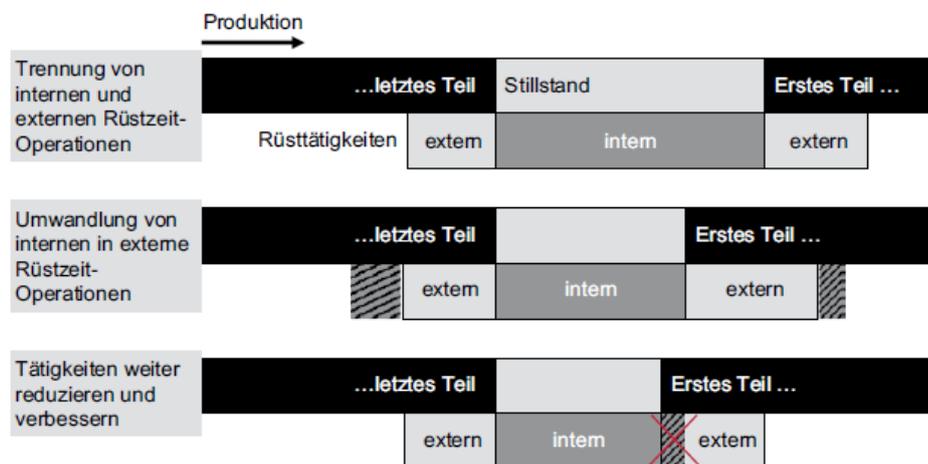


Abb. 5: Schritte zur Realisierung von SMED

Im Rahmen von SMED werden folgende, in Abb. 5 dargestellten Schritte durchlaufen: Zuerst ist der Rüstprozess zeitlich zu analysieren und in externe und interne Anteile zu gliedern. Da insbesondere interne Rüstzeiten für den Produktionsfluss kritisch sind, sollte im zweiten Schritt versucht werden, diese durch gezielte Maßnahmen in externe Rüstzeiten, bspw. durch Vormontage von Werkzeugen, umzuwandeln. Daraufhin sollten Verschwendungen in den einzelnen Arbeitsschritten mit Fokus auf die internen Rüsttätigkeiten identifiziert und minimiert werden. Hierzu werden u.a. spezielle Werkzeuge und Vorrichtungen sowie funktionale Elemente zur einfachen Befestigung, Lösung und Justierung der

¹⁵¹ Vgl. Womack/Jones, 2004, S.78f.

¹⁵² Vgl. Womack/Jones, 2004, S.419.

¹⁵³ Vgl. Gerberich, 2011, S.157.

¹⁵⁴ Vgl. Syska, 2006, S.129.

Werkstücke eingesetzt.^{155,156} Das erreichte Ergebnis muss schließlich als künftiger Standard für diesen Rüstvorgang definiert werden und gilt als Basis für Kaizen-Maßnahmen zur kontinuierlichen Verkürzung des Rüstvorgangs.¹⁵⁷

2.3.4 Jidoka

2.3.4.1 Bedeutung

Jidoka, auch „Autonomation“ genannt, stellt die rechte Säule der Lean-Philosophie dar. Der Begriff Autonomation steht für „autonome Automation“ und beschreibt eine Automatisierung mit menschlichem Touch. Die ursprüngliche Idee von Jidoka ist es, Maschinen mit einem System auszustatten, welches den Fertigungsprozess bei eintretenden Problemen autonom, d.h. selbstständig, stoppt, um die Weiterverarbeitung fehlerhafter Teile (Muda) und somit die Herstellung qualitativ unzureichender Produkte zu verhindern.¹⁵⁸ Darüber hinaus werden auch die Mitarbeiter dazu befähigt, die Produktionsanlagen bei Erkennen eines Fehlers anzuhalten. Ziel von Jidoka ist eine prozessimmanente Qualität an jeder Arbeitsstation¹⁵⁹, um den Anstieg der Fehlerbehebungskosten durch die Weitergabe fehlerhafter Produkte zu vermeiden. Indem etwaige Fehler in der laufenden Produktion möglichst schnell behoben werden, können außerdem Unterbrechungen im Fluss und teure Leerzeiten verhindert werden.¹⁶⁰ Aus diesem Grund muss das Jidoka-System in der Lage sein, die Fertigungsmitarbeiter bei Produktionsstop schnellstmöglich auf den auftretenden Fehler und den Ort des Problems hinzuweisen.¹⁶¹ Voraussetzung für eine störungsfreie Produktion und einen kontinuierlichen Fluss ist zudem die Sicherstellung der vollen und ständigen Einsatzfähigkeit von Maschinen und Mitarbeitern. Dem Prinzip Jidoka kann daher ein Bündel von Lean-Werkzeugen zugeordnet werden, die eine störungsfreie Fertigung oder eine möglichst schnelle Beseitigung auftretender Fehler sicherstellen.¹⁶² Diese werden im Folgenden näher betrachtet.

¹⁵⁵ Vgl. Huf/Maisch, 1995, S.129ff.

¹⁵⁶ Vgl. Shingo, 1985, S.18ff.

¹⁵⁷ Vgl. Syska, 2006, S.130.

¹⁵⁸ Vgl. Syska, 2006, S.27.

¹⁵⁹ Vgl. Liker, 2014, S.243.

¹⁶⁰ Vgl. Syska, 2006, S.27.

¹⁶¹ Vgl. Takeda, 2009, S. 174.

¹⁶² Vgl. Womack/Jones, 2004, S.77.

2.3.4.2 Andon-Systeme

Das Jidoka-Prinzip verfolgend, ermöglichen geeignete visuelle Darstellungen in einer schlanken Produktion, Probleme und deren Ursachen einfacher aufzudecken und zu kommunizieren, um Gegenmaßnahmen schnellstmöglich einleiten zu können. Neben der 5S-Systematik¹⁶³ stellen Andon-Systeme das wohl bedeutendste Werkzeug des Jidoka-Prinzips zur Visualisierung von Problemen dar.¹⁶⁴

„Andon“ bezeichnet ursprünglich eine Signalampel, welche an jedem Arbeitsplatz einer Produktionslinie angebracht ist und den jeweiligen Status über die Farbkombination grün-gelb-rot anzeigt. Im normalen Betriebszustand steht die Ampel auf Grün. Gerät der Fertigungsmitarbeiter in Schwierigkeiten (Muri) oder läuft Gefahr, die Taktzeit zu überschreiten, kann er das gelbe Signal auslösen, um Unterstützung durch einen Teamleiter zu ordern und das Problem rechtzeitig zu beseitigen. Gravierende Probleme oder Fehler signalisieren die Fertigungsmitarbeiter durch Umschalten auf eine rote Ampel, wodurch die Produktion bis zur Problembeseitigung gestoppt wird, damit keine Produkte schlechter Qualität (Muda) weitergereicht werden.¹⁶⁵ Zur Auslösung der Ampelsignale dienen i.d.R. Reißleinen, sog. Andon-Cords, die für eine schnelle Reaktionsmöglichkeit oberhalb jedes Arbeitsplatzes angebracht sind.¹⁶⁶ Die Weiterentwicklung des Ampelsystems stellen sog. Andon-Boards dar – elektronische Anzeigetafeln, welche den detaillierten Produktionsstatus eines gesamten Produktionsbereichs durch Darstellung aller Signalampeln auf einen Blick angeben. Gerade bei unübersichtlichen Produktionsbereichen verbessert ein Andon-Board die Visualisierung des Problemorts.¹⁶⁷ Darüber hinaus kann das Andon-Board eine gleichmäßige Produktion nach Kundentakt vereinfachen, indem es einen Vergleich zwischen Soll- und Ist-Taktzeit oder zwischen geplanter und tatsächlicher Anzahl produzierter Einheiten in einem definierten Zeitraum anzeigt.¹⁶⁸ Andon-Systeme berücksichtigen, ähnlich wie die Methodik Gemba, dass die Fertigungsmitarbeiter die Vorgänge vor Ort am besten beurteilen können.¹⁶⁹ Sie

¹⁶³ 5S-Systematik: 5S steht für fünf japanische Begriffe, die eine Vorgehensweise zur übersichtlichen Gestaltung und Aufrechterhaltung eines Arbeitsplatzes beschreiben (vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.70.). Im Rahmen dieser Arbeit wurde die 5S-Systematik nicht weiter betrachtet, da keine konkreten Überschneidungen mit Industrie 4.0-Technologien identifiziert werden konnten.

¹⁶⁴ Vgl. Gerberich, 2011, S.141.

¹⁶⁵ Vgl. Dickmann, 2009, S.9.

¹⁶⁶ Vgl. Gerberich, 2011, S.141.

¹⁶⁷ Vgl. Gerberich, 2011, S.143.

¹⁶⁸ Vgl. Womack/Jones, 2004, S.72.

¹⁶⁹ Vgl. Dickmann, 2009, S.9.

versetzen Fertigungsmitarbeiter daher in die Lage, schnell auf Schwierigkeiten zu reagieren, den Problemort sichtbar zu machen und eine schnellstmögliche Beseitigung der Probleme einzuleiten.¹⁷⁰

2.3.4.3 Poka Yoke

Der japanische Ausdruck Poka Yoke bedeutet sinngemäß „Fehlervermeidung“ und umschreibt Maßnahmen der Produkt- und Prozessgestaltung, die Fehler (Muda) durch menschliche Fehlhandlungen vermeiden sollen.¹⁷¹ Der Ursprung von Poka Yoke ist die Erkenntnis, dass kein Mensch fähig ist, Fehlhandlungen, wie bspw. das Vertauschen oder Vergessen von Teilen oder falsches Ablesen von Informationen¹⁷², vollkommen zu vermeiden. Nach dem Lean-Gedanken werden Fehler daher in der Methode gesehen, die die Fehler zulässt.¹⁷³ Ziel von Poka Yoke ist es demzufolge, durch den Einsatz von Vorkehrungen und Einrichtungen dafür zu sorgen, dass menschliche Fehlhandlungen nicht zu Fehlern führen. Dies kann grundsätzlich auf zwei Arten gelingen: Entweder durch eine konstruktive Vorkehrung, welche die zugrundeliegenden Fehlerursachen im Voraus ausschließt, oder durch eine technische Einrichtung, die Fehlhandlungen bei deren Auftreten sofort aufdeckt und den Prozessfortschritt von einer Korrektur abhängig macht. Ein einfaches Beispiel für die erste Methode sind unterschiedliche Befestigungen für Rechts- und Linksteile oder eine asymmetrische Gestaltung von Teilen. Die zweite Möglichkeit beinhaltet sowohl Messmittel wie bspw. Sensoren, Lichtschranken oder Zähleinrichtungen als auch Regulierungsmechanismen, welche die Spann- oder Transporteinrichtungen bei einer Fehlhandlung blockieren, die Maschine abschalten oder den Mitarbeiter durch optische oder akustische Signale warnen.¹⁷⁴

2.3.4.4 Total Productive Maintenance

Total Productive Maintenance (TPM) ist ein Konzept, welches eine permanente Funktionstüchtigkeit und Betriebsbereitschaft der Maschinen und Anlagen gewährleisten soll und somit im Sinne von Jidoka zur Vermeidung von

¹⁷⁰ Vgl. Kamiske/Brauer, 2003, S. 93.

¹⁷¹ Vgl. Sondermann, 2013, S.6ff.

¹⁷² Vgl. Gerberich, 2011, S.146.

¹⁷³ Vgl. Liker/Meier, 2008, S.244f.

¹⁷⁴ Vgl. Gerberich, 2011, S.147.

maschinenbedingten Fehlern (Muda) und Unterbrechungen im Fluss beiträgt.¹⁷⁵ Statt Ausfallbehebung im Sinne einer reaktiven Instandhaltung zu betreiben, d.h. erst im Störfall Maßnahmen zur Behebung einzuleiten¹⁷⁶, sieht das Konzept eine von Mitarbeitern getragene, systematische vorausschauende Instandhaltung aller Anlagen und Maschinen während ihrer gesamten Lebensdauer vor, um eine Überbelastung (Muri) der dieser zu verhindern¹⁷⁷. Einerseits wird dabei eine periodisch vorbeugende Instandhaltungsstrategie verfolgt, bei der Maßnahmen regelmäßig nach einer bestimmten Nutzungszeit durchgeführt werden. Andererseits wird zustandsabhängigen Maßnahmen ein hoher Stellenwert beigemessen. Diese werden abhängig vom Maschinenzustand, der mithilfe von Inspektionen gemessen bzw. untersucht wird, eingeleitet.¹⁷⁸ Übergeordnetes Ziel von TPM ist die Erhöhung der Gesamtanlageneffizienz bzw. Overall Equipment Efficiency (OEE), welche sich als Produkt der drei Kennzahlen Verfügbarkeitsrate¹⁷⁹, Leistungsrate¹⁸⁰ und Qualitätsrate¹⁸¹ berechnen lässt.¹⁸² Sie wird maximiert durch Beseitigung sämtlicher Verlustquellen an den Anlagen, die den Produktionsprozess und die Qualität der Produkte negativ beeinflussen. Charakteristisch für TPM ist auch eine Aufteilung der Instandhaltungsverantwortung auf Instandhaltungsabteilung und Maschinenbediener.¹⁸³

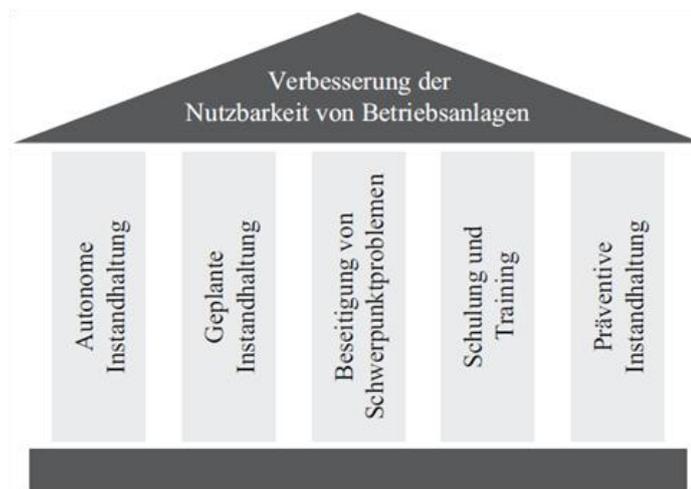


Abb. 6: Die fünf Säulen des TPM-Konzepts

¹⁷⁵ Vgl. Womack/Jones, 2004, S.77.

¹⁷⁶ Vgl. Syska, 2006, S.153.

¹⁷⁷ Vgl. Gerberich, 2011, S.152.

¹⁷⁸ Vgl. Hartmann, 1995, S.106f.

¹⁷⁹ Verfügbarkeitsrate = Hauptnutzungszeit/Planbelegungszeit.

¹⁸⁰ Leistungsrate = (geplante Produktionszeit je Einheit * produzierte Menge)/Hauptnutzungszeit.

¹⁸¹ Qualitätsrate = Gutmenge/produzierte Menge.

¹⁸² Vgl. Gerberich, 2011, S.155f.

¹⁸³ Vgl. Syska, 2006, S.154.

Das TPM-Konzept besteht aus mindestens fünf Kernelementen (s. Abb. 6).¹⁸⁴ Im Rahmen der sog. autonomen Instandhaltung werden die Maschinenbediener aufgrund ihrer Fachkenntnisse und ihrer Nähe zu den Maschinen für den Zustand dieser in die Verantwortung genommen, indem ihnen routinemäßige Instandhaltungstätigkeiten übertragen werden.¹⁸⁵ Zu diesen gehören der Teileaustausch oder das Schmieren und Reinigen der Maschinen im Rahmen der Wartung, kleinere Inspektionen oder kleine Reparaturen mit Berichterstattung im Rahmen der Instandsetzung.¹⁸⁶ Unter dem Element der geplanten Instandhaltung werden sämtliche übergeordnete periodische und zustandsabhängige Instandhaltungsmaßnahmen zusammengefasst, die von der Instandhaltungsabteilung mit dem Ziel der maximalen Anlagenverfügbarkeit vorgenommenen werden.¹⁸⁷ Diese Tätigkeiten gehen über Routineaufgaben hinaus, sind nur mit größerem zeitlichen (z.B. übergreifende Analysen) und technischen Aufwand (z.B. Einsatz spezieller Geräte für Messungen) zu bewerkstelligen oder zielen auf die Optimierung des Instandhaltungsprozesses ab.¹⁸⁸ Dank der autonomen Instandhaltung hat die Instandhaltungsabteilung zusätzliche Kapazitäten, um sich dem dritten Element – der sukzessiven Beseitigung von Schwerpunktproblemen, die an den Anlagen entstehen – im Zuge von Kaizen-Aktivitäten¹⁸⁹ widmen zu können.¹⁹⁰ Diese entstehen durch die folgenden sechs großen Verlustquellen, die jeweils eine negative Auswirkung auf einen Faktor der OEE haben:

- Anlagenausfälle und Rüstverluste (Verfügbarkeitsrate)
- Leerlauf und Geschwindigkeits-/Taktzeitverluste (Leistungsrate) sowie
- Fehlerhafte Teile und Anlaufschwierigkeiten (Qualitätsrate)¹⁹¹,

Die Übernahme zusätzlicher Aufgaben im Rahmen der autonomen Instandhaltung erfordert neue Fähigkeiten und Kenntnisse der Maschinenbediener, die durch das vierte Element – zielgerichtete Schulungen und Trainings – vermittelt werden. Zudem müssen alle involvierten Mitarbeiter in Methoden zur Problemlösung, Visualisierung

¹⁸⁴ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.43.

¹⁸⁵ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.44.

¹⁸⁶ Vgl. Gerberich, 2011, S.154.

¹⁸⁷ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.44.

¹⁸⁸ Vgl. Syska, 2006, S.155.

¹⁸⁹ Vgl. Syska, 2006, S.154.

¹⁹⁰ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.44.

¹⁹¹ Vgl. Gerberich, 2011, S.154.

und Standardisierung geschult werden. Im Rahmen des fünften Elements, der sog. präventiven Instandhaltung, werden schließlich Aspekte der Instandhaltbarkeit, Zugänglichkeit und Bedienfreundlichkeit schon bei der Beschaffung oder Entwicklung zukünftiger Anlagen einbezogen, um Fehlern und Störungen schon in der Anlagenplanung entgegenwirken zu können.¹⁹²

2.3.4.5 U-Zelle

Eine U-Zelle stellt eine spezielle, nach Lean Prinzipien gestaltete Form der Fertigungszelle dar. Besonderheit der U-Zelle ist die Anordnung der Arbeitsplätze nach der Reihenfolge der einzelnen Fertigungs- oder Montageschritte in U-Form.¹⁹³ Die Aufteilung einzelner großer Maschinenanlagen in mehrere U-Zellen nach Produktfamilien ist typisch für den Aufbau einer kontinuierlichen Fließfertigung nach Lean-Prinzipien.¹⁹⁴ Die Größe des Arbeitsteams kann an das Produktionsvolumen jeder Zelle angepasst werden und es erfolgt i.d.R. eine manuelle Weitergabe der Teile statt einer Bandmontage.¹⁹⁵ Während die Bearbeitung der Teile innerhalb des U-Layouts erfolgt, werden Material und Zwischenprodukten grundsätzlich von außen angeliefert, sodass eine klare Trennung zwischen Wertschöpfung und unterstützender Materialbereitstellung vorliegt.¹⁹⁶ Die enge Anordnung der Arbeitsstationen innerhalb der Zelle bringt verkürzte Transport-, Lauf- und Kommunikationswege mit sich. Da Beginn und Ende aufeinanderfolgender Arbeitsschritte eng beieinander liegen, ist die Weiterleitung bearbeiteter Teile per One Piece Flow innerhalb der Zelle möglich.¹⁹⁷ Darüber hinaus erlaubt die Zellenform eine systematische Fehlervermeidung durch Poka Yoke (vgl. Kapitel 2.3.4.3) sowie schnellere Rüsttätigkeiten (vgl. 2.3.3.6).¹⁹⁸

Größter Vorteil des U-Layouts ist die Möglichkeit eines flexiblen Personaleinsatzes. Vernachlässigt man die Festplatzvariante, die im Rahmen der Ausführungen zum One Piece Flow behandelt wird (vgl. Kapitel 2.3.3.3), können Unregelmäßigkeiten (Mura) innerhalb der U-Zelle ausglichen werden, indem Mitarbeiter gleichzeitig mehrere Maschinen bedienen oder in Absprache zwischen den Arbeitsplätzen

¹⁹² Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.44.

¹⁹³ Vgl. Syska, 2006, S.164.

¹⁹⁴ Vgl. Womack/Jones, 2004, S.79.

¹⁹⁵ Vgl. Womack/Jones, 2004, S.80.

¹⁹⁶ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.104.

¹⁹⁷ Vgl. Yagyu, 2007, S.147.

¹⁹⁸ Vgl. Syska, 2006, S.164.

wechseln. Dadurch können Wartezeiten auf Material oder Maschinen (Mura) entfallen und kurzfristige Engpässe (Muri) vermieden werden.¹⁹⁹ Die intensive Kommunikation ermöglicht insbesondere eine gemeinsame und zügige Behebung von Problemen.²⁰⁰ Zur Auslösung von störungsbedingten Produktionsstops kommen häufig Andon-Cords (vgl. Kapitel 2.3.4.2) zur Anwendung.²⁰¹ Die sofortige Korrektur von Fehlern (Muda) am Ort ihrer Entstehung nach dem Jidoka-Prinzip wird somit in U-Zellen unterstützt. Darüber hinaus wird der Teamgedanke sowie die Generierung und Umsetzung von Verbesserungsvorschlägen gefördert.²⁰² In der Extremform ist in der U-Zelle auch ein mitarbeitergebundener Arbeitsfluss denkbar, d.h. eine Verfolgung des Werkstücks ohne Unterbrechung von einem Arbeitssystem zum nächsten bis zu dessen Fertigstellung durch einen Mitarbeiter. Dadurch werden Pufferbestände (Muda) innerhalb der Zelle vollständig vermieden werden.²⁰³

¹⁹⁹ Vgl. Thonemann, 2005, S.343.

²⁰⁰ Vgl. Syska, 2006, S.164.

²⁰¹ Vgl. Spengler et al., 2005, S.254.

²⁰² Vgl. Syska, 2006, S.164.

²⁰³ Vgl. Eberhard, 2013, S.22.

3 Industrie 4.0

3.1 Entwicklung und Einordnung

3.1.1 Die vierte industrielle Revolution

Der Begriff „Industrie 4.0“ hat seinen Ursprung im gleichnamigen, 2011 gegründeten „Arbeitskreis Industrie 4.0“ und entstand als Zukunftsprojekt der deutschen Bundesregierung zur Unterstützung der deutschen Industrie auf dem Weg in die Zukunft der Produktion.²⁰⁴ Die Wortschöpfung Industrie 4.0 soll den Übergang in eine vierte industrielle Revolution zum Ausdruck bringen.²⁰⁵ Zudem soll die Versionsbezeichnung „4.0“ verdeutlichen, dass diese vor allem von der Informationstechnologie getrieben wird.²⁰⁶ Im Folgenden wird der Begriff daher zunächst in den Kontext industrieller Revolutionen (s. Abb. 7) eingeordnet.

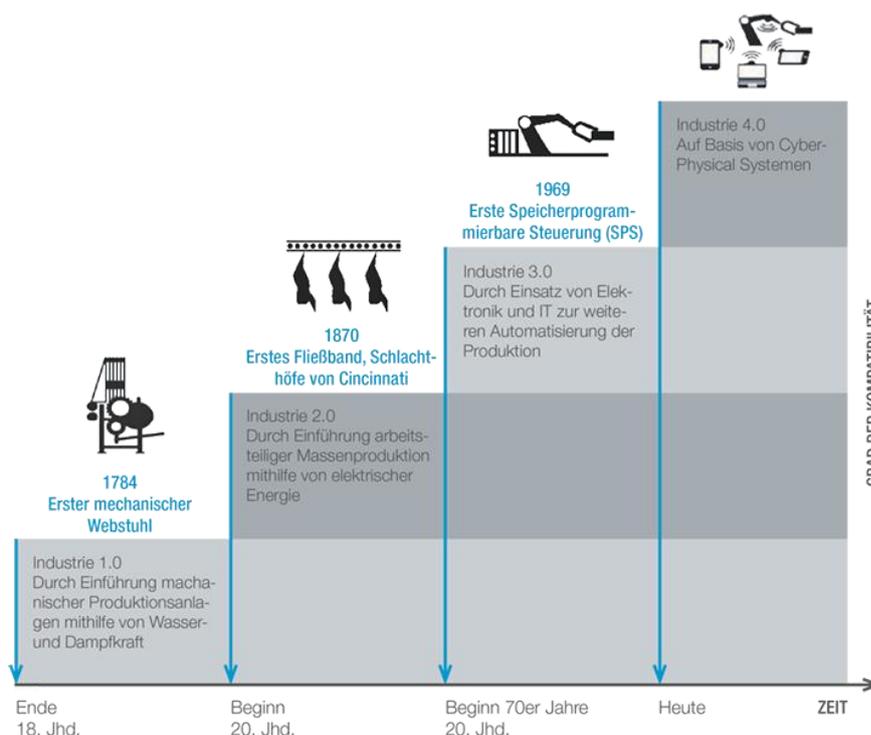


Abb. 7: Industrielle Revolutionen

Der Begriff „industrielle Revolution“ entstand erstmals ab Mitte des 18. Jahrhunderts, als sich durch die Einführung mechanischer Produktionsanlagen mithilfe von Wasser- und Dampfkraft²⁰⁷ der Übergang von der Agrar- zur Industriegesellschaft

²⁰⁴ Vgl. Kagermann/Wahlster/Helbig, 2013, S.5.

²⁰⁵ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.5.

²⁰⁶ Vgl. Botthof/Hartmann, 2015 S.V.

²⁰⁷ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.5.

vollzog²⁰⁸. Die zweite industrielle Revolution beschreibt die Umbrüche in Wirtschaft, Produktion und Arbeit ab Beginn des 20. Jahrhunderts, die geprägt waren von einer zunehmenden Mechanisierung, der Verbreitung von Elektrizität und der arbeitsteiligen Massenproduktion. Im Zuge der Weiterentwicklung der Elektronik und der Informationstechnologie ab den 1970er Jahren kam es zum Einsatz von speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) in Maschinen.²⁰⁹ Dies führte zu einer fortschreitenden Automatisierung von Produktionsprozessen und somit zur dritten industriellen Revolution. Damit verbunden war auch der Übergang vom Verkäufer- zum Käufermarkt, sodass Unternehmen nunmehr darauf angewiesen waren, den Wunsch der Kunden nach Individualität und Qualität zu befriedigen. Demzufolge wurde die Massenproduktion von der variantenreichen Serienproduktion abgelöst.²¹⁰ Diese Rahmenbedingen ließen das TPS als das wettbewerbsfähigste Produktionssystem seiner Zeit in den Vordergrund rücken.²¹¹

Laut einiger Experten stehen wir nun an der Schwelle zur vierten industriellen Revolution.²¹² Die weiter zunehmenden Individualisierung industriell gefertigter Produkte und die wachsenden Möglichkeiten der IKT ebnen den Weg dieser Entwicklung.^{213,214} Demnach wird die vierte industrielle Revolution geprägt von einer zunehmenden Vernetzung über das Internet, die zu einer Verschmelzung der physischen mit der virtuellen Welt, dem sog. Internet der Dinge, führt. Im Internet der Dinge vernetzen sich physische Objekte miteinander und bilden sog. Cyber-Physische Systeme.²¹⁵ Im Produktionsumfeld lässt das Zusammenwirken Cyber-Physischer Systeme eine intelligente Fertigung, die sog. Smart Factory, entstehen.²¹⁶ In diesem Zukunftsbild können miteinander vernetzte, räumlich verteilte Produktionsressourcen selbstständig und in Echtzeit Informationen erfassen und austauschen, Aktionen auslösen und sich wechselseitig steuern.²¹⁷ Somit wird eine flexible, dezentrale Koordination selbststeuernder Elemente wie z.B. intelligente Maschinen oder Behälter möglich. Der Mensch übernimmt mehr und mehr die Rolle

²⁰⁸ Vgl. Sandler, 2013, S.6.

²⁰⁹ Vgl. Sandler, 2013, S.6.

²¹⁰ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.7.

²¹¹ Vgl. Günther/Klenk/Tenerowicz-Wirth, 2014, S.297.

²¹² Vgl. Kagermann, 2014, S.603.

²¹³ Vgl. Fechter/Jaich/Glockner, 2014, S.1136.

²¹⁴ Vgl. Kolberg/Zühlke, 2015, S.1872.

²¹⁵ Vgl. Kagermann, 2014, S.603.

²¹⁶ Vgl. Becker, 2015, S.24.

²¹⁷ Vgl. Botthof/Hartmann, 2015, S.V.

des informierten Entscheiders, indem er aufbereitete Informationen situationsgerecht für die Steuerung und Optimierung der Prozesse nutzt.²¹⁸

Dieser Ansatz bewirkt einen Paradigmenwechsel – nicht mehr eine zentrale Instanz, sondern das entstehende Produkt selbst organisiert seinen Produktionsprozess, sodass es erstmals eine aktive Rolle übernimmt.²¹⁹ Dabei werden dem Produkt Informationen und Parameter zugeordnet, sodass dieses weiß, wann und wie es gefertigt werden soll. Diese Informationen und Parameter werden an die Maschinen kommuniziert, die dann den optimalen Produktionsprozess für das individuelle Produkt in die Wege leiten.²²⁰ Dieser Paradigmenwechsel liefert einen Lösungsansatz für die Produktionssteuerung, sehr variantenreiche, kundenindividuelle Produkte in Kleinserien oder sogar in Einzelfertigung terminqualitäts- und kostengerecht herzustellen und die damit einhergehende Komplexität der Produkte und Prozesse zu beherrschen. Im Zuge der Globalisierung werden produzierende Unternehmen dadurch in die Lage versetzt, den Anforderungen an Dynamik, Wandlungsfähigkeit und Kundenorientierung gerecht zu werden und sich somit einen Wettbewerbsvorteil zu verschaffen.²²¹

Obwohl die Auswirkungen ähnlich umwälzend wie die der vorangegangenen industriellen Revolutionen sein werden, stellt Industrie 4.0 für viele Experten eher eine Evolution als eine Revolution dar.²²² Die Vision von Industrie – eine totale Vernetzung – liegt daher noch in ferner Zukunft. Bis dorthin werden Unternehmen ihre vorhandenen Industrie 4.0-Technologien²²³ und ihr Produktionssystem²²⁴ kontinuierlich anpassen. Demzufolge werden Unternehmen Evolutionszyklen bei der Einführung von Industrie 4.0 durchlaufen.²²⁵ Anzumerken ist, dass dabei viele Unternehmen entweder aufgrund begrenzter Komplexitätsanforderungen in der Produktion keinen Bedarf an einem höheren Integrationsgrad von Industrie 4.0-Technologien haben oder sich aus Kostengründen gegen eine solchen entscheiden werden.²²⁶ Da die im Rahmen dieser Arbeit verfügbaren Praxis- und

²¹⁸ Vgl. Schlick et al., 2014, S.78.

²¹⁹ Vgl. Soder, 2014, S.97.

²²⁰ Vgl. Pötter/Folmer/Vogel-Heuser, 2014, S.159.

²²¹ Vgl. Spath et al, 2013a, S.90f.

²²² Vgl. Kagermann, 2014, S.603.

²²³ Vgl. Fallenbeck/Eckert, 2014, S.398.

²²⁴ Vgl. Kagermann/Wahlster/Helbig, 2014, S.23.

²²⁵ Vgl. Wegener, 2014, S.356.

²²⁶ Vgl. Wegener, 2014, S.356.

Forschungsbeispiele für Industrie 4.0-Technologien nicht konkret einzelnen Evolutionszyklen zuzuordnen sind, sollen darauf basierende Analysen im Rahmen dieser Arbeit unabhängig von bestimmten Evolutionszyklen erfolgen.

3.1.2 Definition von Industrie 4.0

Ausgehend von der ursprünglichen, geschichtlichen Bedeutung des Begriffs Industrie 4.0 ist insbesondere seine technisch-organisatorische Bedeutung für die Ausführungen dieser Arbeit relevant. Aus dieser Sicht wird im Folgenden eine allgemeingültige Definition des Begriffs vorgenommen.

„Industrie 4.0 meint im Kern die technische Integration von Cyber-Physischen Systemen in die Produktion und die Logistik sowie die Anwendung des Internets der Dinge und Dienste in industriellen Prozessen – einschließlich der sich daraus ergebenden Konsequenzen für die Wertschöpfung, die Geschäftsmodelle sowie die nachgelagerten Dienstleistungen und die Arbeitsorganisation“²²⁷. Trotz dieser Umschreibung, existiert bisher keine allgemeingültige, akademische Definition des Begriffs. Darüber hinaus haben die vielfältigen Diskussionen zu Industrie 4.0 in Literatur und Praxis eher zu einer Verwässerung als zu einer Konkretisierung des Begriffs geführt. Um eine wissenschaftliche und systematische Auseinandersetzung mit den Elementen und Prinzipien von Industrie 4.0 zu ermöglichen, wird daher auf die folgende, auf einer umfassenden Literaturanalyse basierende Definition des Begriffs von Hermann/Pentek/Otto zurückgegriffen²²⁸:

Industrie 4.0 ist ein Sammelbegriff für Technologien und Konzepte der Wertschöpfungskette. Innerhalb modular aufgebauter Smart Factories von Industrie 4.0 überwachen Cyber-Physische Systeme physische Prozesse, erzeugen ein virtuelles Abbild der physischen Welt und treffen dezentrale Entscheidungen. Über das Internet der Dinge kommunizieren und kooperieren Cyber-Physische Systeme sowohl miteinander als auch mit Menschen in Echtzeit. Über das Internet der Dienste werden sowohl interne als auch organisationsübergreifende Dienstleistungen angeboten und von Teilnehmern der Wertschöpfungskette genutzt.^{229,230}

²²⁷ Kagermann/Wahlster/Helbig, 2013, S.18.

²²⁸ Vgl. Hermann/Pentek/Otto, 2015, S.3f.

²²⁹ Sinngemäß ins Deutsche übersetzt.

²³⁰ Vgl. Hermann/Pentek/Otto, 2015, S.11.

Aus der Definition von Industrie 4.0 lassen sich vier Kernelemente von Industrie 4.0 als auch sechs Prinzipien, die Industrie 4.0-Technologien verfolgen, ableiten. Die Erläuterungen dieser Kernelemente (s. Kapitel 3.3.1) und Prinzipien (s. Kapitel 3.3.2) sollen ein grundlegendes Verständnis für die Auseinandersetzung mit Industrie 4.0-Technologien in dieser Arbeit schaffen.

3.1.3 Begriffsabgrenzung

Die Idee, die Produktion informationstechnisch zu vernetzen, ist nicht neu.²³¹ Das stark technik- und automatisierungsgetriebene Konzept des Computer-Integrated-Manufacturing (CIM), das die Aufgaben des Menschen auf die Beobachtung in einem Kontrollzentrum beschränkte, scheiterte jedoch in den 1990er Jahren, da es für die damalige technologische Leistungsfähigkeit zu komplex war²³² und das menschliche Potenzial außer Acht ließ.²³³ Heute ist die technologische Entwicklung dank Cloud Computing, Big Data, Internet der Dinge und Dienste sowie einheitlichen Standards zur herstellerübergreifenden Maschine-zu-Maschine-Kommunikation²³⁴ weiter vorangeschritten. Zudem strebt Industrie 4.0 im Gegensatz zu CIM nicht die Entwicklung zu einer menschenleeren Fabrik an, sondern zielt darauf ab, den Menschen als kreativen Akteur und Entscheider in das cyber-physische Gefüge einzubinden.²³⁵ Ein weiterer entscheidender Unterschied ist, dass CIM in der Produktionssteuerung einen zentralen, deterministischen Ansatz verfolgte, während Industrie 4.0 auf eine dezentrale, situationsbezogene Steuerung setzt.²³⁶

3.2 Ziele

„Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 zielt darauf ab, die deutsche Industrie in die Lage zu versetzen, für die Zukunft der Produktion gerüstet zu sein. Sie ist gekennzeichnet durch eine starke Individualisierung der Produkte unter den Bedingungen einer hoch flexibilisierten (Großserien-) Produktion.“²³⁷ Dies erfordert von produzierenden Unternehmen, insbesondere des Maschinen- und Anlagenbaus, der Elektrotechnik und des Automobilbaus, die Fähigkeit, schnell und flexibel auf Kundenanforderungen

²³¹ Vgl. Soder, 2014, S.85.

²³² Vgl. Bildstein, 2014, S.584.

²³³ Vgl. Gorecky/Loskyll, 2014, S.525.

²³⁴ Vgl. Siepmann, 2016a, S.20f.

²³⁵ Vgl. Gorecky/Loskyll, 2014, S.525.

²³⁶ Vgl. Kaspar/Schneider, 2015, S.18.

²³⁷ „Zukunftsprojekt Industrie 4.0“, o.J., S.1.

reagieren und hohe Variantenzahlen bis hin zu kundenindividuellen Produkte bei niedrigen Losgrößen wirtschaftlich produzieren zu können.²³⁸ Vor diesem Hintergrund wird mit Industrie 4.0 eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit durch eine schnellere, effizientere und vor allem flexiblere Produktion bei gleichzeitiger Beherrschung der einhergehenden Komplexität angestrebt. Gelingen soll dies insbesondere durch den dezentralen Einsatz vernetzter, intelligenter Produktionsressourcen.^{239,240} Durch eine schnelle und direkte Kommunikation dieser untereinander sollen kurzfristige Änderungen der Bestellmengen und des Produktmixes oder Anpassungen der Wertschöpfungskette in letzter Minute robuster und effektiver umgesetzt werden können.²⁴¹ Gleichzeitig wird darauf abgezielt, das Kostenniveau niedrig und das Qualitätsniveau hoch zu halten.²⁴² Bauernhansl beziffert die Einsparpotenziale durch Industrie 4.0 in den Fertigungskosten, Logistikkosten und Qualitätskosten auf jeweils 10-20%, in den Instandhaltungskosten auf 20-30% und in den Bestandskosten auf 30-40%, während er das größte Potenzial in der Reduzierung der Komplexitätskosten um 60-70% sieht.²⁴³

3.3 Technologische Grundlagen

3.3.1 Kernelemente von Industrie 4.0

3.3.1.1 Cyber-Physische Systeme

Die Verschmelzung zwischen physischer und virtueller Welt als Basis von Industrie 4.0 wird in sog. Cyber-Physischen Systemen (CPS) zur Realität. Geisberger/Broy definieren CPS als Verbund informatischer, softwaretechnischer und elektronischer Teile, die

- physische Daten über Sensoren unmittelbar erfassen und/oder auf physische Prozesse über Aktoren einwirken,
- Daten auswerten und speichern und auf ihrer Grundlage mit der physischen und virtuellen Welt interagieren,

²³⁸ Vgl. Spath et al., 2013a, S.2.

²³⁹ Vgl. Wannewetsch, 2014, S.418.

²⁴⁰ Vgl. Spath et al., 2013a, S.90f.

²⁴¹ Vgl. Wannewetsch, 2014, S.418.

²⁴² Vgl. Spath et al., 2013a, S.4.

²⁴³ Vgl. Forstner/Dümmler, 2014, S.200.

- untereinander drahtlos oder drahtgebunden sowie auf lokaler oder globaler Ebene digital verbunden sind,
- auf weltweit verfügbare Daten und Dienste zugreifen und
- dem Menschen vielseitige Möglichkeiten zur Kommunikation und Steuerung über multimodale Mensch-Maschine-Schnittstellen zur Verfügung stellen.²⁴⁴

Allerdings wird der Einsatz von CPS in einer Smart Factory entsprechend der Evolutionszyklen von Industrie 4.0 nicht in einem einzigen Schritt Realität werden.²⁴⁵ CPS werden ebenso Entwicklungsstufen durchlaufen. Ausgehend von einer passiven Intelligenz, werden CPS erst im Laufe der Zeit eigenständig Zustände mittels Sensoren erfassen und Aktionen mittels Aktoren ausführen können, bis sie schließlich zu intelligenten, netzwerkfähigen Systemen werden, die eigenständig untereinander kommunizieren können.²⁴⁶

3.3.1.2 Internet der Dinge

Das Internet der Dinge ist die Konsequenz aus der fortschreitenden Miniaturisierung und Integration von Computerchips in der IKT. Es erweitert das klassische Internet von einer rein virtuellen Welt um die Vernetzung von und mit Alltagsgegenständen (Dingen).²⁴⁷ Daher lässt sich das Internet der Dinge als Netzwerk zur „Verknüpfung physischer Objekte (Dinge) mit einer virtuellen Repräsentation im Internet oder einer internetähnlichen Struktur“²⁴⁸ definieren. Der Einzug des Internets der Dinge in die Produktion stellt die Basis für den Beginn der vierten industriellen Revolution dar.²⁴⁹ Es erlaubt Produktionsfaktoren wie Maschinen, Menschen, Lagersysteme oder Produkte als Cyber-Physische Systeme in Echtzeit über eigene Internet-Adressen zu interagieren und zu kooperieren und vernetzt dadurch das gesamte Produktionsumfeld zu einer intelligenten Umgebung, der sog. Smart Factory (s. Kapitel 3.3.1.4).²⁵⁰ Es lassen sich drei Anwendungsgebiete des Internets der Dinge im Rahmen der Smart Factory identifizieren, die verschiedene Ebenen der Informationsdurchgängigkeit repräsentieren. Die horizontale Integration umschreibt den Informationsaustausch zwischen Unternehmen. Die vertikale Integration bezieht

²⁴⁴ Vgl. Geisberger/Broy, 2014, S.22.

²⁴⁵ Vgl. Wegener, 2014, S.356.

²⁴⁶ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.16f.

²⁴⁷ Vgl. Schlick et al., 2014, S.57f.

²⁴⁸ Kagermann/Wahlster/Helbig, 2013, S.85.

²⁴⁹ Vgl. Hermann/Pentek/Otto, 2015, S.9.

²⁵⁰ Vgl. Giusto et al. 2010, S. V.

sich auf den direkten Zugriff auf Feld- und Planungsinformationen innerhalb eines Unternehmens und behandelt somit auch die Auflösung der sog. Automatisierungspyramide (s. Kapitel 3.3.1.4). Die digitale Durchgängigkeit des Engineerings fokussiert sich schließlich auf den Lebenszyklus von Produkten und Produktionsmitteln.²⁵¹ Die im Rahmen dieser Arbeit beschriebenen Industrie 4.0-Anwendungen thematisieren im Wesentlichen die Bereiche der vertikalen Integration.²⁵²

3.3.1.3 Internet der Dienste

Während beim Internet der Dinge die Verschmelzung von physischer und virtueller Welt im Fokus steht, geht es beim Internet der Dinge um die Suche, Bereitstellung, oder Verarbeitung von Software, Daten oder Informationen.²⁵³ Das Internet der Dienste beschreibt dabei den Teil des Internets, in dem Dienste und Funktionalitäten als webbasierte Software-Komponenten abgebildet und von Dienstleistern, sog. Providern, auf Anfrage zur Nutzung bereitgestellt werden.²⁵⁴ Hierzu haben insbesondere die Entwicklungen im Bereich Cloud-Computing und Big Data beigetragen.²⁵⁵ Der Ansatz des Cloud Computing beschreibt, dass IKT-Anwendungen, -infrastrukturen und -dienste nicht mehr vom jeweiligen Anwender selbst erworben und betrieben werden, sondern von einem Dienstleister auf virtuellen Rechnern bereitgestellt und von Anwendern gegen Gebühr über das Internet genutzt werden können.²⁵⁶ Der Begriff „Cloud“ ist dabei eine Metapher für die zur Verfügung gestellte „Datenwolke“ im Internet der Dienste.²⁵⁷ Für Unternehmen entstehen flexibel nutzbare und jederzeit abrufbare IT-Ressourcen, Softwareanwendungen, Online-Dienste oder auch Geschäftsprozesse. Zudem ermöglicht dies Unternehmen eine kostengünstige Speicherung und Verarbeitung von riesigen Datenmengen (sog. Big Data). Unter der Anwendung intelligenter Algorithmen, können diese Datenmassen analysiert und daraus Informationen gewonnen werden, die wiederum zu neuem Wissen verknüpft und allen Teilnehmern

²⁵¹ Vgl. Schlick et al., 2014, S.58f.

²⁵² Der Aspekt, dass die horizontale, d.h. die unternehmensübergreifende Integration des Internet der Dinge in dieser Arbeit nicht explizit betrachtet wird, ist auch der Grund warum nicht näher auf das Lean-Konzept der Just-in-Time-Anlieferungen durch Lieferanten eingegangen wird.

²⁵³ Vgl. Brühl, 2015, S.100.

²⁵⁴ Vgl. Roth/Siepmann, 2016, S.263.

²⁵⁵ Vgl. Brühl, 2015, S.67.

²⁵⁶ Vgl. Dufft et al., 2010, S.14.

²⁵⁷ Vgl. acatech, 2014, S.11.

zur Verfügung gestellt werden können.²⁵⁸ Dies wird schließlich zu einer Service-Orientierung auf allen Ebenen führen – Menschen, Software-Lösungen und CPS werden ihre Dienste und sämtliches Wissen echtzeitnah im Internet der Dienste anbieten. Dies wird trotz steigender Dezentralität, Autonomie und Komplexität eine hohe Transparenz in der Wertschöpfung schaffen und somit die Möglichkeiten der Smart Factory hinsichtlich der Produktion stark individualisierter Produkte im Vergleich zu heute deutlich erhöhen.²⁵⁹

3.3.1.4 Smart Factory

Das Industrie 4.0-Kernelement ist die sog. Smart Factory. Sie umschreibt eine Produktionsumgebung, in der intelligente Produkte, intelligente Maschinen, Menschen und weitere intelligente Produktionsressourcen direkt über das Internet der Dinge und Dienste miteinander kommunizieren und sich dezentral organisieren, sodass Menschen und Maschinen bei der Ausführung ihrer Aufgaben kontextbezogen assistiert werden (s. Abb. 8).^{260,261}



Abb. 8: Darstellung einer Smart Factory

In der Vision der Smart Factory entsteht ein „echtzeitfähiges, kontextsensitives Produktionssystem, welches durch eine dynamische, an aktuelle Gegebenheiten angepasste Planung und Verwaltung intelligenter Ressourcen in der flexiblen Fertigung auf Turbulenzen [wie z. B. Auftragschwankungen, Maschinenausfälle oder Qualitätsmängel] reagieren kann“²⁶². Aus technologischer Sicht definiert sich die Smart Factory vor allem durch den Einsatz cyber-physischer Produktionssysteme

²⁵⁸ Vgl. Kagermann, 2014, S.605.

²⁵⁹ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.18.

²⁶⁰ Vgl. Dombrowski, Richter, Ebentreich, 2015, S.158.

²⁶¹ Vgl. Lucke/Constantinescu/Westkämper, 2008, S.139.

²⁶² Lucke/Constantinescu/Westkämper, 2008, S.139.

(CPPS) und Cyber-Physischer Logistiksysteme (CPLS).²⁶³ Diese entstehen durch die Interaktion bzw. den Zusammenschluss mehrerer vernetzter CPS zur gemeinsamen Aufgabenerfüllung in Produktion und Logistik.²⁶⁴ Die dezentrale, autonome Intelligenz der CPS soll zu einer besseren Beherrschung der Komplexität und einer Steigerung der Flexibilität in der Smart Factory führen.²⁶⁵ Auch schon nach Warneckes Konzept der sog. Fraktalen Fabrik²⁶⁶ ist eine Aufteilung in selbstähnliche, sich selbst organisierende, selbstoptimierende und untereinander kommunizierende Produktionsfraktale nötig, um steigende Komplexität beherrschen zu können. Warnecke zufolge, nimmt das Maß der Dezentralisierung und Selbstorganisation mit der Komplexität der Systeme zu. Die Smart Factory, in der die Dezentralisierung und Autonomie zur Beherrschung der weiter steigenden Komplexität im Vergleich zur fraktalen Fabrik folglich noch eine Stufe weitergetrieben wird, kann daher als Weiterentwicklung der fraktalen Fabrik gesehen werden.²⁶⁷

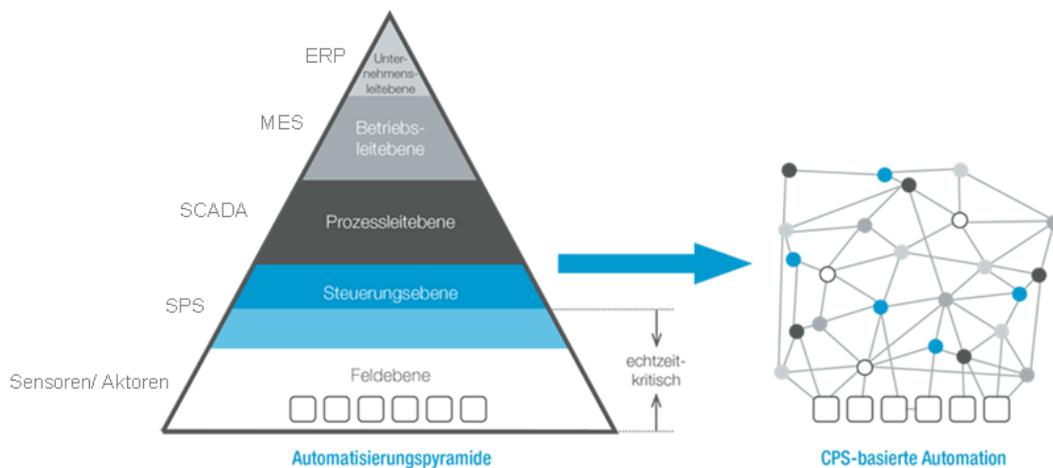


Abb. 9: Auflösung der Automatisierungspyramide durch CPS

Entscheidend für eine Dezentralisierung der Steuerung in der Smart Factory ist auch die Auflösung der sog. Automatisierungspyramide (s. Abb. 9). Diese stellt die heute übliche, hierarchische und funktionale Trennung der IT-Systeme innerhalb einer Fabrik dar. Da die einzelnen Ebenen der Automatisierungspyramide i.d.R. durch unterschiedliche Systeme repräsentiert werden, besteht häufig keine Verbindung zwischen übergeordneten Planungssystemen und der Automatisierungstechnik. Erhobene Daten können daher nur selten durchgängig zur Beeinflussung der

²⁶³ Vgl. Siepman, 2016a, S.20f.

²⁶⁴ Vgl. Veigt/Lappe/Hribernik, 2013, S.16.

²⁶⁵ Vgl. Frank, 2014, S.17.

²⁶⁶ Für detailliertere Informationen zur fraktalen Fabrik: Vgl. Syska, 2006, S.49; vgl. ten Hompel/Henke, 2014, S.621f.

²⁶⁷ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.15f.

einzelnen Planungsebenen genutzt werden.²⁶⁸ Diese streng hierarchische und zentralistische Organisation ist mit der zunehmenden Dezentralisierung und Autonomie der intelligenten Produktionsressourcen nicht vereinbar.²⁶⁹ In der Smart Factory sollen CPS mittels geeigneter Software Informationen hingegen über eine verteilte Dateninfrastruktur in Echtzeit austauschen, sodass sich die Systemgrenzen auflösen und die virtuelle und physische Welt nahtlos ineinander greifen.^{270,271} So können CPS in Echtzeit sowohl in horizontaler Richtung, bspw. mit einem nachgelagerten Produktionsschritt oder in vertikaler Richtung mit einem übergeordneten IT-System kommunizieren. Das stets aktuelle Abbild der Produktion erlaubt eine permanente Überprüfung aktueller und eine Vorhersage künftiger Zustände. Dadurch können z.B. zu fertigende Produkte ihren eigenen Weg durch die Produktion suchen oder sich Anlagen in Abhängigkeit vom erforderlichen Produktmix, der Anlagenverfügbarkeit und weiteren Parametern selbst rekonfigurieren sowie bei Turbulenzen selbst Maßnahmen einleiten.^{272,273}

3.3.2 Prinzipien von Industrie 4.0

3.3.2.1 Interoperabilität

Interoperabilität beschreibt die Fähigkeit des effizienten und standardisierten Informationsaustauschs und der nahtlosen Zusammenarbeit zwischen CPS, Menschen und Unternehmen durch die Vernetzung über das Internet der Dinge und das Internet der Dienste. In einer Smart Factory entsteht Interoperabilität durch Kommunikation der CPS mithilfe offener Netzwerke und semantischer Beschreibungen.^{274,275}

3.3.2.2 Virtualisierung

Virtualisierung charakterisiert die Fähigkeit von CPS, physische Prozesse über Sensoren wahrnehmen und mit virtuellen Modellen verknüpfen zu können. Daraus entsteht ein virtuelles Abbild der physischen Welt. In einer Smart Factory sind die

²⁶⁸ Vgl. Forstner/Dümmeler, 2014, S.200f.

²⁶⁹ Vgl. Tröger, 2015a, S.15.

²⁷⁰ Vgl. Tröger, 2015a, S.16.

²⁷¹ Vgl. Fechter/Jaich/Glockner, 2014, S.1136.

²⁷² Vgl. Fechter/Jaich/Glockner, 2014, S.1136.

²⁷³ Vgl. Tröger, 2015a S.16.

²⁷⁴ Vgl. Hermann/Pentek/Otto, S.11.

²⁷⁵ Vgl. Roth/Siepmann, 2016, S.263.

Zustände aller CPS virtuell modelliert, sodass Mitarbeiter mit allen relevanten Informationen versorgt werden können. Mitarbeiter können somit dabei unterstützt werden, die steigende technische Komplexität zu bewältigen, indem ihnen bspw. die nächsten Arbeitsschritte digital angezeigt werden. Denkbar sind auch virtuelle Tests von Optimierungsansätzen.²⁷⁶

3.3.2.3 Dezentralisierung

Die steigende Komplexität, die mit der Fertigung variantenreicher Produkte einhergeht, kann nicht mehr durch eine zentrale Instanz, sondern nur mithilfe von Dezentralisierung bewältigt werden. Im Rahmen von Industrie 4.0 bedeutet dies, dass CPS mithilfe eingebetteter Computer eigene Entscheidungen treffen können. In der Vision der Smart Factory erfolgt die Produktionssteuerung dezentral, indem Maschinen untereinander und mit Produkten kommunizieren und sich mit ihnen über den nächsten Arbeitsschritt und die benötigten Materialien abstimmen.²⁷⁷

3.3.2.4 Echtzeitfähigkeit

Echtzeitfähigkeit beschreibt die Eigenschaft von CPS, Daten in Echtzeit sammeln und analysieren zu können. Dies ermöglicht z.B. eine permanente Überwachung verschiedenster relevanter Daten (z.B. Prozess-, Bestands-, Werkzeugdaten) in einer Smart Factory und eine sofortige Reaktion auf Störungen.²⁷⁸

3.3.2.5 Service-Orientierung

Service-Orientierung entsteht dadurch, dass von Unternehmen angebotene Dienstleistungen, CPS und Menschen über das Internet der Dienste als Ressourcen abgebildet sind, auf die Teilnehmer innerhalb oder evtl. auch außerhalb der Unternehmensgrenze zugreifen können. Innerhalb der Smart Factory bieten CPS ihre Funktionalität als Webservice in einer Cloud an. Dies erlaubt u.a. einen interoperablen Zugriff übergeordneter Steuerungsebenen im Sinne einer vertikalen Integration oder führt zu produktspezifischen Prozessen auf der Basis von Kundenanforderungen, die die Produkte mit sich führen.^{279,280}

²⁷⁶ Vgl. Hermann/Pentek/Otto, 2015, S.12.

²⁷⁷ Vgl. Hermann/Pentek/Otto, 2015, S.12.

²⁷⁸ Vgl. Hermann/Pentek/Otto, 2015, S.12.

²⁷⁹ Vgl. Hermann/Pentek/Otto, 2015, S.12.

3.3.2.6 Modularisierung

Modular aufgebaute Systeme sind imstande, sich flexibel auf sich ändernde Anforderungen anzupassen, indem einzelne Module ersetzt oder erweitert werden. Modularität in der Smart Factory umschreibt die Möglichkeit der flexiblen Anpassung des Maschinenparks im Falle von Nachfrageschwankungen oder geänderten Produktanforderungen über standardisierte Software- und Hardware-Schnittstellen, sodass neue Module automatisch identifiziert und über das Internet der Dienste genutzt werden können.²⁸¹ Eine Modularisierung der Fördertechnik ermöglicht außerdem eine flexible Kopplung von Transportwegen und somit die Flexibilisierung des Materialflusssysteme.²⁸²

3.4 Industrie 4.0-Technologien in der Smart Factory

3.4.1 Klassifizierung nach Technologieparadigmen

Industrie 4.0-Anwendungen in einer Smart Factory enthalten ein breites Spektrum an Technologien in unterschiedlichen Ausprägungen. Nach Schlick et al. ist daher eine Klassifizierung in Technologieparadigmen sinnvoll. Diese umfassen das intelligente Produkt (s. Kapitel 3.4.2), die intelligente Maschine (s. Kapitel 3.4.3) und den Werker unterstützende, intelligente Assistenzsysteme (s. Kapitel 3.4.3).²⁸³ Bei Erweiterung von CPPS um CPLS, d.h. unter Einbeziehung einer logistischen Perspektive, können intelligente Transportsysteme (s. Kapitel 3.4.4) als viertes Technologieparadigma für Industrie 4.0-Anwendungen in einer Smart Factory gesehen werden. Die in Kapitel 3.3 beschriebenen Kernelemente und Prinzipien kommen im Rahmen der Technologieparadigmen auf unterschiedliche Art und Weise zur Geltung.²⁸⁴

3.4.2 Intelligentes Produkt

In einer Smart Factory werden Produkte „intelligent“, wodurch sie einen Wandel vom passiven zum aktiven Element innerhalb der Fertigung erfahren.²⁸⁵ Aus physischen oder wirtschaftlichen Gründen ist die Realisierung eines eigenständig intelligenten

²⁸⁰ Vgl. Schlick et al., 2014, S.74.

²⁸¹ Vgl. Hermann/Pentek/Otto, 2015, S.13.

²⁸² Vgl. Günther/Klenk/Tenerowicz-Wirth, 2014, S.303f.

²⁸³ Vgl. Schlick et al., 2014, S.59.

²⁸⁴ Vgl. Schlick et al., 2014, S.58f.

²⁸⁵ Vgl. Kagermann, 2015, S.31.

Produktes nicht immer möglich bzw. sinnvoll, weshalb in diesen Fällen die nächst größere Transporteinheit mit Intelligenz ausgestattet wird.²⁸⁶ Der Begriff „intelligentes Produkt“ umfasst daher im Folgenden neben einzelnen intelligenten Produktkomponenten eines Auftrags²⁸⁷ auch intelligente Ladungs-²⁸⁸ und Werkstückträger²⁸⁹.

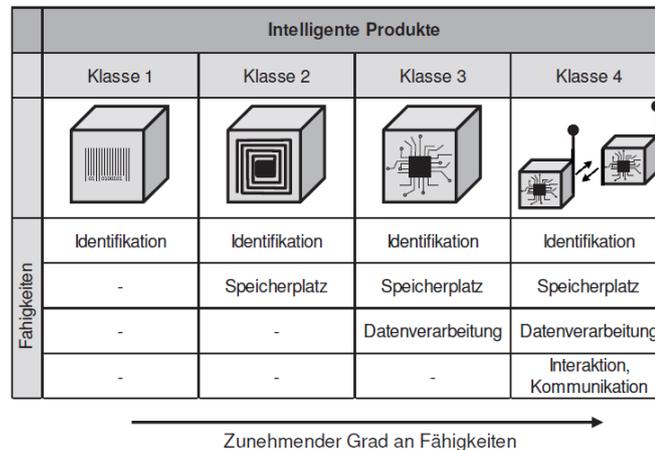


Abb. 10: Entwicklungsstufen intelligenter Produkte

Abhängig von ihren Fähigkeiten durchlaufen intelligente Produkte auf dem Weg zu einem CPS vier Entwicklungsstufen (s. Abb. 10), wobei die ersten beiden bereits heute in vielen Betrieben realisiert wurden. Zu Beginn sind intelligente Produkte noch passiv. Sie besitzen lediglich eine eindeutige Identifikation, z.B. in Form eines Barcodes. Über diesen können produktspezifische Daten aus einer externen Datenbank abgerufen werden.²⁹⁰

In der zweiten Stufe werden intelligente Produkte mit einem eigenen Datenspeicher ausgestattet.²⁹¹ Sie haben selbst allerdings noch keine Analysefähigkeit, weshalb die eigentliche Rechenleistung noch in der IT-Infrastruktur stattfindet.²⁹² Die bisher fortschrittlichste Technologie in dieser Entwicklungsstufe sind sog. Radio-Frequency-Identification (RFID)-Systeme. Hierbei können Daten in Funketiketten, sog. RFID-Tags, die auf den Produkten, Ladungs- oder Werkstückträgern angebracht sind, gespeichert werden und mithilfe eines Schreib- und Lesegeräts berührungslos und ohne Sichtkontakt ausgelesen oder geändert werden.²⁹³ Einerseits können dadurch

²⁸⁶ Vgl. Schlick et al., 2014, S.60.

²⁸⁷ Vgl. Engelhardt, 2015, S.101.

²⁸⁸ Vgl. Günther/Klenk/Tenerowicz-Wirth, 2014, S.305.

²⁸⁹ Vgl. Schlick et al., 2014, S.60.

²⁹⁰ Vgl. Engelhardt, 2015, S.41.

²⁹¹ Vgl. Engelhardt, 2015, S.41.

²⁹² Vgl. Bauernhansl, 2014, S.16.

²⁹³ Vgl. Engelhardt, 2015, S.25.

konstant bleibende Produktdaten, wie Bearbeitungsanweisungen, vorzunehmende Arbeitsgänge, nötige Konfiguration der Anlagen, zu prüfende Qualitätsmerkmale oder Liefertermine, an Prüf- oder Arbeitsstationen bereitgestellt werden. Andererseits können Produktionsdaten, die sich ständig aktualisieren (Produktionshistorie) und somit direkten Einfluss auf den produktspezifischen Produktionsablauf haben an den relevanten Stellen im Wertstrom in Echtzeit abgerufen bzw. auf das Produkt übertragen werden. Zu diesen zählen bspw. der Produktstatus (in Ordnung/nicht in Ordnung) oder Bearbeitungsfortschritt, -zeitpunkte und -orte.²⁹⁴ Dies schafft ein reales Abbild der Fertigung und erlaubt situationsbezogene Reaktionen der Produktionssteuerung.²⁹⁵

In der dritten Stufe werden intelligente Produkte mit einer aktiven Intelligenz ausgestattet. Sie können mithilfe von Sensoren²⁹⁶ selbst Zustände erfassen und dank eingesetzter Mikrocomputer, sog. eingebetteter Systeme²⁹⁷, eigenständig Daten analysieren und Entscheidungen ableiten.²⁹⁸

Schließlich werden intelligente Produkte in der vierten Generation zu CPS per Definition (vgl. Kapitel 3.3.1.1), d.h. zu netzwerkfähigen und eigenständigen Systemen, die mit anderen CPS interagieren und kommunizieren können.²⁹⁹ Indem sie selbst bzw. über Softwareagenten Bearbeitungsschritte, Anlagen und Materialien reservieren, Ausführungen kontrollieren, drohende Verzögerungen erkennen und zusätzliche Kapazitäten organisieren bzw. unvermeidbare Verzögerungen melden, können sich intelligente Produkte folglich autonom und dezentral durch die Produktion steuern.^{300,301}

3.4.3 Intelligente Maschinen

Ebenso wichtig für die Umsetzung einer Smart Factory sind intelligente, vernetzte Maschinen bzw. Anlagen, die ihren eigenen Status kennen, darauf basierend Aktionen veranlassen und mit ihrer Umgebung interagieren können. Im Vergleich zu intelligenten Produkten sind die Technologien in diesem Bereich bereits ausgereifter.

²⁹⁴ Vgl. Engelhard, 2014, S.98ff.

²⁹⁵ Vgl. Engelhardt, 2015, S.28.

²⁹⁶ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.17.

²⁹⁷ Vgl. Schlick et al., 2014, S.60.

²⁹⁸ Vgl. Engelhardt, 2015, S.41.

²⁹⁹ Vgl. Engelhardt, 2015, S.42.

³⁰⁰ Vgl. Spath et al., 2015, S.57.

³⁰¹ Vgl. Engelhardt, 2015, S.43.

So werden Anlagen und Maschinen schon seit Beginn der dritten industriellen Revolution (vgl. Kapitel 3.1.1) mithilfe von SPS und Computern gesteuert.³⁰² Sie stellen demzufolge bereits heute nützliche Datenquellen dar, wobei eine durchgängige Vernetzung nach aktuellem Stand der Technik noch nicht vorhanden ist.

Eine solche durchgängige Vernetzung würde ermöglichen, aktuelle Daten aus der Produktion zu Betriebszustand, Produktionsleistung oder -qualität mithilfe von entsprechender Sensorik in Echtzeit zu überwachen und unverzüglich in die Produktionspläne einfließen zu lassen.³⁰³ Darüber hinaus könnten Simulationen zur Prozessoptimierung über eine virtuelle Abbildung der vernetzten Maschinen durchgeführt werden.³⁰⁴ In Zukunft sollen bspw. intelligente Roboter-, Spritzguss oder Werkzeugmaschinen eintreffende Werkstücke erkennen, sämtliche für die Bearbeitung relevanten Informationen in Echtzeit abrufen, die Qualität nach der Bearbeitung optisch oder durch Messungen kontrollieren und etwaigen Nachschub- oder Wartungsbedarf melden können, bevor es zu Engpässen oder Ausfällen kommt.³⁰⁵

Schließlich wird vorhergesagt, dass Maschinen dank ihrer Intelligenz und Kommunikationsfähigkeit künftig selbstorganisationsfähig werden. Unter Berücksichtigung von Zielgrößen (z.B. Auslastung, Liefertermine) und Bedingungen (z.B. Fähigkeiten der Maschinen, verfügbare Kapazitäten) sollen die Maschinen dann, repräsentiert durch Softwareagenten, innerhalb eines CPPS ihre Dienste in der Cloud anbieten und mit anderen Maschinen aushandeln können, wo, wann und wie einzelne Produkte am besten produziert werden.^{306,307} Im Falle kurzfristiger Auftragsänderungen oder Störungen sind intelligente Maschinen zudem in der Lage, sich selbstständig zu organisieren und somit an die geänderten Bedingungen anzupassen.³⁰⁸ Die Fähigkeit des fallweisen Aushandelns der Bearbeitung eingehender Kundenaufträge unter den intelligenten Maschinen wird im Folgenden als situationsbasierte Produktionssteuerung³⁰⁹ bezeichnet und für die nachfolgenden

³⁰² Vgl. Müller, 2015, S.107.

³⁰³ Vgl. Schöning/Dorchain, 2014, S.544.

³⁰⁴ Vgl. Verl/Lechler, 2014,S.241.

³⁰⁵ Vgl. Müller, 2015, S.107.

³⁰⁶ Vgl. Kleinemeier, 2014, S.576.

³⁰⁷ Vgl. Vogel-Heuser, 2014, S.40f.

³⁰⁸ Vgl. Vogel-Heuser/Schütz/Göhner, 2015, S.194.

³⁰⁹ Vgl. Engelhardt, 2015, S.61ff.

Untersuchungen als Fähigkeit intelligenter Maschinen zugrundegelegt. Voraussetzung dafür ist die Kenntnis der Maschinen von den ihnen zur Verfügung stehenden Fertigungsverfahren, ihren im Werkzeugmagazin vorhandenen Werkzeugen sowie deren Einsatzmöglichkeiten. Ebenso wichtig ist es für intelligente Maschinen in diesem Zusammenhang, ihren eigenen Zustand wie freie Kapazitäten oder eine vorliegende Störung, sowie die benötigten Informationen zu den zu bearbeitenden Werkstücken, wie die notwendige Konfiguration oder deren Fertigstellungstermine, zu kennen.³¹⁰

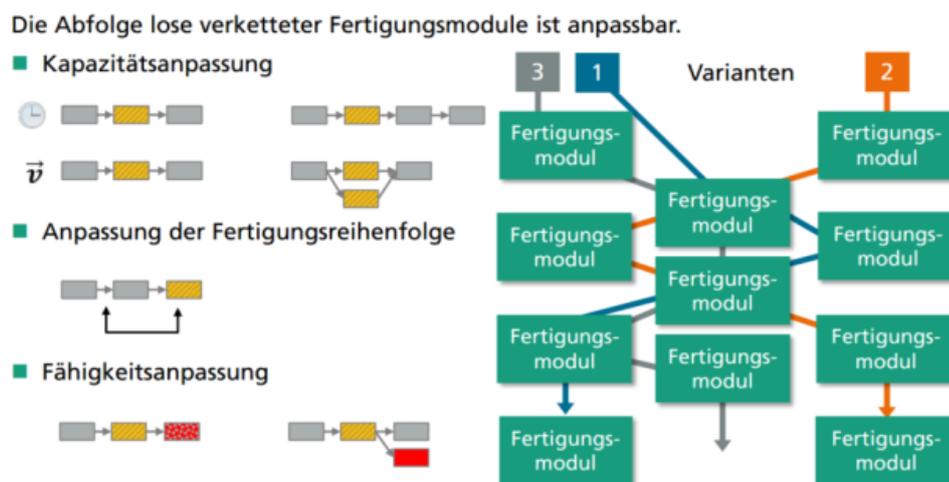


Abb. 11: Lose verkettete autonome Produktionsmodule

Darüber hinaus muss zur Realisierung einer situationsbasierten Produktionssteuerung eine flexible und wandlungsfähige Produktion sichergestellt werden. Demzufolge ist es Ziel der Smart Factory, intelligente Maschinen modular und universell zu gestalten.³¹¹ Maschinen sollen sich in Zukunft automatisch und unmittelbar konfigurieren und vernetzen können, wenn eine Umrüstung auf eine andere Produktvariante notwendig ist.³¹² Bei hohen Anforderungen an Flexibilität und Wandelbarkeit an die Produktion, wie bspw. in der Automobilindustrie, sollen sich schließlich starre Produktionslinien aufgrund ihrer mangelnden Flexibilität auflösen und zu lose verketteten autonomen Produktionsmodulen entwickeln (s. Abb. 11).³¹³ Solche Produktionsmodule sollen in ihrer Kapazität, ihrer Fertigungsreihenfolge und ihren Fähigkeiten flexibel anpassbar sein.^{314,315} Diese Entwicklungen soll es jeder

³¹⁰ Vgl. Ortmann, 2015, S.7.

³¹¹ Vgl. Kagermann/Wahlster/Helbig, 2012, S.60.

³¹² Vgl. Naumann/Dietz/Kuss, 2014, S.519.

³¹³ Vgl. Soder, 2014, S.97.

³¹⁴ Vgl. „Die Vierte Industrielle Revolution – Smart Production 4 Automotive“, 2015, S.19.

³¹⁵ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.21.

Produktvariante ermöglichen, einen anderen Weg durch den Produktionsraum zu nehmen.³¹⁶ Gleichzeitig soll dies eine flexible Anpassung der Produktion an kontinuierliche, kundengetriebene Produktveränderungen bis hin zu einer Fertigung in Losgröße eins erlauben³¹⁷. In der Literatur wird angenommen, dass sich die Größe der Produktionsmodule nach der Komplexität der Aufgabe richten wird. Werden die Produkte in hoher Varianz oder sogar personalisiert hergestellt, sollen die Produktionsmodule wenige, im Extremfall sogar nur einen Prozessschritt umfassen. Bei relativ niedriger Variantenzahl soll es größere Produktionsmodule geben. In der Literatur wird angenommen, dass eine starre Verkettung der Prozessschritte in diesen Produktionsmodulen weiterhin möglich ist.³¹⁸ Obwohl diese Entwicklungen nicht zwingend in jeder Fertigung Realität werden müssen, sollen sie im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Annahme für systematische Untersuchungen in Verbindung mit intelligenten Maschinen gelten.

3.4.4 Intelligente Assistenzsysteme

Selbst wenn sich intelligente Produkte selbstständig und dezentral durch die Wertschöpfungskette steuern, kann auf menschliche Tätigkeiten, Sinneswahrnehmungen und Entscheidungen in einer Smart Factory nicht verzichtet werden.³¹⁹ So wird dem Menschen trotz der zunehmenden Automatisierung auch in Zukunft eine zentrale Rolle in der Produktion zugesprochen. Einerseits muss er im Fall von Störungen, Optimierungspotenzialen oder neuen Anforderungen, denen die CPS nicht gewachsen sind, steuernd und regelnd in das cyber-physische Gefüge eingreifen und Lösungen finden.^{320,321} Andererseits wird er aufgrund seiner Flexibilität auch weiterhin mit manuellen Tätigkeiten, z.B. an Handmontage-Arbeitsplätzen, bei Qualitätskontrollen oder im Rahmen von Instandhaltungsmaßnahmen seinen Platz zwischen den autonom organisierten Produktionsprozessen finden.³²²

Egal in welcher Rolle – der Mensch ist dank der intelligenten Produktionsfaktoren und etwaiger IT-Systeme in der Smart Factory einer Flut an Daten (z.B. Sensordaten, Daten von Auftragserfassungs- und Planungssystemen, Steuerungsdaten der

³¹⁶ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.21.

³¹⁷ Vgl. Kleinemeier, 2014, S.576.

³¹⁸ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.21.

³¹⁹ Vgl. Spath et al., 2015, S.60.

³²⁰ Vgl. Günther/Klenk/Tenerowicz-Wirth, 2014, S.314.

³²¹ Vgl. Gorecky/Loskyll, 2014, S.537.

³²² Vgl. Feld/Hoffmann/Schmidt, 2015, S.40.

intelligenten Produktionsanlagen und Produkten) ausgesetzt. Um am richtigen Ort, zur richtigen Zeit genau diejenige Informationen zu erhalten, die zur Bearbeitung der Arbeitsaufgabe erforderlich sind, benötigt er daher die Unterstützung von intelligenten Assistenzsystemen³²³. Diese sind mobil und personalisiert und vernetzen den Mitarbeiter mit der virtuellen Welt der CPS.³²⁴ Diese Vernetzung erlaubt es den Assistenzsystemen in Echtzeit relevante Daten zu filtern und in ihren Zusammenhängen als Informationen bereitzustellen. Die Informationen werden kontextabhängig, d.h. je nach Rolle, Aufgabe, Umgebung und individuellen Bedürfnissen des Mitarbeiters, über eine geeignete Mensch-Maschine-Schnittstelle dargestellt.³²⁵ Der Mensch kann daraus geeignete Schlüsse für seine Tätigkeiten ziehen und diese somit schneller und fehlersicherer ausführen – unabhängig davon, ob für planerisch-steuernde oder für manuelle Tätigkeiten.³²⁶ Über Assistenzsysteme können bspw. im Bereich der Instandhaltung und an manuellen Montageplätzen interaktive, virtuelle Handlungsanweisungen gegeben werden. Bei der Überwachung von Produktionsprozessen und der Qualitätskontrolle können Assistenzsysteme die einzelnen Status der CPS übermitteln. Außerdem kann mithilfe von Assistenzsystemen das Verhalten von CPS im Rahmen der Planung und Optimierung von Prozessen simuliert werden.³²⁷ Ferner sind operative Mitarbeiter in der Lage, ihr Expertenwissen im Sinne von Best Practice Ansätzen mit den Kollegen zuteilen, indem sie interaktive, virtuelle Anleitungen mithilfe von Assistenzsystemen aufzeichnen und online zur Verfügung stellen.³²⁸

Beispielhafte Technologien für Assistenzsysteme sind Tablet-Computer³²⁹, Augmented Reality-Technologien, bei denen ein reales Kamerabild von digitalen Informationen kontextabhängig überlagert wird³³⁰, aber auch mobile Montageassistenten, die den Monteur als fahrende Werkbank mithilfe einer digitalen Anzeige durch sämtliche Arbeitsschritte leiten³³¹.

³²³ Vgl. Schlick et al., 2014, S.62.

³²⁴ Vgl. ten Hompel/Henke, 2014, S.616.

³²⁵ Vgl. Vogel-Heuser, 2014, S.45.

³²⁶ Vgl. Günther/Klenk/Tenerowicz-Wirth, 2014, S.314.

³²⁷ Vgl. Gorecky/Loskyll, 2014, S.529.

³²⁸ Vgl. Gorecky/Loskyll, 2014, S.537.

³²⁹ Vgl. Schlick et al., 2014, S.62.

³³⁰ Vgl. Feld/Hoffmann/Schmidt, 2015, S.40.

³³¹ Vgl. „Mobile Assistenten - Die Vision von SEW-Eurodrive von der Industrie 4.0“, 2015, S.1.

3.4.5 Intelligente Transportsysteme

Obwohl Arbeitsstationen und Produktionsmodule in der Smart Factory im Sinne intelligenter Maschinen digital miteinander vernetzt sein sollen, muss die physische Vernetzung, d.h. der Materialfluss zwischen den Produktionsmodulen sowie zwischen Lager und den Produktionsmodulen, weiterhin mithilfe fördertechnischer Einrichtungen erfolgen.³³² Voraussetzung für den Einsatz flexibel vernetzbarer, cyber-physischer Produktionsmodule ist daher ein Materialflusssystem, das so flexibel ist, dass je nach Produktvariante die entsprechenden Produktionsmodule angesteuert werden können.³³³ Fest installierte Fördertechnik wird in der Smart Factory folglich von intelligenten Transportsystemen abgelöst³³⁴, welche als CPS mit der Prozesslandschaft kommunizieren und sich autonom den Weg durch selbige suchen³³⁵.

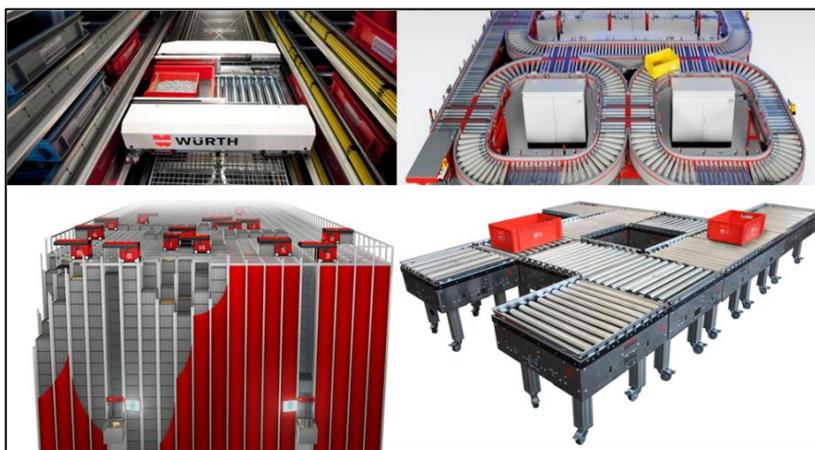


Abb. 12: Bsp. für autonome Fördertechnikmodule

Eine funktionsorientierte Modularisierung der Fördertechnik stellt einen ersten Schritt zur Entstehung eines flexiblen Materialflusssystems dar. Gemeint ist damit der Einsatz von cyber-physischen Fördertechnikmodulen, die mechanisch, energetisch und steuerungstechnisch gekapselt sind und sich dadurch innerhalb des Systems je nach Anforderung an den Transportweg eigenständig und flexibel koppeln können. Abb. 12 zeigt einige Beispiele für solch autonome Fördertechnikmodule, die sowohl für die flexible Aus- und Einlagerung innerhalb eines zentralen Lagers (linke Seite der Abb. 12) als auch für den flexiblen Transport zu oder zwischen den Produktionsmodulen eingesetzt werden können (rechte Seite der Abb. 12). Diese

³³² Vgl. Günther/Klenk/Tenerowicz-Wirth, 2014, S.298.

³³³ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.21.

³³⁴ Vgl. ten Hompel/Henke, 2014, S.617.

³³⁵ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.22.

sind dank eingebetteter Mikrocontroller in der Lage, materialflussrelevante Informationen der intelligenten Produkte abzurufen und sich via Internet der Dinge und Dienste untereinander abzustimmen, um dem jeweiligen Transportgut einen optimalen Transport (z.B. schnellste Route) anzubieten.³³⁶ Alternativrouten bei Störungen werden dezentral und systemimmanent berechnet³³⁷, sodass damit einhergehende Produktionsstillstände vermieden werden können³³⁸.



Abb. 13: Bsp.s. für autonome Transportfahrzeuge

Eine weitere Möglichkeit stellen fahrerlose Transportsysteme (FTS) dar. Im Gegensatz zur statischen Stetigfördertechnik werden hierbei zahlreiche autonome, mit Sensoren ausgestattete Transportfahrzeuge eingesetzt, die die Transporteinheiten zeitlich und örtlich flexibel durch die Smart Factory transportieren können.³³⁹ Beispiele für solch autonome Transportfahrzeuge sind in Abb. 13 ersichtlich. Klassisch eingesetzte Navigationstechnologien auf diesem Gebiet bedingen noch unterschiedliche Arten vordefinierter Fahrspuren. Bei der Liniennavigation befinden sich optische, magnetische oder induktive kontinuierliche Linien im Boden. Sind Magnete oder RFID-Tags nach einem definierten Raster in den Boden eingelassen, handelt es sich um eine Rasternavigation. Im Rahmen der Lasernavigation werden an Wänden und Regalen befestigte Reflektormarken, welche die Ermittlung der Fahrzeugposition mithilfe eines Laserscanners und einer

³³⁶ Vgl. Günther/Klenk/Tenerowicz-Wirth, 2014, S.300ff.

³³⁷ Vgl. Günther/Klenk/Tenerowicz-Wirth, 2014, S.300ff.

³³⁸ Vgl. Soder, 2014, S.100.

³³⁹ Vgl. Soder, 2014, S.97.

Recheneinheit ermöglichen, eingesetzt.^{340,341} In ihrer weitesten Entwicklung werden FTS zu sog. zellularen Transportsystemen (s. rechts oberes Bild der Abb. 13).³⁴² Mithilfe von 3D-Sensoren und programmierter Algorithmen können sich diese intelligenten Transportsysteme direkt an der aktuellen Umgebung orientieren, sodass sie ihre Topologie eigenständig ohne manuelle Eingriffe an aktuelle Gegebenheiten anpassen und sich ihren Weg zum Ziel selbst suchen können.^{343,344} Darüber hinaus verhandeln sie mittels Softwareagenten, die in ihre eingebetteten Systeme integriert sind, eingehende Transportaufträge untereinander, legen Vorfahrtsregeln fest und kommunizieren Positionsdaten und Störungen selbstständig. In der Folge entsteht ein sich frei bewegendes, dezentral gesteuerter Schwarm von Transportfahrzeugen, „welcher sowohl eine maximal flexible Verknüpfung zwischen Transportquellen und -senken als auch eine flexible Anpassung der Transportleistung an schwankende Bedarfe durch eine Erhöhung der Fahrzeuganzahl ermöglicht“³⁴⁵. Schließlich lassen sich FTS zusätzlich mit Manipulatoren ausstatten, sodass Bauteile und Ladungsträger direkt aus dem Bearbeitungs- oder Lagerbereich entnommen oder dort positioniert werden können (s. linkes unteres Bild der Abb. 13). Dies setzt eine Kommunikation zwischen FTS und der jeweiligen Station voraus.³⁴⁶

³⁴⁰ Vgl. Bubeck et al., 2014, S.223ff.

³⁴¹ Vgl. Dörr/Garcia Lopez, 2015, S.10ff.

³⁴² Vgl. ten Hompel/Henke, 2014, S.617.

³⁴³ Vgl. Bubeck et al., 2014, S.223ff.

³⁴⁴ Vgl. ten Hompel/Kirsch/Kirks, 2014, S.208ff.

³⁴⁵ Soder, 2014, S.97.

³⁴⁶ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.22.

4 Lean Production und Industrie 4.0

4.1 Anwendungsgebiete

Produzierende Unternehmen sind aufgrund des steigenden globalen Wettbewerbs einem erhöhten Termin- und Kostendruck ausgesetzt und müssen durch die steigende Nachfrage nach individuellen Produkten eine größere Anzahl an Varianten bei hohen Stückzahlenschwankungen und kürzer werden Produktlebenszyklen produzieren können. Anstelle der variantenreichen Serienfertigung rückt daher immer mehr eine sog. Mass Customization in den Vordergrund. Ziel ist eine kundenindividuelle Massenproduktion, d.h. eine Fertigung individueller Produkte zu Kosten der Massenproduktion.³⁴⁷ Mass Customization ist demnach als eigenständiger Fertigungstyp neben Einzel-, Serien und Massenfertigung zu sehen.³⁴⁸ In Verbindung mit der Anforderung eines immer effizienter werdenden Ressourceneinsatzes bei gleichzeitiger Zunahme der Leistungsfähigkeit, Flexibilität und Geschwindigkeit der Prozesse, entsteht durch Mass Customization ein deutlicher Anstieg der Komplexität in modernen Produktionssystemen.³⁴⁹

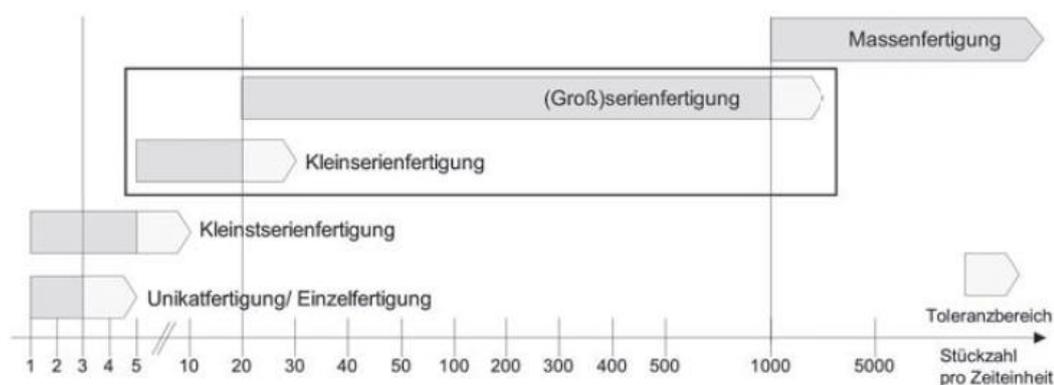


Abb. 14: Geeignete Fertigungstypen der Lean Production

Die schlanke Produktion, deren Potenziale sich im Bereich der Klein- und Großserienfertigung (s. Abb. 14) aufgrund der dort vorliegenden hohen und stabilen Nachfrage sowie der begrenzten Variantenvielfalt am besten ausschöpfen lassen und sich daher insbesondere dort durchgesetzt hat³⁵⁰, stößt im Kontext der Mass Customization jedoch häufig an ihre Grenzen.³⁵¹ Starke Stückzahlenschwankungen

³⁴⁷ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.7.

³⁴⁸ Vgl. Piller, 2001, S.210.

³⁴⁹ Vgl. Steinhilper et al., 2012, S.360ff.

³⁵⁰ Vgl. Specht/Stefanska, 2009, S.37.

³⁵¹ Vgl. Siepmann, 2016a, S.22.

durch schwankende Auftragsvolumina stehen im Konflikt mit der in einer lean organisierten Fabrik benötigten geglätteten Kapazitätsnutzung. In solchen Fällen sieht die schlanke Produktion eine Entkopplung von der Kundennachfrage durch ein Fertigwarenlager und das Heijunka-Konzept (vgl. Kapitel 2.3.3.2) vor, was im Gegenzug jedoch häufig zu unwirtschaftlichen Fertigwarenbeständen führt³⁵². Zudem widerspricht dieser Kompromiss dem eigentlichen Ziel der direkten Verknüpfung zwischen Produktion und dem Markt.³⁵³ Darüber hinaus ist die schlanke Produktion, obwohl sie die Fertigung in einer höheren Variantenvielfalt als die Massenproduktion erlaubt, für die Fertigung von Produkten in sehr hoher Variantenvielfalt oder gar in kundenindividueller Ausführung ungeeignet. Dies liegt insbesondere daran, dass die Produktion vieler unterschiedlicher Varianten i.d.R. starke schwankende Arbeitsinhalte mit unterschiedlichen Bearbeitungszeiten sowie komplexe Materialflüsse mit sich bringt.^{354,355} Die Folge ist ein ungleichmäßiger Produktionsfluss, woraus sich erneut ein Widerspruch gegenüber der Notwendigkeit einer geglätteten Kapazitätsnutzung ergibt. Wie gezeigt, ist eine schlanke Produktion folglich nur bedingt in der Lage, auf die Bedingungen der Mass Customization zu reagieren.³⁵⁶ Unter diesen für viele Unternehmen geltenden Rahmenbedingungen scheint in Zukunft eine Erweiterung der nach den klassischen Prinzipien und Werkzeugen der Lean Production organisierten Fabriken notwendig, um die steigende Komplexität beherrschen zu können.³⁵⁷

Der Einführung von Industrie 4.0-Technologien wird insbesondere dann ein großer Nutzen zugesprochen, wenn der Fertigungstyp der Mass Customization mit hoch individualisierten Produkten angesprochen wird. Wie beschrieben, sind dies die gleichen Rahmenbedingungen, unter denen die schlanke Produktion zunehmend ineffizient wird. Zudem fehlt es einer Smart Factory bisher an Gestaltungsprinzipien, Konzepten und Methoden, auf denen der technologische Ansatz von Industrie 4.0 aufbauen kann.³⁵⁸ Daher scheint eine Kombination der beiden Ansätze vielversprechend.³⁵⁹

³⁵² Vgl. Gerberich, 2011, S.175f.

³⁵³ Vgl. Kolberg/Zühlke, 2015, S.1870f.

³⁵⁴ Vgl. Specht/Stefanska, 2009, S.37.

³⁵⁵ Vgl. Kolberg/Zühlke, 2015, S.1871

³⁵⁶ Vgl. Kolberg/Zühlke, 2015, S.1870f.

³⁵⁷ Vgl. Siepmann, 2016a, S.22.

³⁵⁸ Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015b, S.159.

³⁵⁹ Vgl. Bick, 2014, S.46.

Da die dargestellten Anwendungsgrenzen von Lean Production in Zukunft von einer Vielzahl an Unternehmen im produzierenden Gewerbe berücksichtigt werden müssen, sollen diese für die folgende Analyse des Zusammenspiels zwischen Lean Production und Industrie 4.0 als Rahmenbedingungen angenommen werden.

4.2 Grundsätzliche Kompatibilität

Um festzustellen ob sich Lean Production und Industrie 4.0 vereinen lassen, ist zunächst die grundsätzliche Kompatibilität zwischen Industrie 4.0 und den Zielen, den Grundprinzipien der Mitarbeiter- und Kundenorientierung und der Standardisierung sowie dem Umgang mit Komplexität einer schlanken Produktion zu prüfen. Darauf aufbauend kann eine Detailanalyse erfolgen, in der die einzelnen Lean-Werkzeuge den Technologieparadigmen in der Smart Factory gegenübergestellt werden.

Hinsichtlich der Untersuchung der beiden Ansätze auf grundsätzliche Kompatibilität ist zunächst anzumerken, dass sowohl der methodische Ansatz der Lean Production als auch der technologische Ansatz der Industrie 4.0 die allgemeinen Zieldimensionen Qualität, Zeit und Kosten verfolgen.³⁶⁰ Die Lean-Philosophie strebt dabei eine möglichst vollständige Vermeidung von Verschwendungen durch kontinuierliche Verbesserung der Prozesse an, um die Produktivität und Flexibilität nachhaltig zu steigern. Das Ziel der Smart Factory ist ebenso die Steigerung von Produktivität und Flexibilität³⁶¹, wodurch die Vermeidung jeglicher Verschwendungen zwangsläufig ebenso in den Fokus rücken.³⁶² Die Identifikation, Visualisierung und Eliminierung von Verschwendungen werden in der Smart Factory vereinfacht. So können durch die Verknüpfung zwischen Informations- und Materialfluss bspw. Wartezeiten kontinuierlich abgeglichen und eliminiert oder Bestände in Echtzeit nachverfolgt und optimiert werden.³⁶³ Industrie 4.0 bringt demnach neue Potenziale zur Vermeidung von Verschwendungen mit sich, die im Rahmen der klassischen Lean Production noch nicht vollständig aufgespürt werden konnten.³⁶⁴ Lean organisierte Fabriken verwendeten bisher viele getrennte Informationsquellen und -medien, was zur Entstehung sog. Medienbrüche, d.h. Wechsel der

³⁶⁰ Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015b, S.158.

³⁶¹ Vgl. Kaspar/Schneider, 2015, S.17.

³⁶² Vgl. Frank, 2014, S.18.

³⁶³ Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015b, S.158.

³⁶⁴ Vgl. Lanza et al., 2014, S.66.

Informationstragenden Medien innerhalb eines Prozesses, führte. Nun können Industrie 4.0-Anwendungen dieses bezügliche Optimierungspotenzial durch eine durchgängige, echtzeitfähige Informationsverarbeitung sowie eine Steigerung der Transparenz von technologischen und organisatorischen Prozessen ausschöpfen. Wie Abb. 15 zeigt, erweitert Industrie 4.0 das Optimierungspotenzial des Produktionssystems folglich um eine Dimension in Richtung Vernetzung und Dienste³⁶⁵, sodass die Reduzierung von Medienbrüchen als zusätzliches Optimierungsziel gesehen werden kann.³⁶⁶ Von hoher Bedeutung für lean organisierte Unternehmen ist daher, die medienbruchfrei fließenden Informationen in den methodischen Rahmen der Lean Production einfließen zu lassen.³⁶⁷

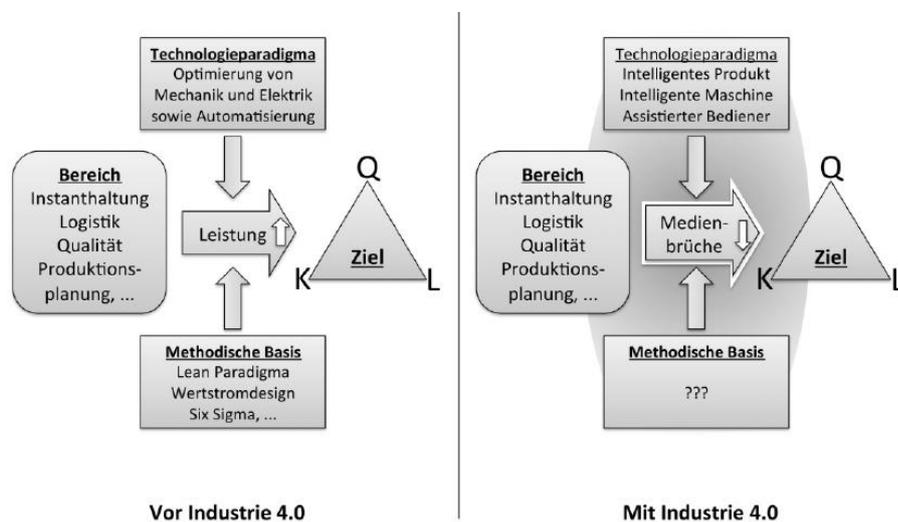


Abb. 15: Reduzierung von Medienbrüchen als zusätzliches Optimierungsziel durch Industrie 4.0

Hinsichtlich des Prinzips der Mitarbeiterorientierung ist festzustellen, dass sowohl Produktionssysteme nach dem Vorbild der Lean Production als auch der Ansatz der Industrie 4.0 – trotz seines hohen Grads der Automatisierung und Digitalisierung – als sozio-technische Systeme verstanden werden können.^{368,369} Sozio-technische Systeme bestehen aus den Teilsystemen Mensch, Organisation und Technik und berücksichtigen daher Belange des Menschen und der Organisation bei der Technikentwicklung und -einführung in ihren wechselseitigen Abhängigkeiten.³⁷⁰ Während die Lean-Philosophie den Mitarbeiter als wichtigsten Produktionsfaktor sieht und sich das Prinzip der Mitarbeiterorientierung durch sämtliche Lean-

³⁶⁵ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.19.

³⁶⁶ Vgl. Schlick et al., 2014, S.77.

³⁶⁷ Vgl. Schlick et al., 2014, S.83.

³⁶⁸ Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015a, S.54.

³⁶⁹ Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015b, S.158.

³⁷⁰ Vgl. Hartmann, 2015, S.8.

Werkzeuge zieht³⁷¹, zielt Industrie 4.0 in Abgrenzung zu CIM darauf ab, den Menschen als kreativen Akteur und Entscheider durch technologische Unterstützung im cyber-physischen Umfeld zu unterstützen^{372,373}.

Ebenso behält auch das Prinzip der Kundenorientierung im Kontext von Industrie 4.0 seine Wichtigkeit. Sie wird, wie auch schon im Rahmen von Lean Production, weiterhin Ausgangspunkt aller Aktivitäten bleiben. Aufgrund der Digitalisierung und Überschneidung von virtueller und realer Welt entstehen kürzere und direktere Informationswege zwischen den intelligenten Akteuren, sodass individuelle Kundenwünsche unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit im Sinne einer Mass Customization massentauglich gemacht werden können.³⁷⁴ Wie Roy/Mittag/Baumeister feststellen, wird „die Notwendigkeit einer Pull-Produktion in einer smarten Fabrik, [welche im Rahmen von Lean Production klassischerweise durch Kanban erreicht wird], [...] zu diskutieren sein“³⁷⁵. Daher werden etwaige Unterschiede oder Weiterentwicklungen in der Vorgehensweise zur Erreichung einer kundenorientierten Produktion durch Industrie 4.0-Technologien im Rahmen der Detailanalyse angesprochen.

Hinsichtlich des Prinzips der Standardisierung ist eine gewisse Diskrepanz zwischen Lean Production und Industrie 4.0 festzustellen. Dies zeigt sich insbesondere darin, dass bei Lean vordefinierte, regelmäßige Strukturen für Prozesse vorzufinden sind, während Prozesse in der Smart Factory durch CPS fallweise ausgehandelt werden.^{376,377} Nichtsdestotrotz wird es auch im Rahmen von Industrie 4.0 Standards geben. Insbesondere im Bereich komplexer manueller Arbeit werden sie weiterhin der Stabilisierung von Arbeitsabläufen dienen, Verantwortlichkeiten festlegen und die Grundlage für kontinuierliche Verbesserungen bilden. Für den Mitarbeiter müssen Prozesse daher auch künftig standardisiert, nachvollziehbar gestaltet und kommuniziert werden. Zudem sind Standards zur Sicherstellung der technischen Kompatibilität der Cyber-Physischen Systeme notwendig. Insgesamt wird das Prinzip

³⁷¹ Vgl. Gerberich, 2011, S.103.

³⁷² Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015b, S.158.

³⁷³ Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015a, S.54.

³⁷⁴ Vgl. Roy/Mittag/Baumeister, 2015, S.29.

³⁷⁵ Roy/Mittag/Baumeister, 2015, S.29.

³⁷⁶ Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015a, S.54.

³⁷⁷ Vgl. „Industrie 4.0 - Ein Schlagwort eingeordnet in das Weltbild der Schlanken Produktion“, 2014, S.1.

der Standardisierung daher in Zukunft flexibler und dynamischer zu handhaben sein.^{378,379}

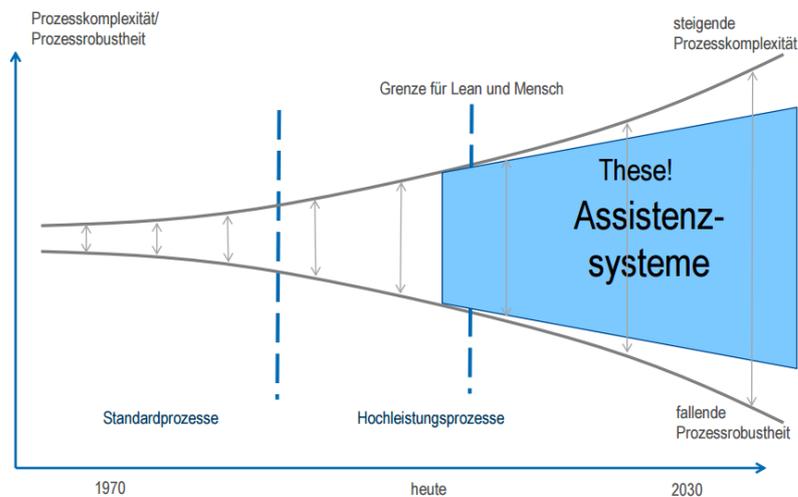


Abb. 16: Komplexitätsreduzierung durch Assistenzsysteme an den Grenzen von Lean Production

Vor dem Hintergrund der permanenten Weiterentwicklung der Produktion zu Hochleistungsprozessen ist schließlich die grundsätzliche Kompatibilität der beiden Ansätze im Umgang mit Komplexität zu untersuchen. Die Weiterentwicklung der Produktion führt einerseits zu einer steigenden Prozesskomplexität und andererseits zu einer fallenden Prozessrobustheit. Dies erhöht den Herausforderungsgrad für die Shopfloor-nahen Mitarbeiter.³⁸⁰ Lean Production und Industrie 4.0 haben die gemeinsame Motivation, Wege und Lösungsmöglichkeiten für den effizienten Umgang mit dieser steigenden Komplexität zu finden und dadurch die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens sicherstellen zu können.³⁸¹ Lean Production setzt dabei vor allem auf Komplexitätsreduzierung durch den Einsatz effizienter Methoden mit einfachen Mitteln, d.h. zumeist ohne IT-Unterstützung, sowie auf dezentrale, selbststeuernde Regelkreise.³⁸² Folglich lässt Lean Production die Steigerung der Herausforderung für den Menschen bei hoher Komplexität nicht zu, sodass sowohl die Lean-Methoden als auch der Mensch bei den heute vorliegenden Hochleistungsprozessen oft an ihre Grenzen stoßen.³⁸³ Wie auch in der schlanken Produktion verfolgt Industrie 4.0 einen dezentralen Steuerungsansatz – und zwar durch eine dezentrale Steuerung des CPPS und die Auflösung der

³⁷⁸ Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015a, S.54f.

³⁷⁹ Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015b, S.158f.

³⁸⁰ Vgl. Hofmann, 2014, S.104.

³⁸¹ Vgl. Kaspar/Schneider, 2015, S.17.

³⁸² Vgl. Kaspar/Schneider, 2015, S.17f.

³⁸³ Vgl. Hofmann, 2014, S.104.

Automatisierungspyramide (vgl. Kapitel 3.3.1.4). Im Gegensatz zur schlanken Produktion strebt Industrie 4.0 jedoch an, die Komplexität mithilfe von CPS zu beherrschen und erst die für den Anwender ankommende Komplexität mittels intelligenter Assistenzsysteme auf ein beherrschbares Maß zu reduzieren.³⁸⁴ Dieser Zusammenhang wird in Abb. 16 deutlich. Auf den Werkzeugen der Lean Production aufbauend, ermöglicht der Einsatz von Industrie 4.0-Elementen folglich, die den Möglichkeiten der Lean Production übersteigende Komplexität zu beherrschen ohne dabei eine fallende Prozessrobustheit akzeptieren zu müssen.³⁸⁵

Die Ausführungen zeigen, dass grundsätzlich von einer Kompatibilität der Ansätze ausgegangen werden kann, in den Details jedoch durchaus Unterschiede vorliegen. Um konkretere Aussagen treffen zu können, bedarf es daher einer Detailanalyse mit anschließender Bewertung auf Ebene der Konzepte und Methoden. In welchen Fällen und auf welche Art und Weise sich die beiden Ansätze kombinieren lassen, um das Produktionssystem auf dem Weg zur Industrie 4.0 schrittweise anpassen zu können wird im Rahmen einer Kompatibilitäts-Matrix untersucht.

4.3 Entwicklung einer Kompatibilitäts-Matrix

Im Rahmen der Kompatibilitäts-Matrix werden die zehn beschriebenen Werkzeuge der Lean Production den vier identifizierten Technologieparadigmen von Industrie 4.0 gegenübergestellt. Für jeden Schnittpunkt wird analysiert, ob und wie sich diese Elemente jeweils kombinieren lassen. Dafür werden sowohl praktische Beispiele als auch theoretische Analysen herangezogen. Die einzelnen Unterkapitel der Analyse gliedern sich nach den Lean-Werkzeugen. Zum Abschluss der Untersuchung eines jeden Lean-Werkzeugs im Kontext von Industrie 4.0 erfolgt eine quantitative Bewertung für jede Kombinationsmöglichkeit mit den Technologieparadigmen auf Basis der Analysen. Die Punktzahl wird nach dem in Tab.1 dargestellten Bewertungsschema vergeben:

³⁸⁴ Vgl. Kaspar/Schneider, 2015, S.17f.

³⁸⁵ Vgl. Hofmann, 2014, S.105.

Punktzahl	Kompatibilitätsgrad	Qualitative Bewertung (Bsp.)
-	nicht bewertbar	<ul style="list-style-type: none"> - Keine konkreten Verknüpfungspunkte zwischen Lean-Werkzeug und Technologieparadigma - Kein Einfluss des Technologieparadigmas auf Lean-Werkzeug - Technologieparadigma spielt keine besondere Rolle im Rahmen des Lean-Werkzeugs
○	keine Kompatibilität	<ul style="list-style-type: none"> - Widerspruch zwischen Lean-Werkzeug und Technologieparadigma - Lean-Werkzeug wird durch Industrie 4.0-Technologie ersetzt
◐	schwache Kompatibilität	<ul style="list-style-type: none"> - Kompatibilität zwischen Lean-Werkzeug und Technologieparadigma größtenteils nicht gegeben - Überwiegend Nachteile durch Kombination aus Lean-Werkzeug und Technologieparadigma
◑	starke Kompatibilität	<ul style="list-style-type: none"> - Kompatibilität zwischen Lean-Werkzeug und Technologieparadigma größtenteils gegeben - Überwiegend Vorteile durch Kombination aus Lean-Werkzeug und Technologieparadigma überwiegen - Gute Ergänzung/Hilfestellung des Lean-Werkzeugs durch Technologieparadigma - Verbesserung des Lean-Werkzeugs aber keine Perfektionierung durch Technologieparadigma
●	vollkommene Kompatibilität	<ul style="list-style-type: none"> - Lean-Werkzeug und Technologieparadigma bilden Symbiose - Perfekte Ergänzung des Lean-Werkzeugs durch Technologieparadigma - Weiterentwicklung des Lean-Werkzeugs durch Technologieparadigma

Tab. 1: Bewertungsschema der Kompatibilitäts-Matrix

Die Kompatibilität zwischen Lean-Werkzeug und Technologieparadigma wird durch eine Punktevergabe von 0 bis 3 bewertet. In Fällen, in denen sich keine konkreten Verknüpfungspunkte zwischen Lean-Werkzeug und Technologieparadigma finden lassen, wird von einer Bewertung abgesehen. Bei einer Gegenüberstellung von Lean-Werkzeug und Technologieparadigma, in der keine Kompatibilität festgestellt wird, werden 0 Punkte vergeben. Dies ist der Fall, wenn ein Widerspruch erkannt wird oder gar von einem vollständigen Ersatz des bisherigen Lean-Werkzeugs durch das Technologieparadigma auszugehen ist. Eine schwache Kompatibilität wird mit 1 Punkt bewertet. Dies ist der Fall, wenn die Kompatibilität der verglichenen Elemente größtenteils nicht gegeben ist oder hauptsächlich Nachteile durch die Kombination der beiden Elemente identifiziert werden. Eine starke Kompatibilität entspricht 2 Punkten und wird bspw. dann vergeben wenn Lean-Werkzeug und Technologieparadigma größtenteils kompatibel sind, die Vorteile aus deren Kombination überwiegen oder das Technologieparadigma eine gute Ergänzung für das Lean-Werkzeug darstellt. Schließlich wird von einer vollkommenen Kompatibilität gesprochen, wenn sich Lean-Werkzeug und Technologieparadigma perfekt ergänzen oder von einer Weiterentwicklung des Lean-Werkzeugs durch den Einsatz des Technologieparadigmas ausgegangen werden kann.

4.4 Streben nach Perfektion im Kontext von Industrie 4.0

4.4.1 Kaizen vs. Intelligentes Produkt

Die Durchführung von Experten-KVPs wird durch den Einsatz intelligenter Produkte vereinfacht. So können intelligente Produkte Prozessdaten (z.B. Durchlaufzeiten) vor und nach ihrer Bearbeitung mittels RFID-Tags sammeln. Diese können in der Plan-Phase des KVP zur Analyse herangezogen werden. Im Gegensatz zur manuellen Datensammlung im Rahmen einer Wertstromanalyse des konventionellen Lean, bei der repräsentative Stichproben gezogen und Verallgemeinerungen je Produktfamilie vorgenommen werden³⁸⁶, ist nun jedes Produkt für sich auswertbar. Dabei verringert die automatische Erfassung der Daten den Arbeitsaufwand im KVP erheblich und verbessert außerdem die Genauigkeit der Informationen.³⁸⁷

4.4.2 Kaizen vs. Intelligente Maschinen

Maschinendaten (z.B. Ausbringungsmengen, Qualitätskennzahlen, Bearbeitungs- und Stillstandszeiten) bilden die Grundlage für die gezielte Analyse von Fertigungsprozessen im Rahmen von Experten-KVPs.³⁸⁸ Diese können kontinuierlich von Sensorik und Maschinensteuerung erfasst und zentral in einer Cloud-Plattform, ausgewertet werden, über die die intelligenten Maschinen verbunden sind und verwaltet werden. Dies versetzt das KVP-Team in die Lage, einen vollständigen Überblick über den Fertigungsprozess zu erhalten. Darüber hinaus ermöglicht die digitale Vernetzung der Maschinen, Daten aus unterschiedlichen Maschinen miteinander in Bezug zu setzen und dadurch komplexe Zusammenhänge zwischen den Maschinen in Simulationen zu integrieren.³⁸⁹ In einem späteren Entwicklungsstadium werden intelligente Maschinen als selbstlernende Systeme eigenständig Verbesserungspotenziale im Produktionsprozess erkennen können. Der Mitarbeiter wird folglich nicht mehr, wie im Rahmen von Lean Production, permanent den Status Quo für jeden Routineprozess selbst hinterfragen müssen.

³⁸⁶ Vgl. Erlach, 2010, S.36ff.

³⁸⁷ Vgl. Kolberg/Zühlke, 2015, S.1872.

³⁸⁸ Vgl. Träger, 2015b, S.27.

³⁸⁹ Vgl. Fallenbeck/Eckert, 2014, S.409f.

Vielmehr übernimmt er die Rolle des Prozessgestalters und Entscheiders und wird von den intelligenten Maschinen dabei unterstützt.³⁹⁰

4.4.3 Kaizen vs. Intelligentes Assistenzsysteme

Der Mensch bleibt auch in Industrie 4.0 der Haupt-Ideengeber und Umsetzer von KVPs, wird dabei jedoch von intelligenten Assistenzsystemen aktiv unterstützt.³⁹¹ Von Werkern in der Plan-Phase eines Mitarbeiter-KVPs identifizierte Schwachstellen, Verschwendungen oder Ideen zur Verbesserung an ihrer Arbeitsstation lassen sich in einer App sammeln und priorisieren. Ein Bsp. für solch eine App ist die vom Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik (Fraunhofer IML) entwickelte sog. Kaizen-App. Sie ermöglicht dem Werker das Erstellen von Verbesserungstickets durch Fotografieren und Kommentieren von Verschwendungen bzw. Verbesserungsideen mit einem Tablet oder Smartphone. Die Tickets werden in der Cloud gesammelt, kategorisiert, priorisiert und können so im nächsten KVP-Meeting analysiert werden. Verbesserungstickets können außerdem in einem digitalen KVP-Board visualisiert sowie bei Rundgängen auf Tablet-Computern abgerufen und aktualisiert werden.³⁹² Intelligente Assistenzsysteme erhöhen folglich die Qualität der Problembeschreibungen und die Transparenz des Projektmanagements durch verbesserte Darstellungsmöglichkeiten. Dies verbessert die Partizipationsmöglichkeiten von Werkern in Mitarbeiter-KVPs.³⁹³

Darüber hinaus unterstützen intelligente Assistenzsysteme auch sämtliche Phasen eines Experten-KVPs durch eine simulationsbasierte Entscheidungsunterstützung auf Basis von Echtzeitinformationen (s. Abb. 17). In der Plan-Phase wird zunächst der Ist-Prozess über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle aufgenommen und in einer im Internet der Dienste angebotenen Software auf Basis definierter Kriterien in kürzester Zeit ausgewertet.³⁹⁴ Außerdem kann die Anzeige des Ist-Prozesses mit zusätzlichen Informationen aus den IT-Systemen und den intelligenten Produkten und Maschinen angereichert und in aggregierter Form über das Assistenzsystem zur Verfügung gestellt werden.³⁹⁵ Somit wird eine assistenzgestützte Identifikation von

³⁹⁰ Vgl. Roy/Mittag/Baumeister, 2015, S.29.

³⁹¹ Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015b, S.161.

³⁹² Vgl. Schließmann, 2014, S.466.

³⁹³ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.28f.

³⁹⁴ Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015a, S.55f.

³⁹⁵ Vgl. Schuh et al., 2014, S.292.

Verschwendungen ermöglicht. Auf Grundlage dieser Auswertung können in der Do-Phase abgesicherte Entscheidungen getroffen und Maßnahmen festgelegt werden. Assistenzsysteme können dabei sogar Ansätze zur Verbesserung liefern und sie dem Mitarbeiter vorschlagen. Zudem können Testläufe mithilfe eines hypothetischen Umgebungsmodells³⁹⁶ simuliert und über die Schnittstelle dargestellt werden. Im Rahmen der Check-Phase wertet die Software die Ergebnisse der Simulation aus und überprüft die Auswirkungen der Veränderungen.³⁹⁷ Auch mehrmalige Optimierungsschleifen sind dabei in kurzer Zeit durchführbar.³⁹⁸ In der Act-Phase wird der neue Standard definiert und digital in einer cloudbasierten Wissensdatenbank abgelegt, sodass ein Zugriff zu jeder Zeit und an jedem Ort möglich ist. Intelligente Assistenzsysteme unterstützen den Mitarbeiter in der Folge auch beim Erlernen des neuen Standards, indem sie ihm Handlungsanweisungen bei der Durchführung kommunizieren und visualisieren. Der steigende Lernaufwand, der mit einer steigenden Anzahl an Varianten einhergeht, wird somit reduziert.³⁹⁹



Abb. 17: Simulationsbasierte Entscheidungsunterstützung durch intelligente Assistenzsysteme

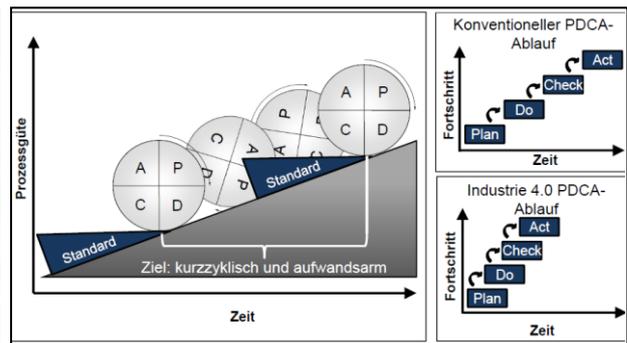


Abb. 18: Optimierte Umsetzung des PDCA-Ablaufs

Wie beschrieben, erlaubt es der Einsatz von Assistenzsystemen, Experten-KVPs bei vermutetem Optimierungspotenzial direkt auf dem Shopfloor durchzuführen.⁴⁰⁰ Somit wird das Gemba-Prinzip, nach welchem Verbesserungsprojekte direkt am Ort des Geschehens durchgeführt werden sollen (vgl. Kapitel 2.3.2), perfektioniert.⁴⁰¹ Wie gezeigt, erhöhen Assistenzsysteme den möglichen Detaillierungsgrad von Experten-KVPs durch Komplexitätsreduzierung. Des Weiteren wird die Umsetzung des PDCA-

³⁹⁶ Vgl. Niggemann/Jasperneite/Vodencarevic, 2014, S.186.

³⁹⁷ Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015b, S.55f.

³⁹⁸ Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015b, S.161.

³⁹⁹ Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015a, S.55f.

⁴⁰⁰ Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015a, S.55f.

⁴⁰¹ Vgl. Womack, 2006, S.30.

Ablauf, wie in Abb. 18 dargestellt, optimiert, da die einzelnen Phasen durch die Unterstützung der Assistenzsysteme aufwandsärmer und kurzzyklischer ablaufen.⁴⁰²

4.4.4 Bewertung

Die dank intelligenter Produkte individuell verfügbaren Prozessdaten reduzieren den Arbeitsaufwand eines Experten-KVP und verbessern gleichzeitig die Genauigkeit der Informationen. Sie können daher als gute Ergänzung für Kaizen-Maßnahmen eingestuft werden (2 Punkte).

Der Einsatz intelligenter, vernetzter Maschinen erhöht maßgeblich die Transparenz über den Fertigungsprozess und erlaubt die Simulation komplexer Beziehungen zwischen den Maschinen in Experten-KVPs. Wenn intelligente Maschinen in einem späteren Entwicklungsstadium sogar selbst Verbesserungspotenziale erkennen können, wird sich der Anspruch an die Perfektion bei Kaizen-Maßnahmen erhöhen.⁴⁰³ Der Mensch wird Entscheidungen über komplexere Zusammenhänge treffen müssen. Allerdings wird er dabei von intelligenten Maschinen unterstützt. Intelligente Maschinen können folglich als „Enabler“, jedoch nicht als vollständige Lösung für komplexer werdende Kaizen-Aktivitäten gesehen werden. Dies wird als eine gute Kompatibilität zwischen Kaizen und intelligenten Maschinen gewertet (2 Punkte).

Die Nutzung intelligenter Assistenzsysteme wird eine entscheidende Rolle in künftigen Kaizen-Projekten einnehmen. In Mitarbeiter-KVPs erhöhen sie die Partizipationsmöglichkeiten von Shopfloor-nahen Mitarbeitern. Darüber hinaus können intelligente Assistenzsysteme auch sämtliche Phasen von Experten-KVPs direkt auf dem Shopfloor unterstützen und somit das Gemba-Prinzip in Perfektion umsetzen. Dank zahlreicher Funktionen von Assistenzsystemen kann der Detaillierungsgrad von Experten-KVPs erhöht werden. Gleichzeitig wird die Durchführung von KVPs aufwandsärmer und kurzzyklischer ablaufen. Die Vielzahl an Verbesserungen, die intelligente Assistenzsysteme für Kaizen mit sich bringen, führt zur Vergabe der vollen Punktzahl in der Matrix (3 Punkte).

⁴⁰² Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015a, S.55f.

⁴⁰³ Vgl. Roy/Mittag/Baumeister, 2015, S.29.

Intelligente Transportsysteme haben nicht die Funktion, Daten für Kaizen-Projekte nutzbar zu machen, sondern eine logistische Funktion. Es konnten daher weder Synergien noch Widersprüche festgestellt werden (keine Bewertung).

4.5 Flussorientierung im Kontext von Industrie 4.0

4.5.1 Taktzeit im Kontext von Industrie 4.0

4.5.1.1 Taktzeit vs. Intelligente Maschinen

Die entscheidende Fragestellung bei der Untersuchung der Kombination aus dem Konzept der Taktzeit und dem Technologieparadigma intelligenter Maschinen ist, inwiefern die Vorgabe einer festen Taktzeit als Schrittmacher für alle Maschinen einer im Kontext von Industrie 4.0 häufig schwankenden Kundennachfrage und sehr hohen Variantenvielfalt standhalten kann.⁴⁰⁴ Wie in Kapitel 2.3.3.2 beschrieben, ist im Rahmen von Lean Production zur Aufrechterhaltung einer konstanten Taktzeit bei schwankender Nachfrage eine Entkopplung zwischen Nachfrage und Produktion mittels Lagerhaltung und Heijunka vorgesehen. Für die stark variantenreiche Produktion empfiehlt sich eine solche Glättung der Kundenbedarfsschwankungen allerdings nur für Varianten mit konstanter und hoher Nachfrage, da ansonsten ein zu hohes Absatzrisiko besteht und die Bestände durch die hohe Variantenzahl erhöht würden.⁴⁰⁵ Starke Nachfrageschwankungen bei gleichzeitig hoher Variantenvielfalt machen den Heijunka-Ansatz einer vom Markt entkoppelten und nivellierten Produktion daher zunichte.⁴⁰⁶ In diesem Fall wird eine auftragsbezogene Produktion mit direkter Abbildung der Marktnachfrage in der Produktion benötigt.⁴⁰⁷ Eine letzte denkbare Option zur Aufrechterhaltung einer für alle Prozesse geltenden Taktzeit wäre daher eine tägliche Anpassung der Taktzeit an die schwankende Nachfrage.⁴⁰⁸ Selbst bei dieser Vorgehensweise würde die Vorgabe einer für alle Prozesse geltenden Taktzeit bei hoher Produktvielfalt häufig stark unterschiedlichen Bearbeitungszeiten an den jeweiligen Stationen gegenüberstehen. Dies würde zu unabgestimmten Prozessschritten und somit zu einem ungleichmäßigen

⁴⁰⁴ Vgl. Kolberg/Zühlke, 2015, S.1871.

⁴⁰⁵ Vgl. Maier/Erlach/Ehrat, 2015, S.28.

⁴⁰⁶ Vgl. Kolberg/Zühlke, 2015, S.1871.

⁴⁰⁷ Vgl. Kolberg/Zühlke, 2015, S.1871f.

⁴⁰⁸ Vgl. Gerberich, 2011, S.137.

Produktionsfluss führen.⁴⁰⁹ Eine konstante Taktzeit, die basierend auf dem Kundentakt als Schrittmacher für jeden einzelnen Prozessschritt gilt⁴¹⁰, ist daher im Kontext von Industrie 4.0 auszuschließen⁴¹¹. Diese Überzeugung teilt auch Bauernhansl, indem er anmerkt dass „mit der Festlegung des Taktes auch die Produktionsmenge und Flexibilität“⁴¹² definiert würden.

Für eine kundenorientierte Produktion werden intelligente Produktionsmodule, die von einzelnen Varianten in individueller Abfolge durchlaufen werden, folglich so interagieren müssen, dass der Produktionsfluss entsprechend der schwankenden Nachfrage und der geforderten Varianten angepasst werden kann, ohne eine termingerechte Befriedigung der Kundennachfrage zu gefährden.^{413,414} Dies erfordert eine Loslösung von einem durchgängigen Fertigungstakt hin zu einem flexiblen Produktionsfluss mit minimalen Umlaufbeständen.^{415,416}

Die einzelnen Produktionsmodule werden unter der Voraussetzung hoher Variantenvielfalt und Nachfrageschwankungen folglich nicht mehr zwingend gleiche Taktzeiten aufweisen, sondern diese individuell in Abhängigkeit von der Frequenz ihrer Nutzung anpassen. Es wird bspw. vorgeschlagen, eine längere Taktzeit durch eine Erhöhung des Anteils an manueller Arbeit, eine kürzere Taktzeit durch einen höheren Grad an Automatisierung zu erreichen.⁴¹⁷ Demzufolge wird es bei hohen Flexibilitätsanforderungen keine zentrale Taktvorgabe mehr geben, sondern eine varianten- und kapazitätsabhängige, dynamische Taktung je Produktionsmodul. Dadurch lassen sich auch Eilaufträge ohne Auswirkungen auf den Produktionsfluss integrieren.⁴¹⁸

Ein beispielhafter, konzeptioneller Ansatz zur Flexibilisierung der festen Taktung ist der sog. Volumentakt, der nach Bochmann et al. vor allem in der Automobilindustrie Anwendung finden soll. Der Volumentakt soll es selbstorganisierenden, cyber-physischen Produktionsmodulen ermöglichen, Aufträge unter Berücksichtigung des

⁴⁰⁹ Vgl. Pröbster, 2016, S.43.

⁴¹⁰ Vgl. Frison, 2015, Pos. 1243f. (Kindle Edition).

⁴¹¹ Vgl. Kolberg/Zühlke, 2015, S.1872.

⁴¹² Bauernhansl, 2014, S.21.

⁴¹³ Vgl. Frison, 2015, Pos. 1243f. (Kindle Edition).

⁴¹⁴ Vgl. Bochmann et al., 2015, S.272.

⁴¹⁵ Vgl. Steegmüller/Zürn, 2014, S.117f.

⁴¹⁶ Vgl. Bochmann et al., 2015, S.272.

⁴¹⁷ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.21.

⁴¹⁸ Vgl. Frison, 2015, Pos. 1279 (Kindle Edition).

Auftragsvolumens in flexibler Reihenfolge und Maschinenabfolge zu bearbeiten.⁴¹⁹ Anstelle einer Abarbeitung der Nachschubaufträge in fester Reihenfolge und Taktung, wie es das FIFO-Prinzip im Rahmen von Lean Production vorsieht, erfolgt eine Einplanung der in einem bestimmten Zeitraum eingegangenen Aufträge in die Volumentakte ohne fixe Reihenfolge.

Dazu erstellt eine Simulation nach Eintreffen der Aufträge eine Prognose für die zukünftige Konfiguration des Produktionssystems unter Berücksichtigung aktueller und prognostizierter Kapazitäten und Ressourcen, die auf Echtzeit-Sensordaten der intelligenten Maschinen basieren. Mit der Zielsetzung einer möglichst gleichmäßigen Auslastung der Produktionsmodule und unter Berücksichtigung physischer Restriktionen, Konfigurationsmöglichkeiten der Maschinen und zeitlicher Abhängigkeiten der Produktionsschritte (Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen) werden daraufhin die Volumentakte mit Aufträgen, die ihr zu erfüllendes Produktionsende kennen, gefüllt. Darauf basierend entscheiden die intelligenten Maschinen unter der Anwendung von Optimierungsalgorithmen situationsabhängig über die optimale Reihenfolge der Aufträge und die Abfolge der Produktionsschritte. Dabei beziehen sie u.a. die aktuelle Bestandssituation, Materialengpässe, die Entfernungen zwischen den Modulen oder auch die tatsächlich verfügbaren Kapazitäten ein.^{420,421}

Ein weiterer Ansatz, der eine Flexibilisierung der Taktzeiten impliziert, ist die sog. Matrix-Produktion nach Greschke/Hermann. Diese sieht eine dynamische Anpassung der Taktzeiten an die individuellen Fähigkeiten der Mitarbeiter vor, um eine höhere Arbeitssicherheit zu gewährleisten und Stresssituationen zu vermeiden. Auch hier wird der Ansatz einer Linienfertigung mit starren Reihenfolgen und identischen Taktzeiten überwunden. Möglich soll dies ein redundant paralleles System von Produktionsmodulen (s. Abb. 19) und eine situative Zuteilung der Arbeitslast auf die Produktionsmodule über eine Steuerungslogik machen. In den individualisierten Produktionsmodulen kann dadurch in unterschiedlichen Geschwindigkeiten gearbeitet werden. Die Arbeitsgeschwindigkeiten, d.h. im übertragenen Sinne die Taktzeiten, lassen sich bspw. bei Störungen sogar

⁴¹⁹ Vgl. Bochmann et al., 2016, S.178.

⁴²⁰ Vgl. Bochmann et al., 2015, S.270ff.

⁴²¹ Für detailliertere Informationen zum Volumentakt: Vgl. Bochmann et al., 2015, S.270ff.; vgl. Vgl. Bochmann et al., 2016, S.180ff.

4.5.1.3 Taktzeit vs. Intelligente Transportsysteme

Eine feste Taktzeit wird für intelligente Transportsysteme, die eine flexible physische Vernetzung der Produktionsmodule je Produktvariante erlauben, nicht benötigt. Dies liegt daran, dass es eine einheitliche (wenn auch anpassbare) Taktung maximal nur innerhalb von Produktionsmodulen geben wird, die mehr als einen Prozessschritt umfassen.⁴²⁷ Aufgrund der möglichen Verkettung von Einzelprozessen innerhalb der Module ist dort weiterhin eine fest installierte Fördertechnik, eine manuelle Weitergabe der Werkstücke oder auch ein Transport mithilfe eines mobilen Montageassistenten (s. Kapitel 4.6.4.2) denkbar.

Eingehende Aufträge werden nach Festlegung ihrer Bearbeitungsreihenfolge und Maschinenabfolge in der Smart Factory in Produktions- und Transportaufträge übersetzt. Die Transportaufträge werden daraufhin von den Softwareagenten der intelligenten Transportsysteme in gegenseitiger Absprache abgerufen. Die Versorgung der Produktionsmodule mit Werkstücken und Material ist dadurch mit der situativ festgelegten Reihenfolge der Produktionsaufträge synchronisiert, sodass die Produktionsmodule termingerecht angefahren werden können.⁴²⁸ Folglich werden intelligente Transportsysteme zwar ein Zeitfenster zur Versorgung der Produktionsmodule haben, dieses wird sich jedoch nicht an einem festen, sondern dem flexiblen, individuellen Takt der Produktionsmodule orientieren müssen.

4.5.1.4 Bewertung

Zwischen dem Konzept der Taktzeit und dem Technologieparadigma des intelligenten Produkts gab es keine Überschneidungen und daher weder Synergien noch Widersprüche (keine Bewertung).

Bei der Betrachtung intelligenter Maschinen hat sich herausgestellt, dass es in der Smart Factory unter der Voraussetzung hoher Variantenvielfalt und Nachfrageschwankungen eine Loslösung vom festen Takt hin zu einem dynamischen Takt geben wird, um einer Limitierung in Sachen Flexibilität und Output entgegenzuwirken. Die einzelnen Produktionsmodule werden ihre Taktzeiten individuell, situations- und kapazitätsabhängig anpassen können und müssen. Eine

⁴²⁷ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.21.

⁴²⁸ Vgl. Bochmann et al., 2016, S.185ff.

Abtaktung der Prozessschritte wird es voraussichtlich nur noch innerhalb der Produktionsmodule geben können. Das Konzept der Taktzeit als Schrittmacher für alle Prozesse würde in der Smart Factory dadurch aufgelöst. Eine feste Taktzeit und intelligente Maschinen, die sich ihre Aufträge situativ zuweisen, stehen daher in Widerspruch zueinander (0 Punkte).

Der Vergleich zwischen einer festen Taktzeit im Sinne von Lean Production und intelligenten Assistenzsystemen zeigt ein grundsätzliches Verbesserungspotenzial durch Visualisierung der verbleibenden Zykluszeiten über das Assistenzsystem. Des Weiteren lassen können auch sich dynamisch ändernde Taktzeiten und damit verbundene Handlungsanweisungen in Echtzeit angezeigt werden. Assistenzsysteme stellen somit in jedem Fall eine gute Ergänzung zum Konzept der Taktzeit dar (2 Punkte).

Schließlich werden sich intelligente Transportsysteme, die für den Materialfluss zwischen den Produktionsmodulen verantwortlich sind, aufgrund des dynamischen Taktes nicht an einer festen Taktung, sondern an den individuellen Takten der Produktionsmodule für eine rechtzeitige Anlieferungen orientieren. Daher konnte auch an dieser Stelle keine Kompatibilität mit einer vom Kundentakt abgeleiteten festen Taktzeit festgestellt werden (0 Punkte).

4.5.2 One Piece Flow im Kontext von Industrie 4.0⁴²⁹

4.5.2.1 One Piece Flow vs. Intelligentes Produkt

In der Smart Factory soll eine kundenspezifische Fertigung von Produkten in Losgröße eins zur Realität werden.⁴³⁰ Obwohl die Realisierung einer Fertigungslosgröße von eins nicht mit einem One Piece Flow gleichzusetzen ist, bewirkt sie i.d.R. einen solchen, da das einzelne Produkt nach seiner Bearbeitung nicht erst auf die Fertigstellung weiterer Produkte des Loses warten muss und folglich sofort weitergegeben werden kann (vgl. Kapitel 2.3.3.3).⁴³¹ Eine individualisierte Herstellung der Produkte wird sich somit positiv auf die Möglichkeit,

⁴²⁹ Der an dieser Stelle betrachtete One Piece Flow in der Festplatzvariante und das Konzept der Taktzeit sind eng miteinander verknüpft (vgl. Kapitel 2.3.3.3): Ohne eine Taktzeit kann kein idealer One Piece Flow erreicht werden, weshalb sich Argumentationen zu Verknüpfung der Technologieparadigmen mit den beiden Lean-Konzepten teilweise überschneiden.

⁴³⁰ Vgl. Dombrowski 2015b, S.160.

⁴³¹ Vgl. Lödding, 2005, S.99.

einen One Piece Flow zu realisieren, auswirken.⁴³² Gleichzeitig trägt ein One Piece Flow zur Realisierung minimaler Durchlaufzeiten bei und ist daher das ideale Prinzip für den Fluss kundenindividueller Produkte durch die Fertigung.^{433,434}

Abgesehen davon, muss die in der Smart Factory vorhandene Intelligenz der Produkte betrachtet werden. Diese können sich ihren individuell besten Wertstrom, d.h. einen turbulenzarmen Fluss mit minimalen Unterbrechungen durch ständiges Abgleichen der vom ihnen benötigten und der tatsächlich vorhandenen Produktionsressourcen suchen. Intelligente Produkte können folglich selbstgesteuert im One Piece Flow durch die Fertigung fließen.⁴³⁵ Ferner lassen sich individuelle Qualitätsprüfungen im One Piece Flow durch Abrufe qualitätsrelevanter Daten der Produkte durchführen.⁴³⁶

4.5.2.2 One Piece Flow vs. Intelligente Maschinen

Im Rahmen der Analyse dieses Schnittpunktes in der Matrix soll insbesondere herausgefunden werden, auf welchen Strecken und auf welche Weise die Realisierung eines One Piece Flow ohne Pufferbestände in der in Kapitel 2.3.3.3 festgelegten Festplatzvariante wahrscheinlich ist.

In einer lean organisierten Fabrik kann ein solch idealer One Piece Flow in der Festplatzvariante nur zwischen nah beieinander liegenden, verketteten und getakteten Arbeitsstationen realisiert werden.⁴³⁷ Damit vergleichbar ist die Verkettung und Taktung zwischen den intelligenten Maschinen und Arbeitsplätzen, die es voraussichtlich nur innerhalb einzelner Produktionsmodule in der Smart Factory geben wird.⁴³⁸ Die Annahme, dass die einzelnen Produktionsmodule dabei unterschiedliche Taktzeiten aufweisen (Vgl. Kapitel 4.5.1.1), erschwert jedoch die Realisierung eines idealen One Piece Flow zwischen diesen. Eine situationsbedingte Umleitung zu einem weniger ausgelasteten Produktionsmodul, welches die benötigten Fähigkeiten zur Bearbeitung des Produkts aufweist, ist eine denkbare Option, um Staus zu vermeiden. Dabei Pufferbestände zwischen den

⁴³² Vgl. Bochmann et al., 2015, S.271.

⁴³³ Vgl. Bochmann et al., 2015, S.271.

⁴³⁴ Vgl. „Baukastensystem für mobile Montageplattformen“, 2014, S.1.

⁴³⁵ Vgl. Dombrowski 2015b, S.160.

⁴³⁶ Vgl. Siepmann, 2016b, S.62.

⁴³⁷ Vgl. Dickmann, 2009, S.18.

⁴³⁸ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.21.

Produktionsmodulen vollständig eliminieren zu können, wird jedoch als unwahrscheinlich eingestuft. Im Folgenden wird daher die Möglichkeit eines idealen One Piece Flows nur innerhalb eines Produktionsmoduls analysiert.

In den einzelnen Produktionsmodulen können Engpässe dank der Vernetzung und Kommunikationsfähigkeit der dort vorhandene, intelligenten Maschinen vorausgesehen und durch Ressourcen- und Taktanpassungen der im Produktionsmodul vorgelagerten Maschinen entschärft werden. Dies vermeidet Unterbrechungen im Fluss.⁴³⁹ Ein organisatorisch vorhandener One Piece Flow innerhalb einer One Piece Flow-Strecke, der ohne informationstechnische Unterstützung in der Praxis häufig schwankende Bearbeitungszeiten der aufeinanderfolgenden Arbeitsstationen aufweist⁴⁴⁰ und daher kleine Puffer zwischen diesen benötigt (Vgl. Kapitel 2.3.3.3)⁴⁴¹, kann daher mithilfe intelligenter Maschinen auch in der Umsetzung zu einem One Piece Flow ohne Pufferbestände werden. Dies verbessert den Produktionsfluss und somit die Durchlaufzeiten.⁴⁴² Die Umsetzung eines idealen One Piece Flow stellt einen großen Hebel in der Smart Factory dar, um eine fließende, unterbrechungsarme Produktion zu gewährleisten. Laut Roy/Mittag/Baumeister soll das Ziel minimaler Durchlaufzeiten und somit die Realisierung eines idealen One Piece Flow bei der Abstimmung zwischen den intelligenten Maschinen jedoch künftig nicht mehr zwangsläufig priorisiert werden. Grund dafür ist die wachsende Aussagekraft vorhandener Daten im Rahmen von Big Data. Dank der direkten Vernetzung und echtzeitnahen Kommunikationsmöglichkeit mit Kunden entstehen verkürzte Entscheidungsprozesse, sodass individuelle Zielsetzungen, wie bspw. die Liefergenauigkeit, gegenüber möglichst kurzer Lieferzeiten bei der Steuerung der Produktion bevorzugt behandelt werden können.⁴⁴³

4.5.2.3 One Piece Flow vs. Intelligentes Assistenzsystem

Ein kontinuierlicher Produktionsfluss im Sinne eines One Piece Flow kann von intelligenten Assistenzsystemen gefördert werden. Wie bereits in Kapitel 4.5.1.2 beschrieben, können dem Mitarbeiter die verbleibenden Bearbeitungszeiten mithilfe

⁴³⁹ Vgl. Dombrowski 2015b, S.160.

⁴⁴⁰ Vgl. Liker, 2014, S.180.

⁴⁴¹ Vgl. Yagy, 2007, S.176.

⁴⁴² Vgl. Dombrowski 2015b, S.160.

⁴⁴³ Vgl. Roy/Mittag/Baumeister, 2015, S.29.

von Augmented Reality-Technologien in das Sichtfeld eingeblendet werden. Dieser kann dadurch im Rahmen der an dieser Stelle betrachteten Festplatzvariante leichter innerhalb des (dynamischen oder festen) Taktes produzieren, sodass Störungen im Fluss reduziert werden können.⁴⁴⁴

4.5.2.4 One Piece Flow vs. Intelligente Transportsysteme

Intelligente Transportsysteme werden für jede Produktvariante unterschiedliche Produktionsmodule ansteuern können (vgl. Kapitel 3.4.5). Unter der Voraussetzung einer Losgröße eins werden die Zwischenprodukte somit im One Piece Flow zwischen den Produktionsmodulen transportiert. Allerdings werden die dynamischen Taktzeiten (vgl. Kapitel 4.5.1) zwischen den Produktionsmodulen Pufferbestände erfordern, um Engpässen verhindern zu können- Ein idealer One Piece Flow lässt sich daher voraussichtlich nur innerhalb der Produktionsmodule realisieren. Dort hat der Einsatz intelligenter Transportsysteme aufgrund der geringen Entfernung und der festen Verkettung zwischen den Arbeitsstationen keinen konkreten Mehrwert. Denkbar ist, dass es dort weiterhin eine manuelle Weitergabe⁴⁴⁵ oder einen Transport über eine mobile Montageplattform im Falle eines mitarbeitergebundenen Arbeitsflusses geben wird. Da der mitarbeitergebundene Arbeitsfluss im Rahmen dieser Arbeit dem Konzept der U-Zelle zugeordnet wurde (vgl. Kapitel 2.3.3.3), wird die mobile Montageplattform ausschließlich in diesem Kontext betrachtet (s. Kapitel 4.6.4.2).

4.5.2.5 Bewertung

Zum einen fördert eine etwaige individualisierte Herstellung der Produkte im Kontext von Industrie 4.0 die Möglichkeit, einen One Piece Flow zu realisieren. Zum anderen können die Produkte dank ihrer Intelligenz einen turbulenzarmen Fluss mit minimalen Unterbrechungen gewährleisten, indem sie selbst individuelle Wege im One Piece Flow durch die Fertigung suchen. Intelligente, kundenindividuelle Produkte und das Prinzip des One Piece Flow sind folglich untrennbar miteinander verbunden (3 Punkte).

⁴⁴⁴ Vgl. Kolberg/Zühlke, 2015, S.1871.

⁴⁴⁵ Vgl. Womack/Jones, 2004, S.80.

Während es einen One Piece Flow zwischen den einzelnen Produktionsmodulen aufgrund der stark unterschiedlichen Taktzeiten i.d.R. nur mithilfe von Pufferbeständen geben wird, kann dank der intelligenten Maschinen innerhalb der Produktionsmodule ein idealer One Piece Flow ohne Pufferbestände umgesetzt werden. One Piece Flow-Strecken ohne Unterbrechungen im Fluss werden demnach in der Smart Factory vermehrt innerhalb größerer Produktionsmodule, die mehrere verkettete Prozessschritte umfassen, realisiert.⁴⁴⁶ Es kann daher von einer Verbesserung, jedoch nicht von einer Perfektionierung des One Piece Flow-Konzepts ausgegangen werden (2 Punkte).

Die Kompatibilität zwischen dem One Piece Flow in der Festplatzvariante und intelligenten Assistenzsystemen richtet sich nach der Argumentation, die bereits im Rahmen der Taktzeit-Betrachtung im Kontext von Industrie 4.0 angeführt wurde. Augmented Reality-Technologien in intelligenten Assistenzsystemen stellen demnach ebenso eine nützliche Ergänzung für den One Piece Flow dar (2 Punkte).

Da intelligente Transportsysteme im One Piece Flow zwischen den Produktionsmodulen transportieren, ist eine grundsätzlich eine sehr starke Kompatibilität gegeben. Jedoch wird hierbei ein One Piece Flow gänzlich ohne Pufferbestände kaum realisierbar sein, weshalb keine volle Punktzahl vergeben wird (2 Punkte).

4.5.3 Kanban-Steuerung im Kontext von Industrie 4.0

4.5.3.1 Kanban-Steuerung vs. Intelligentes Produkt

Es gibt bereits einige Anwendungen, die eine nutzenbringende Kombination aus einer Kanban-Steuerung und einer Ausprägung des intelligenten Produkts beinhalten. Eine erste Möglichkeit Kanban und die IKT zu verbinden, ist das elektronische Kanban (sog. e-Kanban). Es entsteht durch systemische Abbildung der physischen Kanban-Karte. Dabei werden die Kanban-Karten oder -Behälter selbst mit Barcodes ausgestattet und ein Verbrauch über Scannung simuliert. Nicht mehr das Weiterleiten der Karte, sondern die Unterschreitung eines systemischen Mindestbestands löst dann eine Nachbestellung aus.⁴⁴⁷ Der physische Bestand wird

⁴⁴⁶ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.21.

⁴⁴⁷ Vgl. Dickmann, 2009, S.403.

im IT-System transparent abgebildet, sodass eine schnelle Bestandsaufnahme und Kontrolle möglich ist.⁴⁴⁸ Allerdings ist der physische Bestand über die manuelle Scannung vom systemischen Bestand entkoppelt, sodass das IT-System nicht sofort auf die realen Bestände im Puffer zugreifen kann. Folglich liegt ein Medienbruch vor.⁴⁴⁹ Obwohl e-Kanban Zeit und teilweise manuelles Handling spart, kann die Abstraktion zu Abweichungen von den realen Beständen führen. Diese treten bspw. auf, wenn eine Karte bzw. ein Behälter nicht gescannt wird.⁴⁵⁰ Wie auch beim klassischen Kanban ist es bei e-Kanban notwendig, regelmäßig die Anzahl der umlaufenden Kanban-Karten zu überprüfen.⁴⁵¹ e-Kanban kann aufgrund der Barcode-Verknüpfung intelligenten Produkten der ersten Klasse zugeordnet werden und ist bereits heute Standard.

Mit RFID-Tags ausgestattete Kanban-Behälter als Ausprägung intelligenter Produkte zweiter Klasse stellen eine Weiterentwicklung der e-Kanban-Lösung dar und sind bereits heute in vielen Unternehmen etabliert. Die Intelligenz befindet sich zwar noch in der IT-Infrastruktur⁴⁵², jedoch können sämtliche Kanban Informationen dezentral auf den RFID-Tags gespeichert werden, sodass konventionell eingesetzte Karten nicht mehr benötigt werden.⁴⁵³ Im Gegensatz zum ursprünglichen e-Kanban sind reale Bestände untrennbar mit ihren digitalen Abbildern verknüpft, sodass Medienbrüche abgebaut werden.⁴⁵⁴ Dadurch werden Kanban-Systeme reaktionsschneller, sicherer und transparenter.⁴⁵⁵ Dies erfolgt auf folgende Art und Weise: Die Nachproduktion wird beim Herausnehmen eines Behälters aus dem mit einem Transponder ausgestatteten Pufferlager automatisch und in Echtzeit, d.h. ohne Abscannen oder Weiterleiten der Karte, angestoßen. Dadurch entfällt jegliches manuelles Handling zur Nachbestellung. Dies senkt die Reaktionszeit und somit die Kanban-Bestände.⁴⁵⁶ Zudem wird das Risiko von Differenzen zwischen realem und systemischem Bestand durch die Kopplung von physischer und digitaler Welt vermieden.⁴⁵⁷ Dadurch ermöglicht eine Reduzierung der Sicherheitsbestände.⁴⁵⁸ Des

⁴⁴⁸ Vgl. Dickmann, 2009, S.238.

⁴⁴⁹ Vgl. Schlick et al., 2014, S.83.

⁴⁵⁰ Vgl. Dickmann, 2009, S.404.

⁴⁵¹ Vgl. Erlach 2010, S.197.

⁴⁵² Vgl. Fragner, 2015, S.77f.

⁴⁵³ Vgl. Kolberg/Zühlke, 2015, S.1872.

⁴⁵⁴ Vgl. Dickmann, 2009, S.238.

⁴⁵⁵ Vgl. Dickmann, 2009, S.404.

⁴⁵⁶ Vgl. „Besser funken als Karten lesen“, 2014, S.1.

⁴⁵⁷ Vgl. Dickmann, 2009, S.238.

⁴⁵⁸ Vgl. Dickmann, 2009, S.404ff.

Weiteren können die Zustände der Bestände genau überwacht und Bedarfsschwankungen exakt identifiziert werden. Durch die dezentrale Speicherung der Informationen im RFID-Tag entfällt auch das Verlustrisiko der Karten eines konventionellen Kanban-Systems.⁴⁵⁹ Des Weiteren ist durch die echtzeitnahe Zustandsbeschreibung der Bestände eine regelmäßige Aktualisierung der Dimensionierung der Kanban-Bestände durch Anpassung der Kanban-Daten auf dem RFID-Tag denkbar.⁴⁶⁰ Zudem kann das Risiko eines Bullwhip-Effekts⁴⁶¹, d.h. ein Aufschaukeln von Beständen bei allen Lieferanten entlang der Wertschöpfungskette durch unsichere Bedarfsverläufe und intransparente Bedarfsinformationen der Kunden, eingedämmt werden, da die exakten Kanban-Verbrauchsdaten über Unternehmensgrenzen hinweg mit Lieferanten in Echtzeit geteilt werden können.⁴⁶²



Abb. 20: iBin der Firma Würth



Abb. 21: inBin des Fraunhofer IML

Intelligente Behälter vierter Klasse agieren als CPS im Rahmen eines Kanban-Systems, indem sie mittels Sensorik selbst Zustände erfassen und über eingebettete Systeme automatische Nachbestellungen auslösen. Innovative Beispiele für CPS auf diesem Gebiet sind der iBin der Würth Industrie Service GmbH oder der inBin des Fraunhofer IML. Der iBin (s. Abb. 20) verbessert insbesondere die Genauigkeit von Kanban-Systemen im kleinteiligen C-Teile-Management.⁴⁶³ Dafür ist er mit einer integrierten Mikrokamera ausgestattet, die den Inhalt des Behälters beobachtet und den Füllstand in der Cloud auswerten und per Internet zur Verfügung stellen kann.⁴⁶⁴ Sinkt der Bestand im Behälter unter einen kritischen Bestand, wird automatisch eine Nachbestellung ausgelöst.⁴⁶⁵ Anstelle des Verbrauchs eines ganzen Behälters, kann der Verbrauch einer bestimmten Anzahl an Teilen innerhalb des Behälters nun eine

⁴⁵⁹ Vgl. Kolberg/Zühlke, 2015, S.1871.

⁴⁶⁰ Vgl. Nyhuis/Mayer/Kuprat, 2014, S.96.

⁴⁶¹ Vgl. Roy/Mittag/Baumeister, 2015, S.29.

⁴⁶² Vgl. Fragner, 2015, S.77f.

⁴⁶³ Vgl. ten Hompel/Kirsch/Kirks, 2014, S.208ff.

⁴⁶⁴ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.23.

⁴⁶⁵ Vgl. ten Hompel/Kirsch/Kirks, 2014, S.208.

Nachbestellung auslösen. Dadurch kann eine Kanban-Losgröße gewählt werden, die kleiner als der Behälterinhalt ist. Folglich entsteht ein exaktes, sich selbst steuerndes Kanban-System.^{466,467} Zudem wird der gesamte Kanban-Prozess im Vergleich zum Kanban mittels RFID-Technologie in Echtzeit synchronisiert. Dies erlaubt eine weitere Reduzierung der Sicherheitsbestände und eine exakte Auswertung von Verbrauchsverläufen oder gespeicherten Bildern zu jeder Zeit.⁴⁶⁸

Während das iBin-Modul flexibel an den gängigen Behälterarten montiert werden kann, ist das Steuerungsmodul beim inBin (s. Abb. 21) fest in den Behälter integriert.⁴⁶⁹ Dank der Ausstattung des inBin mit Solarzelle, Energiepuffer, Mikroprozessor und Funkmodul ist dieser energetisch und steuerungstechnisch autark.⁴⁷⁰ Folglich weiß der inBin nicht nur, welche Teile er beinhaltet, sondern ist im Gegensatz zum iBin in der Lage, mit anderen inBins, Maschinen und über ein Grafikdisplay sogar mit Mitarbeitern zu kommunizieren.⁴⁷¹ Somit lassen sich Artikelinformationen, alternative Lagerplätze oder auch der Status der Kanban-Nachbestellung des Artikels direkt am Behälter anzeigen.⁴⁷² Darüber hinaus kann der inBin seine Position über Lichtschranken permanent selbst lokalisieren. Durch den Einsatz weiterer Sensorik kann er seine Umgebungsbedingungen, wie bspw. die Temperatur, überwachen. Die genannten Features ermöglichen dem inBin bspw. sich bei kritischen Umgebungswerten für den Inhalt oder falschen Aufenthaltsorten zu melden.⁴⁷³

Die Kombination der beiden Varianten intelligenter Behälter, welche durch eine Kooperation der beiden Entwickler angestrebt wird, verspricht eine neue Generation energie- und steuerungsautarker Behälter, die für einen kommunizierenden Einsatz in Kanban-Systemen eingesetzt werden können. Die Kanban-Systeme sollen durch exakte Dispositionssteuerung und Reichweitenberechnung künftig noch wirtschaftlicher und sicherer funktionieren.⁴⁷⁴

Abgesehen von diesen Praxisbeispielen, kann das Ziel der Smart Factory, Produkte in Losgröße eins herzustellen, an dieser Stelle betrachtet werden. Eine Losgröße

⁴⁶⁶ Vgl. Peters, 2015, S.40.

⁴⁶⁷ Vgl. Kolberg/Zühlke, 2015, S.1871.

⁴⁶⁸ Vgl. ten Hompel/Kirsch/Kirks, 2014, S.208.

⁴⁶⁹ Vgl. „C-Teile Management - Da ist noch Luft drin“, 2013, S.1.

⁴⁷⁰ Vgl. Günther/Klenk/Tenerowicz-Wirth, 2014, S.307.

⁴⁷¹ Vgl. „C-Teile Management - Da ist noch Luft drin“, 2013, S.1.

⁴⁷² Vgl. „Der inBin und das Internet der Dinge“, S.21.

⁴⁷³ Vgl. Kerner, 2013, S.2f.

⁴⁷⁴ Vgl. Schlatt, 2013, S.9.

eins ist demnach prinzipiell förderlich für die Realisierung einer Kanban-Steuerung. Kleine Losgrößen sind eine Voraussetzung zur Einführung von Kanban.⁴⁷⁵ Da die nachzuproduzierenden Einheiten je Variante nur noch dem Teilebedarf für ein Produkt (Losgröße eins) entsprechen müssen, verringern sich unter Betrachtung der Kanban-Formel die zu puffernden Kanban-Bestände je Variante.⁴⁷⁶

4.5.3.2 Kanban-Steuerung vs. Intelligente Maschinen

Grundsätzlich sind intelligente Maschinen dank Sensorik und standardisierter Schnittstellen in der Lage Kanban-Karten und -behälter zu lesen, die entsprechenden Informationen zu verarbeiten und Nachschub anzufordern.⁴⁷⁷ Fraglich ist allerdings, ob der Einsatz von Kanban-Steuerungen noch sinnvoll ist, wenn intelligente Maschinen situativ darüber verhandeln, wo einzelne Produkte gefertigt werden. Die situationsbasierte Produktionssteuerung zwischen den intelligenten Maschinen impliziert flexible Prozessreihenfolgen und somit schwankende Bedarfe an den einzelnen Stationen. Bei der Kanban-Steuerung wird ein Auftrag hingegen Schritt für Schritt nach dem FIFO-Prinzip durch die Produktion gezogen, d.h. die Auftragsreihenfolge bleibt für alle Stationen gleich. Dies zeigt die grundsätzliche Diskrepanz zwischen der Kanban- und einer situationsbasierten Produktionssteuerung.⁴⁷⁸

Dieser Erkenntnis folgend, lässt sich untersuchen, inwieweit die Voraussetzungen für den Einsatz von Kanban im Rahmen einer situationsbasierten Produktionssteuerung gegeben sind. Wie in Kapitel 2.3.3.4 beschrieben, sind konstante Bedarfe eine Voraussetzung für Kanban. Stark schwankende Bedarfe der einzelnen Stationen, die mit einem fallweisen Aushandeln der Produktionsaufträge unter den Maschinen einhergehen, würde das Halten höherer Sicherheitsbestände erfordern. Die hätte eine Erhöhung des benötigten Kanban-Bestands⁴⁷⁹ zur Folge hätte.⁴⁸⁰

⁴⁷⁵ Vgl. Dickmann, 2009, S.231.

⁴⁷⁶ Der Vorteil einer Losgröße eins wird unter Betrachtung der Standardmenge in der Kanban-Formel deutlich (s. Kapitel 2.3.3.4).

⁴⁷⁷ Vgl. Kolberg/Zühlke, 2015, S.1874.

⁴⁷⁸ Vgl. Spath et al., 2013a, S.103.

⁴⁷⁹ Der Nachteil eines höheren Sicherheitsbestands wird unter Betrachtung der Kanban-Formel deutlich (s. Kapitel 2.3.3.4).

⁴⁸⁰ Vgl. Dickmann, 2009, S.231.

Darüber hinaus werden konstante Wiederbeschaffungszeiten zur Realisierung einer Kanban-Steuerung benötigt (vgl. Kapitel 2.3.3.4).⁴⁸¹ Unter der Annahme sich dynamisch ändernder Taktzeiten je Produktionsmodul (vgl. Kapitel 4.5.1.1) ändern sich die Wiederbeschaffungszeiten der Teile ständig. Bei Verwendung durchschnittlicher Taktraten im Rahmen der Kanban-Formel könnte jedoch nicht garantiert werden, dass die dimensionierten Kanban-Bestände innerhalb der jeweiligen Wiederbeschaffungszeit ausreichen. Ein gewisses Versorgungsrisiko des Produktionsmoduls müsste dann in Kauf genommen werden. Um Engpässe sicher zu verhindern, müssten daher maximale Taktzeiten für die Berechnung eines Wertes der Wiederbeschaffungszeit zugrundegelegt werden und das Kanban-System folglich auf ein entsprechendes, höheres Bestandsniveau ausgelegt werden.^{482,483}

Unabhängig von einer situativen Zuteilung von Aufträgen zu den einzelnen Produktionsmodulen, wäre auch eine Explosion der Variantenvielfalt hinderlich für die Umsetzung von Kanban, da Kanban nicht für eine variantenreiche Produktion ausgelegt ist (vgl. Kapitel 2.3.3.4). Intelligente Produktionsmodule werden dank ihrer Flexibilität in der Smart Factory jedoch für die Fertigung von Produkten in einer hohen Variantenvielfalt eingesetzt. Da die Kanban-Puffer für den Fall eines Abrufs Teile für jede mögliche Variante enthalten müssten, würde jede Variante die insgesamt zu puffernden Bestände erhöhen.⁴⁸⁴ Trotz hoher Produktindividualisierung könnte der Einsatz von Kanban dennoch an solchen Stellen im Wertschöpfungsprozess sinnvoll sein, wo viele Wiederholteile durch modulare Produktstrukturen⁴⁸⁵ oder durch eine späte Variantenbildung in nachgelagerten Prozessen vorliegen.

Um eine bessere Kontrolle der Bestandssituation in flexibel vernetzbaren Produktionsmodulen zu gewährleisten, als es durch den Einsatz von Kanban möglich ist, werden im Kontext von Industrie 4.0 alternative Verfahren im Rahmen einer situationsbasierten Produktionssteuerung vorgeschlagen.⁴⁸⁶ Für die Realisierung möglichst kurzer Durchlaufzeiten trotz schwankendem Auftragsvolumen und hohem

⁴⁸¹ Vgl. Dickmann, 2009, S.231.

⁴⁸² Der Nachteil hoher Taktzeiten wird unter Betrachtung der Wiederbeschaffungszeit in der Kanban-Formel deutlich (s. Kapitel 2.3.3.4).

⁴⁸³ Vgl. Maier/Erlach/Ehrat, 2015, S.27f.

⁴⁸⁴ Vgl. Dickmann, 2009, S.232.

⁴⁸⁵ Vgl. Brettel et al., 2014, S.38.

⁴⁸⁶ Vgl. Engelhard, 2014, S.106ff.

Variantenmix ist es demnach sinnvoll, die Kundenaufträge belastungsorientiert durch die einzelnen Produktionsmodule zu steuern. Die Idee dahinter ist, den Auftragsbestand eines Produktionsmoduls zu beschränken und darüber den Auftragszufluss zu regeln. Nach Little's Law⁴⁸⁷ ergibt sich dadurch eine konstante maximale Durchlaufzeit. Die Arbeitstationen innerhalb der Produktionsmodule bilden dabei einen einzigen Engpass-gesteuerten Regelkreis. Da sie weiterhin per One Piece Flow und FIFO-Prinzip durchlaufen werden können (vgl. Kapitel 4.5.2.2), bietet sich dort eine sog. Conwip- oder auch sequenzielle Pull-Steuerung an. Im Rahmen dieser steht ein Produktionsmodul nur dann für die Einlastung neuer Aufträge zur Verfügung, wenn ein fertiger Auftrag dieses verlässt – Zufluss und Abfluss sind somit im Gleichgewicht, sodass das Bestandsniveau und die Durchlaufzeiten annähernd konstant bleiben. Die intelligenten Maschinen können dabei das Bestandsniveau bzw. abgeschlossene Aufträge ständig und in Echtzeit monitoren und so eine belastungsorientierte Produktionssteuerung befähigen.^{488,489,490,491}

4.5.3.3 Kanban-Steuerung vs. Intelligente Assistenzsysteme

Intelligente Assistenzsysteme erlauben den virtuellen Zugriff auf jeden Lagerbehälter. So können mithilfe des iBin Informationen, wie bspw. die im Zeitverlauf gespeicherten Bilder des Behälterinhalts oder Lagerorte, jederzeit ausgewertet und über eine App auf Smartphone oder Tablet-Computer abgerufen werden. Bestände können dadurch von den Mitarbeitern verifiziert und bisher manuell durchgeführte Inventuren vermieden werden.⁴⁹²

Eine weitere Möglichkeit, intelligente Assistenzsysteme mit Kanban zu verbinden, lässt sich mithilfe netzwerkfähiger Kanban-Plantafeln mit RFID-Technik und Datenbank-Anbindung realisieren. Eine beispielhafte Systemlösung aus der Praxis besteht aus einer mit RFID-Transpondern ausgerüsteten Kanban-Tafel, in die die

⁴⁸⁷ Vgl. Erlach, 2010, S.103.

⁴⁸⁸ Vgl. „Schlanke Auftragssteuerung - aber wie?“, 2015, S.1f.

⁴⁸⁹ Vgl. Engelhard, 2014, S.106ff.

⁴⁹⁰ Für detailliertere Informationen zum Prinzip einer situationsbasierten Produktionssteuerung mithilfe von Conwip sowie einer beispielhaften Anwendung: Vgl. Engelhard, 2014, S.106ff.; S.144ff.; vgl. „Schlanke Auftragssteuerung - aber wie?“, 2015, S.1f.

⁴⁹¹ Denkbar ist hier auch eine Verknüpfung mit den in Kapitel 4.5.1.1. beschriebenen Volumentakten. Im Gegensatz zu der in diesem Konzept beschriebenen Vorgehensweise berücksichtigt die hier beschriebene belastungsorientierte Steuerung der Produktionsaufträge keine Verknüpfungen einzelner Aufträge mit den Primärbedarfen und vernachlässigt daher deren Termineinhaltung. Zudem werden, wie auch beim Einsatz der Volumentakten keine Potenziale zur Rüstzeiteinsparung bei der Optimierung der Reihenfolge von Aufträgen an den Arbeitsplätzen berücksichtigt (vgl. „Belastungsorientierte Auftragsfreigabe“, 2012).

⁴⁹² Vgl. Hoffmann, 2014, S.211f.

RFID-fähigen Kanban-Karten gesteckt werden können. Dank Abfrage prozessrelevanter Daten der Karten per RFID und Weiterleitung an ein Assistenzsystem, können sämtliche an den Tafeln ausgeführten Aktionen verfolgt werden. Das Assistenzsystem visualisiert dabei einen Bestellprozess, eine Ressourcen- und Kapazitätsplanung, ein Abweichungsmanagement sowie einen Prozess der Materialzusammenführung und -bereitstellung über Tablet-Computer oder Smartphone. Folglich wird der Mensch als Überwacher der Fertigung im Rahmen eines nach Kanban-Kriterien organisierten Produktionsablaufs unterstützt.^{493,494}

4.5.3.4 Kanban-Steuerung vs. Intelligente Transportsysteme

Auch intelligente Transportsysteme lassen sich mit Kanban verknüpfen. In einem Beispiel aus der Praxis ist dazu eine Unterstützung durch intelligente Behälter, die Nachschublieferungen selbstständig in Auftrag geben, vorgesehen. Bei Unterschreitung des Meldebestands beauftragen mit RFID versehene Behälter per Funk die fahrerlosen Transportfahrzeuge damit, am entsprechenden Supermarktregal für Nachschub zu sorgen. Das intelligente Transportsystem identifiziert und lädt den angeforderten Behälter mithilfe passender Manipulatoren im Lager und transportiert diesen anschließend an den jeweiligen Arbeitsplatz. Der Arbeitsplatz kann vom intelligenten Transportfahrzeug ebenfalls per RFID-Tag identifiziert werden, sodass es an der richtigen Position anhält. Dank RFID-Tag am Behälter und an der Bahn des Supermarktes erkennt das intelligente Transportfahrzeug die richtige Spur und kann den Behälter wie bereits bei der Auslagerung korrekt einlagern. Daraufhin kann es den nächsten Transportauftrag annehmen.⁴⁹⁵



Abb. 22: Kombination aus inBin und zellularen Transportfahrzeugen

⁴⁹³ Vgl. „Netzwerkfähige Kanban-Plantafel nutzt RFID-Technik“, 2016, S.1.

⁴⁹⁴ Vgl. „Neue Plantafel-Generation kann Industrie 4.0“, 2015, S.1.

⁴⁹⁵ Vgl. „Besser funkeln als Karten lesen“, 2014, S.1.

Auch die Kanban-fähige Behälterentwicklung inBin ist in der Lage, selbst Transportdienste bei zellularen Transportsystemen anzufordern. In Kombination mit dieser Behälterinnovation (s. Abb. 22) könnten die intelligenten Transportsysteme ihre Kanban-Mission, d.h. die Materialversorgung oder den Nachschub von Zwischenprodukten, ohne zentrale Steuerinstanz durchführen.⁴⁹⁶ Die Aufforderung, transportiert zu werden, sowie die Mitteilung des Zielorts werden dabei direkt vom inBin an das nächstgelegene zellulare Transportsystem übermittelt. Der Transportauftrag wird mithilfe von Diensten in der Cloud erstellt.⁴⁹⁷ Dank der kurzen Reaktionszeit intelligenter Transportsysteme kann die Wiederbeschaffungszeit der Behälter in einem Kanban-System verkürzt werden, was für sich betrachtet zu einer Reduktion der benötigten Pufferbestände führt.⁴⁹⁸

Wie beschrieben, sind die Voraussetzungen für den Einsatz eines Kanban-Systems im Rahmen intelligenter, flexibel vernetzbarer Produktionsmodule größtenteils nicht gegeben (vgl. Kapitel 4.5.3.2). Zusätzlich entstehen durch den Einsatz flexibler Transportsysteme unterschiedliche Transportwege, sodass die zurückgelegten Entfernungen je nach Auftrag variieren. Daher können Transportzeiten durch intelligente Transportsysteme zwar verkürzt, jedoch ggf. nicht vereinheitlicht werden. Allerdings führt eine Vereinheitlichung der Transportzeiten zu einem gleichmäßigen Fluss mit konstanten Wiederbeschaffungszeiten und ist demnach ebenfalls Voraussetzung für Kanban (vgl. Kapitel 2.3.3.4).⁴⁹⁹ Analog zur Betrachtung schwankender Taktzeiten (vgl. Kapitel 4.5.3.2), müssten maximale Transportzeiten für die Berechnung eines Wertes der Wiederbeschaffungszeit angenommen werden, um zu garantieren, dass die dimensionierten Kanban-Bestände innerhalb der Wiederbeschaffungszeit ausreichen.⁵⁰⁰ Für diesen Fall müssten stets ausreichend viele Transportmodule bzw. -fahrzeuge vorhanden sein, um die maximale Transportzeit auf ein Maß beschränken zu können, welches eine Bestandsreduktion erlaubt. Ist dies nicht möglich, müsste entweder ein Versorgungsrisiko oder ein entsprechend hohes Bestandsniveau akzeptiert werden.

⁴⁹⁶ Vgl. Günther/Klenk/Tenerowicz-Wirth, 2014, S.307.

⁴⁹⁷ Vgl. ten Hompel/Kirsch/Kirks, 2014, S.208ff.

⁴⁹⁸ Vgl. Dickmann, 2009, S.231.

⁴⁹⁹ Vgl. Dickmann, 2009, S.231.

⁵⁰⁰ Der Nachteil langer Transportzeiten wird unter Betrachtung der Wiederbeschaffungszeit in der Kanban-Formel deutlich (s. Kapitel 2.3.3.4).

4.5.3.5 Bewertung

Es lassen sich sämtliche Entwicklungsstufen intelligenter Produkte in der Ausprägung intelligenter Behälter in Kanban-Systeme integrieren. Je weiter die Entwicklung dabei in Richtung CPS voranschreitet, desto transparenter, reaktionsschneller und sicherer wird das Kanban-System, sodass eine Bestandsreduzierung möglich ist. Schließlich schaffen neuste Behälterinnovationen ein exaktes, echtzeitnahes Abbild der Realität und können sich durch selbstständige Nachbestellungen, Selbstlokalisierung und Kommunikationsfähigkeit im Kanban-System sogar komplett selbst steuern. Abgesehen davon, hat das Ziel der Smart Factory einer Losgröße eine positive Auswirkungen auf die zu puffernden Kanban-Bestände je Variante. Daraus kann schlussgefolgert werden, dass der dezentrale Ansatz intelligenter Produkte vollkommen kompatibel mit einem dezentralen und selbstregelnden Kanban-System ist (3 Punkte).

Aus technologischer Sicht sind intelligente Maschinen durchaus in der Lage, eine Kanban-Steuerung effizienter zu gestalten. Daher könnte es je nach Rahmenbedingungen empfehlenswert sein, die Produktion in künftigen Smart Factories mit Kanban zu steuern. Die steigende Effizienz würde zudem Freiraum für zusätzliche Pufferbestände schaffen, die ggf. gehalten werden müssten, um die Versorgungssicherheit der intelligenten Produktionsmodule in einem Kanban-System zu gewährleisten. Die Notwendigkeit zusätzlicher Bestände kann, infolge einer situativen Auftragszuordnung unter den intelligenten Maschinen, die zu Schwankungen in den Taktzeiten und den Bedarfen der Produktionsmodule führt, oder infolge der Produktion einer steigenden Variantenvielfalt entstehen. Bei zu großen Bedarfsschwankungen, stark schwankenden Taktzeiten oder einer zu hohen Variantenvielfalt an den einzelnen Produktionsmodulen wird eine klassische Kanban-Steuerung folglich nur mit unwirtschaftlich großen Kanban-Beständen funktionieren. Je flexibler und individueller der Materialfluss wird, desto weniger entfaltet Kanban seine Wirkung, weshalb dann eher alternative Verfahren zur Produktionssteuerung zum Einsatz kommen werden. Angesichts der überwiegenden Widersprüche wird von einer schwachen Kompatibilität zwischen intelligenten Maschinen und Kanban ausgegangen (1 Punkt).

Intelligente Assistenzsysteme können hingegen als Unterstützung für die Visualisierung oder das Bestandsmanagement im Rahmen von Kanban gesehen werden und gelten daher als gute Ergänzung (2 Punkte).

Schließlich schaffen intelligente Transportsysteme in Verbindung mit intelligenten Behältern Potenziale zur Verkürzung der Wiederbeschaffungszeit und somit zur Bestandsreduzierung in einem Kanban-System, da sie Nachschubaufträge selbstständig aus- bzw. einlagern und transportieren können. Es kann jedoch angezweifelt werden, ob intelligente Transportsysteme aufgrund der unterschiedlichen Wege auch für eine Vereinheitlichung von Transportzeiten sorgen können. Schwankende Transportzeiten wären entweder kontraproduktiv für das Ziel einer Bestandsreduzierung oder würde ein gewisses Versorgungsrisiko verursachen. Dieser Nachteil steht dem Potenzial einer kürzeren Wiederbeschaffungszeit im Rahmen von Kanban durch den Einsatz intelligenter Transportsysteme gegenüber, weshalb lediglich eine schwache Kompatibilität angenommen wird (1 Punkt).

4.5.4 Milkrun im Kontext von Industrie 4.0

4.5.4.1 Milkrun vs. Intelligentes Produkt

Herkömmliche Routenzüge nach dem Milkrun-Konzept beliefern die Arbeitsplätze in fest definierten Intervallen auf einer fest definierten Route mit benötigtem Material aus einem zentralen Materiallager.⁵⁰¹ Die Auftragsdurchführung, d.h. das Einsammeln der Karten und die Nachlieferung der bestellten Mengen durch den Milkrun, erfolgt dadurch zeitlich unabhängig vom Zeitpunkt der tatsächlichen Auftragsauslösung – dem Materialverbrauch.⁵⁰² Eine Synchronisation des Verbrauchs der Produktionsanlagen mit dem Zyklus eines Milkruns ist insbesondere vor dem Hintergrund eines stark volatilen Auftragseingangs, denen die Unternehmen in Industrie 4.0 ausgesetzt sind, nur schwer umsetzbar. Entweder müssten entsprechende Sicherheitsbestände gehalten werden, die den Zeitversatz abfedern sollen, jedoch erhöhte Liegezeiten der Bestände und einem höheren Gesamtbestand zur Folge hätten, oder die Fahrfrequenz müsste erhöht werden, was in einem steigenden Transportaufwand resultieren würde.⁵⁰³ Diesem Effekt kann laut Schlick

⁵⁰¹ Vgl. Kaspar/Schneider, 2015, S.18.

⁵⁰² Vgl. Lappe et al., 2014, S.112.

⁵⁰³ Vgl. Frank, 2014, S.18f.

et al. die Kombination aus einem Milkrun und dem Technologieparadigma des intelligenten Produkts in der Ausprägung eines intelligenten Materialbehälters entgegenwirken. Die Verknüpfung ermöglicht eine Beseitigung des Medienbruchs hinsichtlich der Materialversorgung und somit die Realisierung eines bedarfsgesteuerten anstelle eines zeitgesteuerten Milkruns.⁵⁰⁴ Mithilfe intelligenter Werkstückträger können Nachbestellungen direkt bei Verbrauch, also unabhängig von den Abholzeitpunkten etwaiger Kanban-Karten, durch den Milkrun in Echtzeit an das IT-System übermittelt werden. Die Bedarfe können dann in eine dynamische Berechnung der Abfahrtszeitpunkte und der Tourenplanung des Milkruns einfließen. Dies verringert die Notwendigkeit, Sicherheitsbestände zur Überbrückung des Medienbruchs zu halten.⁵⁰⁵ Eine Simulation auf Basis realer Daten in der „Urbanen Produktion“ der Wittenstein Bastian GmbH⁵⁰⁶ im Rahmen des Projekt „CyPros“ hat gezeigt, dass ein bedarfsorientierter Milkrun mithilfe von Echtzeit-Abrufen zu einer Reduzierung der durchzuführenden Fahrten und der dabei zurückgelegten Gesamtstrecke führen kann, indem Teilrunden, in denen bestimmte Stationen keinen Bedarf aufweisen, abgekürzt werden.^{507,508} Das Praxisbeispiel macht deutlich, dass das Konzept eines bedarfsorientierten Milkruns für die Materialversorgung aus einem zentralen Lager zielführend sein kann.

Da die Materialversorgung durch Routenzüge i.d.R. mithilfe von Kanban funktioniert, muss trotz der positiven Ergebnisse des Praxisbeispiels untersucht werden, inwiefern das Ziel der Bestandsminimierung von Kanban durch den Einsatz eines bedarfsorientierten Milkruns grundsätzlich noch erfüllt wird. Dabei lässt sich festzustellen, dass die Voraussetzung konstanter Transportzeiten (vgl. Kapitel 2.3.3.4) bei bedarfsabhängigen Abkürzungen von Teilrunden durch einen bedarfsorientierten Milkrun nicht mehr gegeben ist. Für die Berechnung der Wiederbeschaffungszeit in der Kanban-Formel wäre die Zugrundelegung der maximalen Transportzeit notwendig, um Versorgungssicherheit zu gewährleisten.⁵⁰⁹ Sollte die maximale Transportzeit durch den Einsatz eines bedarfsorientierten Milkruns kürzer sein als die Zykluszeit eines zeitgesteuerten Milkruns, d.h. nie eine

⁵⁰⁴ Vgl. Schlick et al., 2014, S.63.

⁵⁰⁵ Vgl. „Industrie 4.0 – Dynamischer Milkrun“, 2016, S.1.

⁵⁰⁶ Vgl. Schlick et al., 2014, S.64.

⁵⁰⁷ Vgl. Frank, 2014, S.19.

⁵⁰⁸ Vgl. Kaspar/Schneider, 2015, S.18.

⁵⁰⁹ Der Nachteil langer Transportzeiten wird unter Betrachtung der Wiederbeschaffungszeit in der Kanban-Formel deutlich (s. Kapitel 2.3.3.4).

Belieferung aller Produktionsmodule innerhalb einer Runde nötig sein, wäre eine Reduzierung des Gesamtbestands an den Arbeitsstationen möglich. Dies wäre der Fall, wenn der bedarfsgesteuerte Milkrun bei keiner Fahrt die komplette Strecke zurücklegen muss, d.h. immer abkürzen kann. Andernfalls könnte eine Verringerung des Bestandsniveaus nur erreicht werden, wenn ein gewisses Versorgungsrisiko akzeptiert würde.

4.5.4.2 Milkrun vs. Intelligente Maschinen

In Abgrenzung zur Analyse der Kompatibilität zwischen dem Milkrun-Konzept und intelligenten Produkten, wird im Rahmen dieses Kapitels insbesondere der zusätzliche Einfluss einer situationsbasierten Produktionssteuerung, die durch den Einsatz intelligenter Maschinen erfolgen kann, auf das Milkrun-Konzept untersucht.

Das Zusammenspiel zwischen intelligenten Maschinen und einem klassischen, zeitgesteuerten Milkrun, der die Arbeitsplätze in fest definierten Intervallen auf einer fest definierten Route mit benötigtem Material aus einem zentralen Materiallager anfährt⁵¹⁰, lässt in der Theorie Zweifel aufkommen, ob die begrenzte Flexibilität eines solchen Milkruns ausreicht, um eine effiziente Materialversorgung im Falle einer situationsbasierten Produktionssteuerung zu gewährleisten. Begründet liegt dies darin, dass eine situationsbasierte Produktionssteuerung mit dynamischer Taktung zusätzlich zu schwankenden Materialverbräuchen an den Produktionsmodulen führt. Wie beschrieben, versorgen zeitgesteuerte Routenzüge die Arbeitsstationen abweichend vom tatsächlichen Zeitpunkt des Materialverbrauchs.⁵¹¹ Je größer die Schwankungen in den Materialverbräuchen im Rahmen einer situationsbasierten Produktionssteuerung ausfallen, desto unregelmäßiger und größer wird folglich der Zeitversatz zwischen Materialverbrauch und Nachversorgung. Ein ähnlicher Effekt wurde bereits im Rahmen von Kapitel 4.5.3.2 angesprochen. Analog dazu müssten die Materialbestände für die jeweils längstmögliche Taktzeit der Produktionsmodule ausgelegt sein oder, falls möglich, die Transportfrequenz ausreichend erhöht werden, um der Gefahr einer verspäteten Materialversorgung durch einen klassischen Milkrun entgegenzuwirken. Die Annahme längstmöglicher Taktzeiten zur

⁵¹⁰ Vgl. Kaspar/Schneider, 2015, S.18.

⁵¹¹ Vgl. Lappe et al., 2014, S.112.

Errechnung eines Wertes für die Wiederbeschaffungszeit würde wiederum zu höheren Materialbeständen vor den Arbeitsstationen führen.⁵¹²

Abgesehen von einem zeitgesteuerten Milkrun, könnte die Idee eines bedarfsorientierten Routenzugs die Forderung kurzer Reaktionszeiten, die durch eine situationsbasierte Produktionssteuerung der intelligenten Maschinen entsteht, erfüllen. Die Auslösung und die zu berechnende Route des Milkruns müssten dabei die stark schwankenden Taktzeiten der einzelnen Produktionsmodule berücksichtigen, um eine rechtzeitige Versorgung zu gewährleisten. Inwieweit dies im Rahmen eines bedarfsgesteuerten Milkrun-Konzepts möglich ist, ist bisher nicht erforscht. Zu beachten ist dabei jedoch, dass zu starke Schwankungen in den Materialverbräuchen in einer geringen Transportauslastung des Milkruns resultieren. Diesbezügliche Effizienzvorteile eines flexibleren Materialflusssystems im Kontext von Industrie 4.0, welches durch den Einsatz intelligenter Transportsysteme verwirklicht wird, werden in Kapitel 4.5.4.4 diskutiert.

4.5.4.3 Milkrun vs. Intelligente Assistenzsysteme

Durch den Einsatz intelligenter Assistenzsysteme kann insbesondere der Fahrer des Milkruns bei seiner Tätigkeit unterstützt werden. Beim klassischen Milkrun mit festgelegten Routen und Zeitintervallen können ihm stets die aktuellen Materialbedarfe über einen Tablet-Computer angezeigt werden, sofern diese per e-Kanban o.ä. abgebildet sind. In diesem Fall kann der Einsatz von Pocket-Scannern zur Scannung von Aufträgen, Kanban-Karten oder Abholflächen mit optischer Identifikation (z.B. Barcodes) für ein virtuelles Abbild der Bestände sorgen. Bei Realisierung eines bedarfsorientierten Milkruns können dem Fahrer über ein mobiles Assistenzsystem schließlich weitere Details zum Fahrauftrag, wie Abfahrtszeitpunkte, die zu fahrende Route sowie die anzufahrenden Stationen, angezeigt werden.^{513,514,515} Beispiele für die beschriebenen Anwendungsmöglichkeiten intelligenter Assistenzsysteme im Rahmen eines Milkrun-Konzepts sind in Abb. 23 veranschaulicht.

⁵¹² Der Nachteil hoher Taktzeiten wird unter Betrachtung der Wiederbeschaffungszeit in der Kanban-Formel deutlich (s. Kapitel 2.3.3.4).

⁵¹³ Vgl. Kolberg/Zühlke, 2015, S.1871f.

⁵¹⁴ Vgl. Frank, 2014, S.18f.

⁵¹⁵ Vgl. Schlick et al., 2014, S.65f.



Abb. 23: Einsatzmöglichkeiten von Tablet-Computer und Pocket-Scanner im Rahmen eines Milkruns

4.5.4.4 Milkrun vs. Intelligente Transportsysteme

Milkrun-Routenzüge unterscheiden sich von intelligenten Transportsystemen insbesondere in ihrer Bündelung von Transporten durch gleichzeitige Aufnahme mehrerer Ladungsträger für unterschiedliche Arbeitsstationen.⁵¹⁶ In Abgrenzung zum Milkrun-Konzept ermöglicht der Einsatz intelligenter Transportsysteme die Realisierung einer innovativen, bedarfsgesteuerten Materialversorgung in Transportlosgröße eins nach dem sog. Injektionsprinzip. Hierbei wird das Material nicht wie bei einem Milkrun an Übergabepunkten wie Supermarkt-Regalen am Rand der Anlage bereitgestellt, sondern verbauortnah in kleinen Mengen „injiziert“.⁵¹⁷



Abb. 24: Eingesetztes intelligentes Transportsystem zur Realisierung des Injektionsprinzips

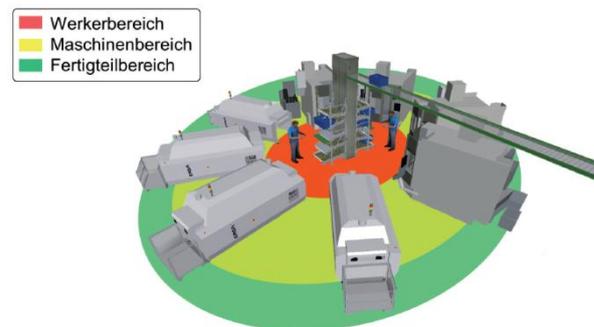


Abb. 25: Nach dem Injektionsprinzip gestalteter Fertigungsbereich

Intelligente, autonome Transportroboter dienen hierbei als „Enabler“-Technologie. Ähnlich der Funktionsweise eines Taxi-Unternehmens übernimmt der nächstgelegene verfügbare Transportroboter auf Anforderung bei einem zentralen IT-System den jeweiligen Transportauftrag und sucht sich dann selbstständig die beste Route. Die im Praxisbeispiel zum Injektionsprinzip eingesetzten Transportroboter (s. Abb. 24) bewegen sich auf einem modular aufgebauten

⁵¹⁶ Vgl. Saile/Wunderlich, 2008, S.50.

⁵¹⁷ Vgl. Kaspar/Schneider, 2015, S.19f.

Schienenetz unterhalb des Hallendachs, welches flexibel nach dem Baukastenprinzip gestaltet werden kann. Da die Transportroboter physisch an das Fördersystem gebunden sind, können sie als Mischform zwischen cyber-physischer Fördertechnik und fahrerlosen Transportfahrzeugen (Vgl. Kapitel 3.4.5) eingeordnet werden. Die Intelligenz des Systems befindet sich in den Transportrobotern, die autonom mit dem Streckensystem kommunizieren und somit ein intelligentes Transportsystem bilden. Im Gegensatz zu einem Milkrun, welcher für das Umfahren des zu versorgenden Bereichs auf Wege, Haltestellen und Supermarktregale angewiesen ist, wird für das Injektionsprinzip lediglich ein Abgabepunkt in Form eines Aufzugs benötigt, der sich in der Mitte eines Produktionsmoduls befindet und diese mit den benötigten Materialien versorgt (s. Abb. 25). Nach dem Verbrauch werden leere Behälter zurück in den Aufzug gestellt und per Transportauftrag von den Transportrobotern zur Leergutstation retourniert. Gleichzeitig wird ein Auftrag zur Lieferung eines neuen vollen Behälters, der je nach Variante gleiche oder andere Teile beinhaltet, generiert. Aufgrund der Schnelligkeit und Reaktionsfähigkeit der autonomen Transportfahrzeuge, kann der Versorgungsprozess weiter verschlankt werden. Für jede Maschine wird in kurzer Zeit genau ein Behälter direkt an der Maschine bereitgestellt. Dadurch können nicht nur Bestände in der Fertigung minimiert, sondern auch Laufwege und Handlungsschritte der Mitarbeiter reduziert werden. Aufgrund der Behältergröße von eins handelt es sich um eine Art „Mini-Kanban“.⁵¹⁸ Das Injektionsprinzip bietet sich daher als Milkrun-Ersatz für die Materialversorgung der Produktionsmodule aus einem zentralen Lager an. Da das Injektionsprinzip im Praxisbeispiel speziell für diese Einsatzmöglichkeit und nicht für eine Nachschubsteuerung von Zwischenprodukten durch das Kanban-Prinzip beschrieben wurde, erfolgte eine Zuordnung zu diesem Kapitel.

4.5.4.5 Bewertung

Die Analyse hat gezeigt, dass intelligente Produkte die Voraussetzung für eine Weiterentwicklung des Milkrun-Konzepts hin zu einer Bedarfssteuerung mit optimierter Tourenplanung und positiven Auswirkungen auf Sicherheitsbestände durch Beseitigung des Medienbruchs schaffen. Dem gegenüber stehen jedoch schwankende Transportzeiten durch die bedarfsorientierte Auslösung des Milkruns,

⁵¹⁸ Vgl. Kaspar/Schneider, 2015, S.19f.

welche tendenziell kontraproduktiv für das Ziel einer Bestandsminimierung sind. Der Einzelfall wird zeigen, inwiefern der Einsatz eines bedarfsorientierten Milkruns sinnvoll ist, grundsätzlich erweitern intelligente Produkte jedoch die Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung in Verbindung mit einem Milkrun-Konzept (2 Punkte).

Darüber hinaus geht eine situationsbasierte Produktionssteuerung intelligenter Maschinen mit unregelmäßigen Materialverbräuchen einher. Um ein Versorgungsrisiko auszuschließen, müssten entweder die Materialbestände oder die Transportfrequenz eines klassischen, zeitgesteuerten Milkruns erhöht werden. Klassische Routenzüge sind daher grundsätzlich nicht kompatibel mit einer situationsbasierten Produktionssteuerung intelligenter Maschinen. Ein bedarfsgesteuerter Milkrun könnte diesen Effizienzverlust hingegen ausgleichen, sofern die schwankenden Taktzeiten einer situationsbasierten Produktionssteuerung bei der Berechnung der Abfahrtszeitpunkte und Touren ausreichend einbezogen werden könnten. Obwohl die tatsächliche Kompatibilität zwischen intelligenten, situativ entscheidenden Maschinen und einem Milkrun-Konzept vom Einzelfall abhängen wird, lässt die Vision der Smart Factory die Vermutung zu, dass eine solche Verknüpfung möglich ist. Da zu starke Schwankungen in den Materialverbräuchen jedoch selbst bei einem bedarfsgesteuerten Milkrun zu einer geringen Transportauslastung führen, und das klassische Milkrun-Konzept inkompatibel mit einer situationsbasierten Produktionssteuerung ist, wird lediglich eine geringe Kompatibilität angenommen (1 Punkt).

Intelligente Assistenzsysteme geben dem Fahrer des Milkruns eine gute Hilfestellung zur Steuerung des Systems, sowohl im Falle eines Milkruns mit festen Intervallen als auch bei dynamischen Abfahrtszeitpunkten und Touren. Daher kann von einer guten Kompatibilität gesprochen werden. (2 Punkte).

Schließlich wurde festgestellt, dass intelligente Transportsysteme aufgrund ihres fallweisen Transports im Einzelstückfluss im kompletten Gegensatz zu einem transportbündelnden Routenzug stehen und in einer Smart Factory daher tendenziell Effizienzvorteile haben. Das Injektionsprinzip kann das Milkrun-Konzept daher für eine Materialversorgung der Produktionsmodule aus einem zentralen Lager ersetzen (0 Punkte).

4.5.5 SMED im Kontext von Industrie 4.0

4.5.5.1 SMED vs. Intelligentes Produkt

Intelligente Produkte führen u.a. Informationen bezüglich ihres Auftrags und der notwendigen Konfiguration der Anlagen zu ihrer Bearbeitung digital mit sich. Zudem können sie dank ihrer Vernetzungsfähigkeit rechtzeitig und automatisch mitteilen, wann die jeweiligen Anlagen umgerüstet werden müssen.⁵¹⁹ Der manuelle Abruf der Rüstansweisungen und das Suchen des nächsten Auftrags als externe Rüsttätigkeiten entfallen somit, sodass die externe Rüstzeit verkürzt werden kann. Für hochautomatisierte Maschinen ist sogar denkbar, dass produktspezifische Prozessparameter direkt von den intelligenten Produkten auf diese übertragen werden, sodass die externe Rüsttätigkeit des Programmierens eingespart wird. Dank des rechtzeitigen Informationsabrufs können zudem alle weiteren externen Rüsttätigkeiten pünktlich begonnen werden. Das Risiko, dass externe Rüsttätigkeiten zu Beginn des internen Rüstens noch nicht abgeschlossen sind und sich die interne Rüstzeit dadurch zwangsläufig verlängert, kann somit verringert werden. In der Folge wird der gesamte Rüstprozess stabiler.⁵²⁰

4.5.5.2 SMED vs. Intelligente Maschinen

Im Rahmen von SMED ermöglicht eine geeignete Sensorik der intelligenten Maschinen zunächst eine zeitliche Analyse des internen Rüstvorgangs und schafft somit eine detaillierte Grundlage für SMED-Projekte. Darüber hinaus kann mithilfe der eingebauten Sensorik der interne Rüstprozess überwacht werden. Während des Rüstvorgangs „weiß“ die Maschine bspw. immer, welche Werkzeuge aktuell gerüstet sind.⁵²¹ Diese Information kann über einen Infopoint, auch SMED-Terminal genannt, direkt an der Maschine angezeigt werden. Auch Zusatzinformationen, etwa über die Verfügbarkeit und den Lagerort alternativer, virtuell abgebildeter Werkzeuge, können angezeigt werden. Dies macht den Rüstvorgang transparenter und kann das Risiko unvorhergesehener Verzögerungen im Rüstprozess minimieren.⁵²² Ein entsprechender Cloud-Dienst, welcher die für den Werkzeugeinsatz benötigten Informationen in Form digitaler Werkzeugbegleitkarten in Echtzeit bereitstellt, wird im

⁵¹⁹ Vgl. Schlick et al., 2014, S.60.

⁵²⁰ Vgl. „Cleveres Rüsten macht auch Fertigung von Einzelteilen produktiver“, 2010, S.1.

⁵²¹ Vgl. Ortmann, 2015, S.52.

⁵²² Vgl. „Fertigungsdaten papierlos an der Maschine bereitstellen“, 2016, S.1.

Projekt ToolCloud entwickelt. Dank der digitalen Werkzeugbegleitkarten ist jedem Werkzeug ein virtuelles Abbild zugeordnet, sodass werkzeugindividuelle Betriebs- (z.B. optimale Drehzahl, Einsatzhistorie) und Korrekturdaten (sich verändernde reale Maße bspw. durch Anschärfen des Werkzeugs) permanent verfügbar sind.⁵²³ Wichtig ist hierbei eine automatische Identifizierung der Werkzeuge in der jeweiligen Maschine durch eine eindeutige Kennzeichnung (z.B. Barcode, RFID). Nach Abruf der Werkzeuginformationen werden die entsprechenden Daten aus der Cloud automatisch in die Maschinensteuerung übertragen. Im Vergleich zum Einsatz manuell ausgedruckter Werkzeugbegleitkarten führt dies zu einer Reduzierung des Aufwands und der Fehleranfälligkeit beim Rüstvorgang.^{524,525}

Ferner sollen Produktionsmodule in der Smart Factory nicht mehr nur für die Produktion einzelner Produkttypen verantwortlich sein, sondern dank flexibler Rekonfigurationsmöglichkeiten nahezu beliebig auf unterschiedliche Produkte in kurzer Zeit umgerüstet werden können (vgl. Kapitel 3.4.3).⁵²⁶ Da eine variantenreiche oder sogar kundenindividuelle Produktion in Losgröße eins einen Anstieg der Rüsthäufigkeit zur Folge hat und diesbezügliche kostenintensive Leerzeiten vermieden werden müssen, sind kurze Rüstzeiten auch in der Smart Factory essentiell.⁵²⁷ Die flexible Rekonfiguration der intelligenten Produktionsmodule und Maschinen wird dank ihres modularen Aufbaus sowie standardisierter physischer und informationstechnischer Schnittstellen und Interaktionsprotokolle ermöglicht.⁵²⁸ Einzelne austauschbare Maschinen sollen sich nach ihrem Anschluss automatisch mit ihren Fähigkeiten ad hoc am Leitreechner anmelden, ihre Fähigkeiten übermitteln, sich selbst konfigurieren und in den Produktionsablauf integrieren können. In Anlehnung an das sog. Plug and Play-Prinzip einer USB-Schnittstelle, über die sich angeschlossene Geräte beim Hauptreechner anmelden bezeichnet sich diese Fähigkeit als „Plug and Produce“ („Einstecken und produzieren“).^{529,530} Plug and Produce erlaubt es, Maschinen flexibel in wenigen Minuten miteinander zu koppeln oder auszutauschen, um andere Produktvarianten zu produzieren.⁵³¹ Der sinkende

⁵²³ Vgl. Günther/Klenk/Tenerowicz-Wirth, 2014, S.308.

⁵²⁴ Vgl. Günther/Klenk/Tenerowicz-Wirth, 2014, S.308.

⁵²⁵ Vgl. BMBF, 2015, S.39.

⁵²⁶ Vgl. Scheer, 2015, S.5.

⁵²⁷ Vgl. Frison, 2015, Pos. 1200 (Kindle Edition).

⁵²⁸ Vgl. Kolberg/Zühlke, 2015, S.1873.

⁵²⁹ Vgl. Kagerman et al., 2013, S.105.

⁵³⁰ Vgl. Kagermann/Wahlster/Helbig, 2012, S.60.

⁵³¹ Vgl. Kolberg/Zühlke, 2015, S.1873.

Integrationsaufwand kommt einer internen Rüstzeitreduktion im Rahmen von SMED gleich, da dieser während des Maschinenstillstands anfällt. Der Rüstvorgang bezieht sich in diesem Fall allerdings auf Maschinen, die umgebaut, ausgetauscht oder erweitert werden, um das Produktionsmodul auf die Produktion des nachfolgenden Produkts vorzubereiten.⁵³²

Darüber hinaus lassen sich auch Werkzeuge und Vorrichtungen mit der Plug and Produce-Funktionalität ausstatten.^{533,534} Auch neue Werkzeuge lassen sich so mit geringerem manuellen Aufwand in den Produktionsablauf integrieren. Dies verkürzt eine diesbezügliche interne Rüstzeit.⁵³⁵ Als Beispiel für eine Anwendung, die eine standardisierte Kommunikation zwischen Werkzeug und Maschinensteuerung sowie eine Selbstkonfiguration von Werkzeugen im Sinne von Plug & Produce beinhaltet, kann die im Projekt „BaZMod“⁵³⁶ entwickelte cyber-physische Werkzeugmaschinen­spindel angeführt werden.⁵³⁷

Das Plug and Produce Prinzip hat folglich unabhängig davon, ob es für Produktionsmodule oder Werkzeuge eingesetzt wird, positive Auswirkungen auf die SMED-Methode und das erklärte Ziel der Rüstzeitminimierung.

4.5.5.3 SMED vs. Intelligente Assistenzsysteme

Die bei der herkömmlichen SMED-Methode als Informationsträger verwendeten Zeichnungen, Aufträge und Arbeitsanweisungen in Papierform werden in der Smart Factory durch digitale Entsprechungen mithilfe von Assistenzsystemen ersetzt. Dadurch werden Medienbrüche oder Kommunikationsprobleme verringern und die Transparenz erhöht. So können Informationen zum Rüstvorgang mithilfe geeigneter Software am Tablet-Computer – bspw. über die sog. Rüst-App des Fraunhofer Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung (Fraunhofer IPA) – in Echtzeit direkt am Rüstplatz zur Verfügung gestellt werden. Dank einer Visualisierung der Rüstaktivitäten in der App kann der situative Umgang mit Problemen im Rüstprozess erleichtert werden. Zudem stellt die App digitale Arbeitsanweisungen bereit, sodass

⁵³² Vgl. Gerberich, 2011, S.157.

⁵³³ Vgl. „Montageprozesse und Werkzeuge“, 2015, S.1.

⁵³⁴ Vgl. Kagerman et al., 2013, S.105.

⁵³⁵ Vgl. Kagermann/Wahlster/Helbig, 2012, S.60.

⁵³⁶ Abkürzung für „Bauteilgerechte Maschinenkonfiguration in der Fertigung durch Cyber-Physische Zusatzmodule“.

⁵³⁷ Vgl. BMBF, 2015, S.6.

die Fehleranfälligkeit und etwaige Verzögerungen beim Rüsten vermindert werden. Sogar kurzfristige Änderungen im Prozess berücksichtigt die App, sodass die situative Auftragszuordnung intelligenter Maschinen kein Problem im Rahmen des Rüstprozesses darstellt.⁵³⁸

Darüber hinaus unterstützen mobile Assistenzsysteme auch ein intelligentes Rüstteilemanagement. Dank ID-fähiger Rüstteile lässt sich die Verfügbarkeit von Rüstteilen bereits im Planungsprozess über ein mobiles Assistenzsystem anzeigen. Dadurch kann eine rechtzeitige Bereitstellung der Rüstteile im Rahmen des externen Rüstvorgangs sichergestellt werden. Außerdem entfallen unnötige Suchvorgänge der Rüstteile.⁵³⁹

4.5.5.4 SMED vs. Intelligente Transportsysteme

Fahrerlose Transportsysteme können neben dem Transport von Ladungsträgern und Werkstücken prinzipiell auch für den Transport von Werkzeugen und Rüsthilfsmitteln im Rahmen des externen Rüstens eingesetzt werden. Der Dienst von intelligenten Transportsystemen kann über das Internet der Dienste bei anstehendem Rüstprozesse gebucht werden. In der Folge fragt das Transportsystem automatisch den Lagerort des Werkzeugs oder des Hilfsmittels ab, holt es dort ab und liefert es rechtzeitig an die entsprechende Maschine. Bei passenden Manipulatoren (z.B. Greifarm) ist sogar eine genaue Aus- und Einlagerung bspw. in ein Magazinsystem denkbar. Das manuelle Handling sowie der Aufwand für den Transport von Werkzeugen und Rüsthilfsmitteln kann somit reduziert werden. Zudem stellen die intelligenten Transportsysteme dank ihrer Kommunikation untereinander sicher, dass der interne Rüstprozess nicht durch Störungen im Transport verzögert wird.⁵⁴⁰

4.5.5.5 Bewertung

Intelligente Produkte verkürzen dank ihres mitgeführten Auftrags und der benötigten Anlagenkonfiguration externe Rüsttätigkeiten und ermöglichen eine automatisierte, auf der aktuellen Auftragsituation basierende Konfiguration des Produktionssystems. Zudem schaffen sie die Voraussetzung für eine bessere Synchronisation zwischen dem Abschluss externer Rüstaktivitäten und dem

⁵³⁸ Vgl. Wutzke, 2015, S.31f.

⁵³⁹ Vgl. „Industrie 4.0 – Medienhype oder Chance?“ 2014, S.18.

⁵⁴⁰ Vgl. Fandel/Dyckhoff/Reese, 1990, S.88f.

Bearbeitungsende des jeweiligen Produktionsloses, d.h. dem Beginn interner Rüsttätigkeiten für das nächste Los. Dies verringert die Wahrscheinlichkeit einer Überlappung von interner Rüstzeit durch externe Rüstaktivitäten. Intelligente Produkte stellen daher eine gute Ergänzung für SMED dar (2 Punkte)

Die Sensorik Intelligenter Maschinen schafft dank der automatischen Erhebung von internen Rüstzeiten die Basis für SMED. Zudem gewährleisten sie eine bessere Überwachung des eigentlichen internen Rüstprozesses. Insbesondere sind intelligente Produktionsmodule und ihre Werkzeuge dank Plug and Produce-Eigenschaft und ihrer modularen Gestaltung fähig, sich in kurzer Zeit flexibel auf neue Produktvarianten umzurüsten. Die damit verbundene Verkürzung der internen Rüstzeit schafft die Voraussetzung für die kundenindividuelle Produktion in Losgröße eins. Der Einfluss intelligenter, modular aufgebauter Anlagen und Maschinen auf die Verkürzung von Rüstzeiten – dem Ziel von SMED – ist somit durchweg positiv, weshalb eine vollkommene Kompatibilität zwischen SMED und intelligenten Maschinen gesehen wird (3 Punkte).

Intelligente Assistenzsysteme können zum einen für den Rüstvorgang benötigte Informationen digital in Echtzeit zur Verfügung stellen und zum anderen ein intelligentes Rüstteilemanagement in Kombination mit ID-fähigen Rüstteilen unterstützen. Dies reduziert organisatorische Verluste bei internen und externen Rüstvorgängen. Intelligente Assistenzsysteme werden daher als eine gute Ergänzung zur SMED-Methode eingeschätzt (2 Punkte).

Schließlich lassen sich intelligente Transportsysteme auch für die rechtzeitige Anlieferung von Werkzeugen und Rüsthilfsmitteln und ggf. sogar für eine genaue Aus- und Einlagerung des Werkzeugs in die Maschine einsetzen. Vorteile sind die Vermeidung von Transportverzögerungen im externen Rüstprozess und die Reduzierung von manuellem Handling innerhalb des internen Rüstprozesses, weshalb das Technologieparadigma als förderlich für SMED eingestuft wird (2 Punkte).

4.6 Jidoka im Kontext von Industrie 4.0

4.6.1 Andon im Kontext von Industrie 4.0

4.6.1.1 Andon vs. Intelligente Maschinen

Dank ihrer Sensorik können intelligente Maschinen permanent ihre Umwelt aufnehmen und darauf basierend automatische Qualitätsprüfungen am Produkt durchführen. So können bei der Bearbeitung mechanischer Teile in der Smart Factory bspw. automatische Qualitätsprüfungen per Infrarot-Scans innerhalb der Maschinen durchgeführt werden.⁵⁴¹ Im Fehlerfall stoppen die intelligenten Maschinen und berechnen ihre Produktionspläne in Echtzeit neu.⁵⁴² Zusätzlich können die Maschinen die Historie aller Rahmenbedingungen eigenständig auswerten und den Fehlerfindungsprozess somit maßgeblich verkürzen.⁵⁴³ Wichtige Informationen zur Fehleridentifikation oder zu den Auswirkungen auftretender Fehler, wie bspw. der Produktionsrückstand oder der Auftragsstau, die i.d.R. auch über Andon-Boards visualisiert werden (vgl. Kapitel 2.3.4.2), können zusätzlich direkt an der Maschine abgelesen werden.⁵⁴⁴ Auch die Fehlermeldung kann die Maschine dank ihrer Vernetzung selbstständig abgeben und unverzüglich Personal zur Fehlerbehebung anfordern.⁵⁴⁵ Innerhalb von oder auch über Unternehmensgrenzen hinweg können Qualitätsprobleme so in Echtzeit aufgezeigt, gemeldet und beseitigt werden.⁵⁴⁶

Intelligente Maschinen überwachen ihre Fertigungsprozesse folglich autonom, können diese bei Fehlern stoppen und selbstständig Gegenmaßnahmen einleiten. Diese Eigenschaft des selbststeuernden Fehlermanagements perfektioniert den Grundgedanken von Andon-Systemen, die Produktion bei Problemen zu stoppen und diese anzuzeigen und wird auf Dauer vom Menschen gesteuerte Andon-Systeme – zumindest an hochautomatisierten Arbeitsplätzen – ablösen.⁵⁴⁷

⁵⁴¹ Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015b, S.160.

⁵⁴² Vgl. Schöning/Dorchain, 2014, S.547.

⁵⁴³ Vgl. Kaufmann, 2015, S.27.

⁵⁴⁴ Vgl. Schließmann, 2014, S.465.

⁵⁴⁵ Vgl. Kolberg/Zühlke, 2015, S.1874.

⁵⁴⁶ Vgl. Bruun/Mefford, 2004, S. 250.

⁵⁴⁷ Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015b, S.160.

4.6.1.2 Andon vs. Intelligente Assistenzsysteme

Wie beschrieben, verfolgen Andon-Systeme das Ziel einer schnellstmöglichen Visualisierung von Qualitätsproblemen. Dies wird auch vor dem Hintergrund eines selbststeuernden Fehlermanagements der Maschinen weiterhin essentiell sein, um auf Probleme aufmerksam zu machen und diese unverzüglich zu beheben. Mobile Assistenzsysteme können diese Visualisierung weiter verbessern und die Zeit zwischen Auftreten und Beheben des Fehlers verkürzen. Demnach können Mitarbeiter die von den intelligenten Maschinen abgegebenen Störmeldungen über mobile Tablet-Computer oder Smart Watches empfangen und sich diese in Echtzeit anzeigen lassen. Statt über ein Andon-Board oder Signallampen (vgl. Kapitel 2.3.4.2) werden verantwortliche Mitarbeiter per Push-Nachricht auf Störungen und deren Quelle hingewiesen. Die Fehlermeldung erreicht die relevanten Personen somit auch, wenn sie sich nicht in Sichtweite eines etwaigen Andon-Boards oder etwaiger Signallampen aufhalten.⁵⁴⁸ Zusätzlich können Indoor-GPS-Systeme in den Tablet-Computern die aktuelle Position verantwortlicher Personen feststellen und somit dafür sorgen, dass ausschließlich diejenigen Mitarbeiter, die sich im Umkreis der Maschine aufhalten, benachrichtigt werden. Dies vermeidet unnötig weite Wege.⁵⁴⁹ Die Dokumentation der Fehler muss in Zukunft nicht mehr schriftlich, sondern kann direkt am Ort der Entstehung durch Bild-, Video- oder Sprachaufzeichnung mittels Assistenzsysteme vorgenommen werden. Denkbar ist auch ein direkter Kontakt zwischen Werker und Produktionsleiter über Videotelefonie oder Smart Glasses, um akute Probleme gemeinsam und schneller beseitigen zu können.⁵⁵⁰ Im Vergleich zu herkömmlichen Andon-Systemen, können Assistenzsysteme in der Smart Factory künftig für eine genauere Fehlerlokalisierung sorgen. Dem Mitarbeiter werden dabei Kamerabilder aus der entsprechenden Maschine an einem Tablet-Computer oder über eine Datenbrille angezeigt, die mit Hinweisen zur Fehlerlokalisierung und -behebung via Augmented Reality überlagert sind.⁵⁵¹

Darüber hinaus können Assistenzsysteme Andon-Boards in ihrer Funktion, Transparenz über den gesamten Produktionsbereich zu schaffen, ersetzen, indem

⁵⁴⁸ Vgl. Kolberg/Zühlke, 2015, S.1872.

⁵⁴⁹ Vgl. Schließmann, 2014, S.465.

⁵⁵⁰ Vgl. Plutz, 2015, S.14.

⁵⁵¹ Vgl. „Industrie 4.0 oder die vierte industrielle Revolution“, 2012, S.1.

sie die Zustände jedes einzelnen Arbeitsplatzes (z.B. die Taktzeit) über digitale Andon-Boards anzeigen.⁵⁵²

Solange Maschinen noch nicht über ein selbstständiges Fehlermanagement verfügen bzw. falls es sich um manuelle, getaktete Arbeitsplätze innerhalb eines Produktionsmoduls handelt, werden Mechanismen im Sinne von Andon-Cords auch weiterhin ihre Daseinsberechtigung haben, um bei Gefahr der Taktzeitüberschreitung oder im Fehlerfall Hilfe bei Kollegen anzufordern. Assistenzsysteme können dabei zur Digitalisierung von Andon-Cords beitragen. Ein Bsp. dafür ist das sog. Andon Control der Firma Wermer Signaltechnik. Fehlermeldungen werden hierbei manuell an einem netzwerkfähigen, tragbaren Gerät ausgelöst und per Funk an ein zentrales Andon-System übermittelt. Dieses versendet daraufhin Nachrichten an die Assistenzsysteme der entsprechenden Personen, um Unterstützung anzufordern. Somit werden die Reaktionszeiten auf die Fehlermeldung mithilfe des Systems verkürzt.⁵⁵³

4.6.1.3 Bewertung

Der Einsatz intelligenter Produkte hat für sich betrachtet keine speziellen Auswirkungen auf Andon-Systeme. Eine Bewertung zur Verknüpfung zwischen diesem Lean-Konzept und dem Technologieparadigma intelligenter Produkte wurde daher nicht vorgenommen (keine Bewertung).

Intelligente Maschinen führen automatische Qualitätsprüfungen durch, stoppen autonom im Fehlerfall, melden Fehler eigenständig und in Echtzeit und unterstützen die Fehlerlokalisierung durch Auswertung von Vergangenheitsdaten. Dieses selbststeuernde Fehlermanagement führt an hochautomatisierten Arbeitsplätzen zu einer Weiterentwicklung der bisher vom Menschen gesteuerten Andon-Systeme zum Stoppen der Produktion und zur Anzeige von Qualitätsproblemen.⁵⁵⁴ Daher ist eine vollkommene Kompatibilität zwischen Andon-Systemen und intelligenten Maschinen gegeben (3 Punkte).

Zudem wurde ersichtlich, dass Andon-Systeme durch den Einsatz intelligenter Assistenzsysteme in der Smart Factory verbessert werden, da sie im Vergleich zu

⁵⁵² Vgl. o.A., 2013, S.40.

⁵⁵³ Vgl. o.A., 2013, S.40.

⁵⁵⁴ Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015b, S.160.

einfachen Signallampen eine zügigere Fehlerlokalisierung und -behebung durch die Anzeige kontextintensiver Informationen ermöglichen. Daher kann ebenso von einer Weiterentwicklung von Andon-Systemen durch intelligente Assistenzsysteme gesprochen werden (3 Punkte).

Wie auch bei intelligenten Produkten, konnte kein Einfluss intelligenter Transportsysteme auf Andon-Systeme festgestellt werden, weshalb eine Bewertung an dieser Stelle entfällt (keine Bewertung).

4.6.2 Poka Yoke im Kontext von Industrie 4.0

4.6.2.1 Poka Yoke vs. Intelligente Produkte

Intelligente Produkte tragen ihre jeweils individuellen Arbeitsanweisungen und ihren aktuellen Bearbeitungsstatus mit sich und können diese an relevanten Stellen per Barcode oder RFID übertragen. Im Rahmen intelligenter Assistenzsysteme können digitale Arbeitsanweisungen in der Folge über Augmented Reality angezeigt werden, sodass der Werker bei der korrekten Ausführung der Arbeitsschritte unterstützt wird. Die Abfrage des aktuellen Bearbeitungsstatus stellt sicher, dass alle vorgelagerten Schritte korrekt durchgeführt wurden. Andernfalls kann eine virtuelle Anleitung zur Vervollständigung abgerufen werden.⁵⁵⁵

4.6.2.2 Poka Yoke vs. Intelligente Maschinen

Die Fähigkeit intelligenter Maschinen, maschinelle Fehler durch automatische Qualitätskontrollen selbst zu vermeiden, wurde bereits im Rahmen der Untersuchung von Andon-Systemen im Kontext von Industrie 4.0 (vgl. Kapitel 4.6.1.1) beschrieben. Poka Yoke zielt hingegen explizit auf die Vermeidung von Fehlern im Produktionsprozess durch den Menschen ab (vgl. Kapitel 2.3.4.3).⁵⁵⁶ In diesem Sinne stellen intelligente Maschinen dank ihrer Sensorik und Rechenfähigkeit Messmittel bereit, die in der Lage sind, den Menschen auf Fehlhandlungen, welche im direkten Kontakt mit den Maschinen entstehen, aufmerksam zu machen.⁵⁵⁷ So könnte der Bediener bspw. bei falschem Einlegen, Einspannen oder Positionieren von Werkzeugen und Werkstücken in die Maschine durch optische oder akustische

⁵⁵⁵ Vgl. Gorecky/Loskyll, 2014, S.536.

⁵⁵⁶ Vgl. Gerberich, 2011, S.146.

⁵⁵⁷ Vgl. Kolberg/Zühlke, 2015, S.1873.

Warnsignale zur Korrektur aufgefordert oder eine fehlerhafte Bearbeitung durch Blockieren der Maschine verhindert werden.⁵⁵⁸

4.6.2.3 Poka Yoke vs. Intelligente Assistenzsysteme

Die Herausforderung steigender Variantenvielfalt bedeutet für den Werker eine steigende Komplexität und somit eine höhere Anfälligkeit für Fehlhandlungen. Im Industrieinsatz befinden sich daher bereits zahlreiche technische Systeme, die allerdings meist auf eine Fehlererkennung in einem nachgelagerten Prozessschritt (z.B. Barcode-Scan zur Kontrolle nach Entnahme) setzen. Dabei ist häufig nicht sichergestellt, dass die Kontrolle auch tatsächlich durchgeführt wird. Der Einsatz intelligenter Assistenzsysteme ermöglicht, Fehler direkt und automatisch bei deren Ausführung zu erfassen und umgehend zurückzumelden.⁵⁵⁹ Dies kommt einem digitalen Poka Yoke gleich⁵⁶⁰ und unterstützt den Menschen folglich bei der Vermeidung von Fehlern. Das ursprüngliche Poka Yoke war für die Anwendung in wiederholbaren Arbeitsschritten vorgesehen. Mithilfe einer Erweiterung um eine digitale Komponente können hingegen produktspezifische Fehlerursachen aufgedeckt werden, sodass das Prinzip nun auch in der Einzelfertigung angewendet werden kann.⁵⁶¹ Dazu gibt es bereits zahlreiche Beispiele aus der Forschung und der Unternehmenspraxis.

Ein erstes Beispiel für ein intelligentes Assistenzsystem ist RFID-Lesegerät, das in einen Handschuh integriert ist. In ihrer Anwendung werden mit RFID-Tags versehene Behälter bei der Entnahme von Artikeln ausgelesen und die entsprechende ID mit der laut Auftrag richtigen ID des Artikels bzw. Behälters verglichen. Greift der Mitarbeiter in einen falschen Behälter, erhält er ein optisches oder akustisches Signal und kann den Fehler unverzüglich beheben.⁵⁶²

Ein weiteres Beispiel ist der in Abb. 26 dargestellte, vom Fraunhofer IPA entwickelte adaptive Montagearbeitsplatz mit Assistenzsystem. Er beinhaltet zum einen ein Pick-by-Light-System, welches dem Werker per Licht anzeigt, welches Bauteil als nächstes montiert werden muss. Zum anderen zeigt ein Put-to-Light-System dem

⁵⁵⁸ Vgl. „Neun typische Fehler im Produktionsprozess - und wie man sie vermeidet“, 2014, S.1.

⁵⁵⁹ Vgl. Günther/Klenk/Tenerowicz-Wirth, 2014, S.314f.

⁵⁶⁰ Vgl. Lanza et al., 2014, S.66.

⁵⁶¹ Vgl. Sondermann, 2013, S.94.

⁵⁶² Vgl. Günther/Klenk/Tenerowicz-Wirth, 2014, S.314f.

Monteur mit einer Lichtmarkierung die Verbauposition auf dem Werkstück an. Dabei überprüft eine räumliche Bauteilerkennung, ob das Werkstück richtig verbaut wurde. Parallel zum Montageprozess werden Hilfestellungen zur richtigen Montage per Augmented Reality auf die Arbeitsfläche projiziert.⁵⁶³



Abb. 26: Bsp. für Pick-by-Light- und Put-to-Light-Technologien



Abb. 27: Bsp. für Pick-by-Vision-Technologie

Ein anderes Szenario sieht den Einsatz von Pick-by-Vision in der Montage vor (s. Abb. 27). Hierbei werden dem Werker orts-, situations- und zielgerichtete Informationen zum betrachteten Objekt über eine Datenbrille direkt per Augmented Reality ins Blickfeld eingeblendet. Vorstellbar ist z.B. eine virtuelle Markierung des korrekten Lagerorts oder eine virtuelle Anzeige der zu montierenden Teile.⁵⁶⁴ Zusätzlich können Artikel nach der Entnahme kurz ins Blickfeld gehalten werden, sodass die Kamera den Artikel anhand einer Codierung identifizieren kann. Im Vergleich zu einem Barcodescanner, hat der Werker jedoch beide Hände frei.⁵⁶⁵

4.6.2.4 Bewertung

Durch Mitführen und Übermitteln ihrer individuellen Arbeitsanweisungen ermöglichen intelligente Produkte erst den Einsatz eines digitalen Poka Yoke. Daher wird eine gute Unterstützung von Poka Yoke durch dieses Technologieparadigma für die Bewertung zugrundegelegt (2 Punkte).

Intelligente Maschinen vermeiden zwar in erster Linie maschinelle Fehler, jedoch können sie im Sinne von Poka Yoke auch zur Vermeidung menschlicher Fehler beitragen, wenn es zwischen dem Bediener und der Maschine in direktem Kontakt zu

⁵⁶³ Vgl. Rixinger, 2015, S.35.

⁵⁶⁴ Vgl. Dickmann, 2009, S.461f.

⁵⁶⁵ Vgl. Günther/Klenk/Tenerowicz-Wirth, 2014, S.315f.

Fehlhandlungen kommt. Dies wird ebenso als gute Unterstützung gewertet (2 Punkte).

Intelligente Assistenzsysteme können durch den Einsatz von RFID-, Pick-by-Light-, Put-to-Light-, Pick-by-Vision- oder anderen Augmented Reality-Technologien dafür sorgen, dass menschliche Fehlhandlungen trotz steigender Variantenvielfalt nicht zu Fehlern führen, indem sie diese dem Nutzer sofort bei ihrem Auftreten melden. Es kann daher von einer Weiterentwicklung von Poka Yoke durch intelligente Assistenzsysteme zu einem digitalen Poka Yoke gesprochen werden (3 Punkte).

Intelligente Transportsysteme haben keine Überschneidungen mit der Funktion von Poka Yoke-Systemen, weshalb von einem Vergleich abgesehen wird (keine Bewertung).

4.6.3 TPM im Kontext von Industrie 4.0

4.6.3.1 TPM vs. Intelligente Maschinen

Der steigende Grad der Vernetzung und Automatisierung durch den Einsatz neuer Technologien und cyber-physischer Maschinen erfordert Instandhaltungsprozesse, die die Funktionsfähigkeit und Betriebsbereitschaft dieser gewährleisten.⁵⁶⁶ Im Rahmen der Instandhaltung wird es daher neue Aufgaben hinsichtlich der Produktionsressource „Information“ geben, wie z.B. die Integration neuer CPS in das bestehende Netzwerk, die Überwachung und Pflege komplexer CPS statt einfacher Maschinen oder die Erhaltung dezentraler und autonomer Steuerungskreise.⁵⁶⁷

Insbesondere können intelligente Maschinen im Rahmen eines TPM-Konzepts zustandsabhängige Instandhaltungsmaßnahmen zur Erreichung einer vorausschauenden Instandhaltung (vgl. Kapitel 2.3.3.4) verbessern. Die sog. Predictive Maintenance stellt die Erweiterung der zustandsabhängigen Instandhaltung dar. Sie hat die Zielsetzung, Prognosen über mögliche Ausfälle von Produktionsanlagen abzugeben, um diese vor ihrem Eintreten erkennen und beheben zu können und somit Ausfallzeiten zu minimieren sowie eine hohe Verfügbarkeit der Anlagen zu gewährleisten.⁵⁶⁸ Intelligente Maschinen können diese

⁵⁶⁶ Vgl. Clausen/Henke/ten Hompel, o.J., S.2.

⁵⁶⁷ Vgl. „Industrie 4.0 - Nur mit Smarter Instandhaltung“, 2015, S.16.

⁵⁶⁸ Vgl. Schöning, 2015, S.545.

unterstützen und verbessern. Über ihre Sensoren messen sie Werte verschiedener Betriebszustände wie bspw. Temperatur, Schwingungen einer Komponente, Energieverbrauch, Last oder Auslastung⁵⁶⁹ und nutzen diese, um Vorhersagen über das Ausfallverhalten kritischer Komponenten zu treffen.⁵⁷⁰ Im Zuge der Analyse wird anhand der über einen längeren Zeitraum erfassten Sensordaten zunächst ein virtuelles Modell erstellt, das den Normalzustand der Maschinen abbildet.⁵⁷¹ Mithilfe geeigneter Software werden die Werte der Maschinenzustände daraufhin auf Störungs- bzw. Fehlermuster untersucht. Diese dienen als Indikator, um sich abzeichnende Ausfälle bereits vor ihrem Auftreten zu erkennen.⁵⁷² Ein Beispiel dafür sind Drehmaschinen, die ihre Frequenzverläufe während der Bearbeitung messen und anhand einer Frequenzanalyse untersuchen, ob ein Werkzeug demnächst brechen wird.⁵⁷³ Bei Abweichungen vom Normalzustand alarmieren die Maschinen selbstständig das Instandhaltungspersonal⁵⁷⁴, um eine optimale Planung, Priorisierung und Einleitung von Instandhaltungsmaßnahmen oder die rechtzeitige Beschaffung von Ersatzteilen zu ermöglichen^{575,576}. Außerdem versetzt die kontinuierliche Erfassung und Überprüfung von Maschinenzuständen die Maschinen in die Lage, ihre Fähigkeit der Selbstdiagnose ständig zu verbessern – sie werden in der Smart Factory folglich lernfähig.⁵⁷⁷ In einer vollvernetzten Smart Factory werden schließlich sogar Maschinenkomponenten wie Motoren, Getriebe und Kupplungen eigene Intelligenz besitzen und somit Eigendiagnosen erstellen können. Dies wird die Lokalisierung von Instandhaltungsbedarfen im Rahmen einer Predictive Maintenance weiter optimieren.⁵⁷⁸

Folglich verbessern intelligente Maschinen im Rahmen von TPM nicht nur die Qualitätsrate durch automatische Qualitätsprüfung im Rahmen des in Kapitel 4.6.1.1. beschriebenen, selbststeuernden Fehlermanagements, sondern zusätzlich die Verfügbarkeits- und Leistungsrate durch Predictive Maintenance. Der Einsatz

⁵⁶⁹ Vgl. Schöning, 2015, S.545.

⁵⁷⁰ Vgl. Paulus/Hauske, 2016, S.265.

⁵⁷¹ Vgl. „Revolution in den Fabrikhallen“, 2014, S.2.

⁵⁷² Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015b, S.160.

⁵⁷³ Vgl. „Datenfluten zur Selbstoptimierung nutzen“, 2014, S.1.

⁵⁷⁴ Vgl. „Revolution in den Fabrikhallen“, 2014, S.2.

⁵⁷⁵ Vgl. Paulus/Hauske, 2016, S.265.

⁵⁷⁶ Vgl. Schöning, 2015, S.545.

⁵⁷⁷ Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015b, S.160.

⁵⁷⁸ Vgl. „Datenfluten zur Selbstoptimierung nutzen“, 2014, S.1.

intelligenter Maschinen hat somit positive Auswirkungen auf alle Faktoren der OEE (vgl. Kapitel 2.3.3.4).^{579,580}

4.6.3.2 TPM vs. Intelligente Assistenzsysteme

Klassische Instandhaltungsprozesse im ursprünglichen TPM basieren auf Papier (z.B. ausgedruckte Checklisten oder manuell ausgefüllte Wartungsprotokolle) und sind daher sehr aufwendig, langsam, fehleranfällig und nur durch manuelle Überführung ins IT-System auswertbar.⁵⁸¹ Mithilfe intelligenter Assistenzsysteme lassen sich alle relevanten Informationen zusammenführen und detailliert in Echtzeit anzeigen.^{582,583} Zu diesen gehören sowohl Informationen zum aktuellen Zustand der jeweiligen Maschine wie bspw. der Energieverbrauch oder die Kennzahl der OEE⁵⁸⁴ als auch Informationen zur Instandhaltungshistorie (z.B. Dokumentation aller Störungen und durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen, bisherige Wartungsprotokolle mit Fotos)⁵⁸⁵. Checklisten mit Logik- und Konsistenzprüfungen können digital ausgefüllt und abgespeichert werden.⁵⁸⁶ Zusätzlich können nutzerbezogene Übersichten zu bevorstehenden Instandhaltungsaufgaben und -terminen generiert werden.⁵⁸⁷ Außerdem lassen sich Instandhaltungsmaßnahmen priorisieren, sodass Maschinen in kritischerem Zustand zuerst versorgt werden können.⁵⁸⁸ Ein Beispiel für ein solches Assistenzsystem ist das sog. Ressourcen-Cockpit (s. Abb. 28), welches dem Instandhalter auf einem Tablet-Computer angezeigt wird.⁵⁸⁹ Sowohl die Instandhaltungsabteilung im Rahmen der geplanten Instandhaltung) als auch die für Routinetätigkeiten verantwortliche Werker im Rahmen der autonomen Instandhaltung werden folglich bei ihrer Tätigkeit unterstützt.

⁵⁷⁹ Vgl. Paulus/Hauske, 2016, S.265.

⁵⁸⁰ Vgl. Schöning, 2015, S.545.

⁵⁸¹ Vgl. Paulus/Hauske, 2016, S.227f.

⁵⁸² Vgl. Frison, 2015, Pos. 1072 (Kindle Edition).

⁵⁸³ Vgl. BMBF, 2015, S.34.

⁵⁸⁴ Vgl. Frison, 2015, Pos. 1072 (Kindle Edition).

⁵⁸⁵ Vgl. Paulus/Hauske, 2016, S.228.

⁵⁸⁶ Vgl. Paulus/Hauske, 2016, S.228.

⁵⁸⁷ Vgl. BMBF, 2015, S.34.

⁵⁸⁸ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.31.

⁵⁸⁹ Vgl. BMBF, 2015, S.34.



Abb. 28: Ressourcen-Cockpit zur Unterstützung des Instandhaltungsprozesses



Abb. 29: Bsp. für Instandhaltung mittels Augmented-Reality

Im Rahmen der Beseitigung von Schwerpunktproblemen an den Anlagen werden häufig sog. Mängelkarten verwendet, um diese zu visualisieren und zu dokumentieren. Durch den Einsatz von Assistenzsystemen können diese digital auf Maschinenebene abgerufen werden, wodurch sich der Aufwand und die Fehleranfälligkeit bei diesbezüglichen Kaizen-Aktivitäten im Rahmen von TPM verringert.⁵⁹⁰

Darüber hinaus können insbesondere Werker im Rahmen der autonomen Instandhaltung Expertenwissen aus einer Datenbank abrufen oder per Handlungsanweisungen durch die Instandhaltungsmaßnahme geführt werden.⁵⁹¹ Sinnvoll ist hierbei auch der Einsatz von Augmented Reality-Technologien. Wie in Abb. 29 abgebildet kann eine Augmented-Reality-fähige Arbeitsschutzbrille oder ein Augmented-Reality-Tool auf dem Display eines Tablet-Computers, das der Werker auf die Arbeitsumgebung hält, alle zur Instandhaltung nötigen Werkzeuge und Anleitungen einblenden und ihn durch den Prozess führen.^{592,593} Dank einer integrierten Kamera oder eines Scanners ist das Abscannen von Bar- oder QR-Codes auf auszutauschenden Komponenten möglich, um damit die Verfügbarkeit von Ersatzteilen abzufragen oder eine Nachbestellung auszulösen. Instandhaltungszeiten und -fehler werden somit deutlich reduziert.⁵⁹⁴ Werker können abgesehen von Routinetätigkeiten in Zukunft somit einen noch größeren Teil der Instandhaltungsaufgaben selbst übernehmen. Die erforderlichen Kenntnisse und

⁵⁹⁰ Vgl. „Industrie 4.0 und TPM - Revolution oder Evolution?“, 2015, S.24.

⁵⁹¹ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.30.

⁵⁹² Vgl. Siepmann, 2016b, S.68f.

⁵⁹³ Vgl. Gunther, 2015, S.16.

⁵⁹⁴ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.31.

Fähigkeiten, die im TPM-Konzept über separate Trainings und Schulungen vermittelt werden, können nun „on the job“ erlernt werden – das spart Zeit und Kosten.⁵⁹⁵

4.6.3.3 Bewertung

TPM soll eine permanente Funktionstüchtigkeit und Betriebsbereitschaft der Maschinen und Anlagen sicherstellen, weshalb intelligente Produkte keine besondere Rolle im Rahmen von TPM spielen (keine Bewertung).

Die Nutzung cyber-physischer Maschinen wird die Instandhaltungsaufgaben im Rahmen eines TPM-Konzepts um die Produktionsressource Information erweitern, komplexer machen und somit die Wichtigkeit der Instandhaltung für eine störungsfreie Produktion innerhalb der Smart Factory weiter erhöhen. Allerdings werden intelligente Maschinen selbst einen hohen Beitrag für ein erfolgreiche Smart Maintenance leisten, indem sie die vorausschauende Instandhaltung durch Predictive Maintenance perfektionieren. Der Perfektionierung dieser Grundidee von TPM durch intelligente Maschinen stehen komplexere und vielfältigere Instandhaltungsaufgaben im Umgang mit diesen gegenüber, weshalb keine volle Punktzahl vergeben wird (2 Punkte).

Mithilfe intelligenter Assistenzsysteme lassen sich alle relevanten Informationen für den mobilen Mitarbeiter zusammenführen, detailliert in Echtzeit anzeigen und digital aktualisieren. So wird das Instandhaltungsmanagement für die Instandhaltungsabteilung im Rahmen der geplanten Instandhaltung und für Werker im Rahmen der autonomen Instandhaltung optimiert. Zudem begleiten intelligente Assistenzsysteme den Prozess der Beseitigung von Schwerpunktproblemen. Schließlich werden Werker bei der Durchführung von Instandhaltungstätigkeiten im Rahmen der autonomen Instandhaltung durch Handlungsanweisungen und zusätzliche Informationen mithilfe von Augmented Reality-Technologien maßgeblich unterstützt, sodass eine Erweiterung der Aufgaben über Routinetätigkeiten in Zukunft denkbar ist und der Aufwand für Schulungen und Training verringert wird. Intelligente Assistenzsysteme verbessern folglich fast alle Säulen von TPM und werden daher als vollkommen kompatibel eingestuft (3 Punkte).

⁵⁹⁵ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.30.

Wie auch bei den Konzepten Andon und Poka Yoke, haben intelligente Transportsysteme als Lösung materialflusstechnischer Anforderungen einer Smart Factory keinen speziellen Einfluss auf das TPM-Konzept (keine Bewertung).

4.6.4 U-Zelle im Kontext von Industrie 4.0

4.6.4.1 U-Zelle vs. Intelligente Maschinen

Die im Rahmen intelligenter Maschinen behandelten, flexibel vernetzbaren Produktionsmodule können nach wie vor in sich verkettet sein (Vgl. Kapitel 2.3.3.2).⁵⁹⁶ Fertigungszellen, in denen teilautomatisierte Arbeitsstationen nach der Reihenfolge der einzelnen Bearbeitungsschritte in U-Form angeordnet sind⁵⁹⁷, realisieren eine solche Verkettung und kommen daher für die Gestaltung eines Produktionsmoduls in Frage.⁵⁹⁸

Heutige volatile Märkte erfordern höchste Flexibilität der Produktionseinrichtungen und des eingesetzten Personals.⁵⁹⁹ Produktionsmodule, die nach den Prinzipien von U-Zellen organisiert sind, erfüllen diese beiden Anforderungen. Auf der einen Seite können intelligente, wandlungsfähige Produktionsmodule dank ihrer Plug and Produce-Fähigkeit unterschiedlichste Bearbeitungsschritte in Zusammenarbeit mit dem Menschen durchführen und somit flexibel auf kundengetriebene Produktänderungen reagieren.⁶⁰⁰ Im Gegensatz zu den in einer lean organisierten Fabrik nach Produktfamilien abgegrenzten Fertigungszellen⁶⁰¹ können die Produktionsmodule der Smart Factory je nach geforderter Flexibilität daher auch von Produkten aus mehreren Produktfamilien in Anspruch genommen werden. Auf der anderen Seite unterstützen als U-Zellen gestaltete Produktionsmodule die von Industrie 4.0 geforderte Personalflexibilität⁶⁰², da in U-Zellen ein flexibler Personaleinsatz realisiert wird⁶⁰³ und sich die Anzahl der Mitarbeiter grundsätzlich an das Produktionsvolumen anpassen lässt.⁶⁰⁴

⁵⁹⁶ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.21.

⁵⁹⁷ Vgl. Syska, 2006, S.164.

⁵⁹⁸ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.23.

⁵⁹⁹ Vgl. BMBF, 2015, S.18.

⁶⁰⁰ Vgl. Kleinemeier, 2014, S.576.

⁶⁰¹ Vgl. Womack/Jones, 2004, S.79.

⁶⁰² Vgl. BMBF, 2015, S.18.

⁶⁰³ Vgl. Thonemann 2005, S.343.

⁶⁰⁴ Vgl. Womack/Jones, 2004, S.80.

Intelligente Produktionsmodule können den flexiblen Personaleinsatz im Rahmen einer U-Zelle sogar noch weiter verbessern. Die intelligenten Maschinen kennen ihren aktuellen Kapazitätsbedarf und können daher in Echtzeit Informationen über diesen liefern. Dies ermöglicht eine echtzeitnahe, selbstorganisierte Steuerung des Personaleinsatzes. Das Forschungsprojekt „KapaflexCy“ des Fraunhofer Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation (Fraunhofer IAO) entwickelt eine solche Kapazitätssteuerung. Mit ihrer Hilfe sollen Produktionskapazitäten gemeinsam mit den ausführenden Mitarbeitern hochflexibel und kurzfristig gesteuert werden können. Statt einer reaktiven, manuellen Koordination des Personaleinsatzes durch Team- oder Schichtleiter können diesbezügliche Entscheidungen künftig dezentral und vor der Entstehung von Kapazitätslücken⁶⁰⁵ in und zwischen den Arbeitsgruppen getroffen werden. In der Folge werden die Reaktionszeiten bei schwankendem Auftragsvolumen verkürzt, unproduktive Zeiten vermieden und der Aufwand zur Kapazitätssteuerung verringert.⁶⁰⁶ Hierzu nehmen die intelligenten Produktionsmodule typische Situationen und Rahmenbedingungen der Kundenaufträge und Arbeitsbelastung mittels Sensoren auf. Darauf basierend erkennen sie über einen agentenbasierten Kapazitäts-„Makler“ künftige Kapazitätsbedarfe und ordnen sie passenden Gruppenzusammenstellungen zu. Dabei werden auch unterschiedliche Qualifikationsprofile der Mitarbeiter berücksichtigt sowie der Einsatz unterschiedlicher Flexibilisierungsinstrumente (Überstunden, Zeitarbeit) aus finanzieller Perspektive abgewogen.⁶⁰⁷

Ein weiterer Ansatz, der für den flexiblen Personaleinsatz in getakteten U-Zellen angewendet werden kann, wird von Dombrowski/Wagner/Riechel beschrieben. Ihr „Concept for a Cyber Physical Assembly System“ (CyPAS) sieht vor, dass schwankende Bearbeitungszeiten manueller Tätigkeiten in getakteten Montagezellen ausgeglichen werden können, indem das cyber-physische Montagesystem je nach Arbeitsfortschritt Aufgaben flexibel und in Echtzeit an das Personal verteilt. Dazu ruft das intelligente Montagesystem die individuell benötigte Taktung des Montagemoduls sowie produktspezifische Aufgaben ab, erkennt während der Montage mithilfe von Sensoren den aktuellen Status der manuellen Montageschritte (bspw. durch die Identifikation von Werkzeugen, die gerade in Nutzung sind) und

⁶⁰⁵ Vgl. Spath et al., 2013b, S.3.

⁶⁰⁶ Vgl. BMBF, 2015, S.18.

⁶⁰⁷ Vgl. Spath et al., 2013b, S.3.

verteilt abhängig davon die noch benötigten Arbeitsschritte auf die Mitarbeiter. Durch die Organisation des flexiblen Personaleinsatz können kurzfristig auftretende Engpässe oder Wartezeiten zwischen den getakteten Arbeitsstationen vermieden werden, sodass ein One Piece Flow ohne standardisierte Puffer zwischen den Stationen⁶⁰⁸ realisiert werden kann. Die Effizienz eines flexiblen Personaleinsatzes in einer getakteten U-Zelle kann somit trotz hoher Variantenzahl und schwankendem Auftragsvolumen durch CyPAS gesteigert werden.⁶⁰⁹

4.6.4.2 U-Zelle vs. Intelligente Assistenzsysteme

Die dargestellten Ansätze KapaflexCy und CyPAS zur Verknüpfung intelligenter Produktionsmodule mit dem Prinzip der U-Zelle, implizieren jeweils auch den Einsatz intelligenter Assistenzsysteme zur vereinfachten Koordination des flexiblen Personaleinsatzes. Im Rahmen von KapaflexCy werden mobile Kommunikationsgeräte (Smartphones, Tablet-Computer⁶¹⁰) mit Social Media Funktionen eingesetzt, um über die Aufgabenzuteilung durch die Kapazitätssteuerung unmittelbar abstimmen zu können.⁶¹¹ Die Verbindung zwischen menschlicher Entscheidungsfindung und intelligenten Assistenzsystemen über mobile Kommunikationsgeräte erlaubt somit eine echtzeitnahe, selbstorganisierte Steuerung des Personaleinsatzes.⁶¹² Im Konzept von CyPAS wird die Verwendung eines Assistenzsystems mit netzwerkfähiger Display-Lösung beschrieben, die mit dem cyber-physischen Montagesystem kommuniziert und jedem Mitarbeiter die ständig wechselnden Produktvarianten, die verteilten Aufgaben sowie deren Abfolge über eine App anzeigen kann.⁶¹³

Abgesehen davon können als Assistenzsysteme geltende mobile, intelligente Montageplattformen den Mitarbeiter im Falle eines mitarbeitergebundenen Arbeitsflusses in einer U-Zelle unterstützen und entlasten. SEW-Eurodrive hat solche mobilen Montageassistenten bereits entwickelt und sie in ihren nach dem U-Layout aufgebauten Fertigungsinseln in der Getriebefertigung im Werk Graben-Neudorf eingesetzt. Abb. 30 zeigt den Einsatz dieser mobilen Montageassistenten. Sie

⁶⁰⁸ Vgl. Takeda 2009, S.58.

⁶⁰⁹ Vgl. Dombrowski/Wagner/Riechel, 2013, S.293ff.

⁶¹⁰ Vgl. Spath et al., 2013b, S.4.

⁶¹¹ Vgl. Spath et al., 2013b, S.1.

⁶¹² Vgl. Spath et al., 2013b, S.2.

⁶¹³ Vgl. Dombrowski/Wagner/Riechel, 2013, S.296.

fungieren nicht nur als fahrende, elektrisch angetriebene Werkbank, die der Mitarbeiter entlang der verschiedenen Arbeitstationen begleitet, sondern stellen durch automatische Positionierung (z.B. Wenden eines Gehäuses) und Anpassung der Arbeitshöhe an den Mitarbeiter zusätzlich eine ergonomische Hilfe für diesen dar.



Abb. 30: Bsp. für Einsatz eines mobilen Montageassistenten in U-Zelle



Abb. 31: Mobiler Montageassistent zur Visualisierung aller Auftragsinformationen

Abgesehen davon kommt insbesondere ihre Klassifizierung als intelligente Assistenzsysteme zum Tragen: Eingehende Aufträge werden direkt in die U-Zelle weitergeleitet und dort mit den mobilen Montageassistenten „verheiratet“. Im Sinne Cyber-Physischer Systeme führen die Montageassistenten folglich sämtliche Detailinformationen zum jeweiligen Auftrag mit sich führen. Über fest installierte Tablet-Computer können diese vom Mitarbeiter, wie in Abb. 31 dargestellt, eingesehen werden. Außerdem kann der mobile Assistent per Netzwerkverbindung mit den Regalen der U-Zelle kommunizieren und so dem Mitarbeiter über eine Pick-by-Light-Technologie im Sinne eines digitalen Poka Yoke (Vgl. Kapitel 4.6.2.3) erklären, welches Bauteil er wo zu montieren hat. Denkbar ist In Zukunft auch der Einsatz von Gestenbedienung oder einer Sprachsteuerung.^{614,615,616} Nach erfolgreicher Montage wird das Werkstück auf den nächsten Roboter verladen und zur nächsten U-Zelle, zur Lackieranlage oder zur Endkontrolle gebracht. Im Praxisbeispiel konnte die Montagezeit durch den Einsatz des mobilen Assistenzsystems um ca. 50% reduziert werden. Außerdem konnte die Anzahl möglicher Varianten, die in einer U-Zelle montiert werden können, um ein Vielfaches gesteigert werden.⁶¹⁷ Folglich lässt sich festhalten, dass der Einsatz mobiler Montageassistenten die Flexibilität und die Effizienz innerhalb von U-Zellen erhöht.⁶¹⁸

⁶¹⁴ Vgl. Soder, 2014, S.101.

⁶¹⁵ Vgl. „Industrie 4.0 und industrielle Wirklichkeit - Eine Frage der Prozesse“, 2015, S.1f.

⁶¹⁶ Vgl. „Mobile Assistenten - Die Vision von SEW-Eurodrive von der Industrie 4.0“, 2015, S.1.

⁶¹⁷ Vgl. „Industrie 4.0 - So sieht der Arbeitsplatz der Zukunft aus“, 2016, S.1.

⁶¹⁸ Vgl. Soder, 2014, S.101.

4.6.4.3 U-Zelle vs. Intelligente Transportsysteme

Intelligente Transportsysteme haben in der Smart Factory hauptsächlich die Funktion, die einzelnen Produktionsmodule, die nach dem U-Layout aufgebaut sein können (vgl. Kapitel 4.6.4.1), physisch zu vernetzen, da sie große Flexibilitätadvorteile gegenüber fest installierter Fördertechnik aufweisen (vgl. Kapitel 3.4.5). Ein konkretes Beispiel aus der Praxis, welches eine Möglichkeit für einen flexiblen Materialfluss zwischen U-Zellen aufzeigt, findet sich erneut in der Getriebefertigung der SEW-Eurodrive im Werk Graben-Neudorf.⁶¹⁹



Abb. 32: Logistik-Kapsel für den Transport von Zwischenprodukten und Material zu U-Zellen



Abb. 33: Bsp. für Transportfahrzeug zur Bestückung und Werkstückentnahme

Die in Abb. 32 veranschaulichten, als „Logistik-Kapseln“ bezeichneten FTS sind je nach Ausführung für den Transport der Zwischenprodukte inklusive aller verfügbaren Produktinformationen zwischen U-Zellen oder die Materialversorgung aus einem zentralen Lager zuständig.⁶²⁰ Sie sind fähig, an Ladestationen Energie in kurzer Zeit zu speichern und sich anschließend von den Hauptstrecken zu lösen, um sich frei durch den Raum zu bewegen und die Güter direkt und flexibel an die erforderlichen Stellen am Rand der U-Zellen zu transportieren. Dort können sie auch Serviceaufgaben, wie bspw. Umsetzvorgänge, übernehmen.⁶²¹ Zudem sind die Logistik-Kapseln untereinander vernetzt, sodass sie Transportaufträge untereinander koordinieren können.⁶²² Den U-Zellen lässt sich eine flexible Anzahl an Logistik-Kapseln zuordnen. Außerdem lassen sich mögliche, virtuell abgebildete Streckenverläufe mithilfe einer Software aktualisieren.⁶²³ Dank der Ausrüstung einiger speziell entwickelter Transportfahrzeuge mit einem Greifarm (s. Abb. 33),

⁶¹⁹ Vgl. Soder, 2014, S.100.

⁶²⁰ Vgl. Fragner, 2015, S.76.

⁶²¹ Vgl. „Industrie 4.0 und industrielle Wirklichkeit - Eine Frage der Prozesse“, 2015, S.2.

⁶²² Vgl. Fragner, 2015, S.76.

⁶²³ Vgl. Soder, 2014, S.98.

können diese sogar die Bestückung der mobilen Montageplattform am Startpunkt und die Entnahme des Werkstücks am Ende der U-Zelle vornehmen.⁶²⁴ Der Grundsatz, U-Zellen mit Material und Zwischenprodukte von außen zu beliefern (vgl. Kapitel 2.3.4.5)⁶²⁵, bleibt somit auch beim Einsatz intelligenter Transportsysteme bestehen.

Folglich werden die flexiblen Strukturen, die durch U-Zellen entstehen, von intelligenten Transportsystemen, die den Materialfluss regeln, maßgeblich unterstützt. Innerhalb von U-Zellen wird es hingegen begrenzte Anwendungsmöglichkeiten für mit Schwarmintelligenz ausgestattete Transportsysteme geben. Kernfunktion der in Kapitel 3.6.5.2 vorgestellten mobilen Montageplattform, welche auch den Transport innerhalb der U-Zelle übernimmt, ist die Assistenzfunktion für den Werker und nicht die Flexibilisierung des Materialflusses, weshalb dessen Zuordnung zum Technologieparadigma des intelligenten Assistenzsystems erfolgte.

4.6.4.4 Bewertung

Wie bereits erläutert, können prozessrelevante Daten, welche intelligente Produkte mit sich führen, zu einer Prozessverbesserung bspw. hinsichtlich der Realisierung eines One Piece Flow oder eines digitalen Poka Yoke beitragen. Diese Konzepte finden mitunter auch Anwendung innerhalb einer U-Zelle. Da es abgesehen von diesen indirekten Verknüpfungen jedoch keine konkreten Überschneidungen zwischen intelligenten Produkten und dem Konzept der U-Zelle gibt, wird an dieser Stelle von einer Bewertung abgesehen (keine Bewertung).

Intelligente Produktionsmodule, die nach den Prinzipien einer U-Zelle aufgebaut sind, können die geforderte Flexibilität von Industrie 4.0 hinsichtlich der Maschinen und insbesondere des eingesetzten Personals erfüllen. Der Ansatz der U-Zelle kann durch eine echtzeitnahe, selbstorganisierte Steuerung des Personaleinsatzes sogar noch optimiert werden. Diese stellt Mitarbeitergruppen nach erforderlichen Kapazitäten zusammen oder glättet schwankende Bearbeitungszeiten durch flexible Aufgabenzuteilung. U-Zellen und intelligente Produktionsmodule ergänzen sich daher perfekt (3 Punkte).

⁶²⁴ Vgl. „Lean Industrie 4.0 - Erfolgreich mit Werten und Menschen im Mittelpunkt“, S.1.

⁶²⁵ Vgl. Dombrowski/Mielke, 2015, S.104.

Intelligente Assistenzsysteme leisten ebenfalls ihren Beitrag zur Flexibilisierung und Effizienzerhöhung in U-Zellen. Sie können dort einerseits für eine vereinfachte Koordination im Rahmen eines flexiblen Personaleinsatzes sorgen. Andererseits können sie in Form von mobilen Montageassistenten zur Unterstützung des Mitarbeiters im Rahmen eines mitarbeitergebundenen Arbeitsflusses eingesetzt werden. Dies wird als gute Ergänzung gewertet (2 Punkte).

Schließlich kann festgehalten werden, dass die flexiblen Strukturen, welche durch U-Zellen entstehen, durch den Einsatz intelligenter Transportsysteme maßgeblich unterstützt werden. Sie regeln den Materialfluss zwischen den Zellen und nehmen ggf. Umsetzungsvorgänge oder die Bestückung und Werkstückentnahme an den Schnittstellen der U-Zelle vor. Innerhalb der U-Zellen hat die Schwarmintelligenz intelligenter Transportsysteme jedoch keinen Mehrwert. U-Zellen und intelligente Transportsysteme werden daher immerhin als stark kompatibel eingestuft (2 Punkte).

5 Schlussbetrachtung

5.1 Ergebnisse

Die systematische Analyse und Bewertung der Kompatibilität zwischen den Lean-Werkzeugen und den Technologieparadigmen der Smart Factory haben gezeigt, inwiefern die zugehörigen Werkzeuge der Lean Production durch die Einführung des technologischen Ansatzes der Industrie 4.0 beeinflusst werden, in welchen Fällen, auf welche Art und Weise und mit welchem Nutzen sie sich vereinen lassen oder an welcher Stelle etwaige Widersprüche bestehen. Die Ergebnisse lassen sich in der in Tab. 1 dargestellten Kompatibilitäts-Matrix zusammenfassen.

Lean Production \ Industrie 4.0		Intelligentes Produkt	Intelligente Maschinen	Intelligente Assistenzsysteme	Intelligente Transportsysteme
		Streben nach Perfektion	Kaizen		
Flussorientierung	Taktzeit	-			
	One Piece Flow				
	Kanban				
	Milkrun				
	SMED				
Jidoka	Andon	-			-
	Poka Yoke				-
	TPM	-			-
	U-Zelle	-			

Tab. 2: Kompatibilitäts-Matrix zwischen Lean-Werkzeugen und Industrie 4.0-Technologieparadigmen

In der Gesamtsicht zeigt die Matrix für die Technologieparadigmen (vertikal) folgende Ergebnisse:

Das Technologieparadigma des intelligenten Produkts hat – abgesehen von denen als irrelevant angesehenen Kombinationsmöglichkeiten – für alle betrachteten Lean-Werkzeuge positive Auswirkungen. Hier wurden jeweils mindestens 2 von 3 Punkten vergeben. Die größten Potenziale bieten intelligente Produkte dieser Analyse nach für das Prinzip der Flussorientierung, während konkretes Optimierungspotenzial im Rahmen von Jidoka nur an einer Stelle ersichtlich wurde.

Das Technologieparadigma der Intelligenten Maschine konnte ausnahmslos allen Lean-Werkzeuge gegenübergestellt werden. Es ergab sich lediglich ein krasser Gegensatz zum Konzept der festen Taktzeit. Die größten Potenziale durch den Einsatz von Industrie 4.0-Technologien werden für SMED, Andon und U-Zellen gesehen. Insgesamt wird Jidoka durch den Einsatz intelligenter Maschinen gut ergänzt, während sich für das Prinzip der Flussorientierung eine leichte bis mittlere Kompatibilität zeigt.

Intelligente Assistenzsysteme zur kontextsensitiven Unterstützung der Mitarbeiter zeigen die stärkste Kompatibilität aller Technologieparadigmen mit den Lean-Werkzeugen. Das Technologieparadigma konnte ausnahmslos mit allen Lean-Werkzeugen kombiniert werden. Im Minimum ergaben sich hier 2 von 3 möglichen Punkten. Die größte Kompatibilität wurde mit Kaizen, Andon, Poka Yoke und TPM festgestellt. Demnach wurden drei von vier betrachteten Jidoka-Elementen mit voller Punktzahl bewertet. Im Vergleich dazu fiel die Kompatibilität zum Prinzip der Flussorientierung etwas niedriger aus.

Schließlich konnten hinsichtlich intelligenter Transportsysteme die wenigsten Vergleiche – nur 6 von 10 Kombinationsmöglichkeiten – angestellt werden. Auffällig, aber aufgrund der logistischen Funktion intelligenter Transportsysteme durchaus logisch ist die Tatsache, dass sich Gegenüberstellungen mit Lean-Werkzeuge fast ausnahmslos auf das logistische Prinzip der Flussorientierung bezogen. Hier ergaben sich zwei starke Widersprüche zu den Konzepten Taktzeit und Milkrun. Außerdem erhielt keine Kombination aus Lean-Werkzeug und Technologieparadigma die volle Punktzahl.

Aus der Perspektive der einzelnen Lean-Werkzeuge (horizontal) können folgende Ergebnisse zusammengefasst werden:

Das Konzept der festen Taktzeit wird im Rahmen der Smart Factory aufgrund der mangelnden Flexibilität den größten Widerstand erfahren. Insgesamt wurden nur 2 von 9 möglichen Punkten vergeben. Die zweitgeringste Bewertung erhielt das Milkrun-Konzept, gefolgt von der Kanban-Systematik.

Im Gegensatz dazu wurde die stärkste Kompatibilität bei Andon-Systemen ausgemacht, die eine Weiterentwicklung im Rahmen der Smart Factory erfahren werden. Fast in gleichem Maße wird das TPM-Konzept von der Einführung der Technologieparadigmen profitieren, gefolgt von Kaizen, Poka Yoke und dem Konzept der U-Zelle.

Dies zeigt, dass abgesehen von dem zentralen Prinzip des Strebens nach Perfektion, welches durch Kaizen verfolgt wird, insbesondere das Prinzip Jidoka vom Einsatz intelligenter Technologien positiv beeinflusst wird. Effizienzgewinne werden sich in vielerlei Hinsicht auch für das Prinzip der Flussorientierung ergeben.

Abschließend lässt sich festhalten, dass 66 von 96 Punkte, also ca. 69% der möglichen Gesamtpunktzahl in der Kompatibilitäts-Matrix vergeben wurden. Im Durchschnitt kann daher eine Kompatibilität zwischen Lean Production und Industrie 4.0 festgestellt werden.

5.2 Fazit

Die Ergebnisse der Kompatibilitäts-Matrix haben gezeigt, dass die Kombination der beiden Ansätze in vielen Fällen vorteilhaft sein kann. Mehrheitlich ergänzen die Technologieparadigmen von Industrie 4.0 die Werkzeuge der Lean Production oder stellen Weiterentwicklungen dar. Die Analysen lassen folgendes Fazit zu:

Grundsätzlich wurde festgestellt, dass neben dem übergeordneten Ziel von Lean Production, Verschwendungen zu vermeiden, grundsätzlich auch das Setzen von Standards, die wichtige Rolle der Mitarbeiter sowie die Orientierung am Kundenwunsch im Rahmen von Industrie 4.0 weiterhin verfolgt werden (vgl. Kapitel 4.2). Das Prinzip des Strebens nach Perfektion – repräsentiert durch Kaizen – wird

im Rahmen von Industrie 4.0 weiterhin als relevant erachtet und es ist von der Entwicklung neuer Möglichkeiten hinsichtlich des Detaillierungsgrads und der Umsetzung von KVP-Projekten auszugehen (vgl. Kapitel 4.4). Daraus kann gefolgert werden, dass die Lean-Ziele sowie die Prinzipien des Strebens nach Perfektion, der Kundenorientierung, Mitarbeiterorientierung und Standardisierung eine Grundlage für die nachhaltige Umsetzung der Industrie 4.0-Vision darstellen. Diese Feststellungen decken sich mit dem Konsens der Teilnehmer des 62. Frühjahrskongresses der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, in dessen Verlauf der Einfluss der Industrie 4.0 auf die Lean Production diskutiert wurde⁶²⁶.

Die Ausführungen in Kapitel 4.6 lassen darauf schließen, dass die ursprüngliche Idee von Jidoka, Maschinen mit einem System auszustatten, welches den Fertigungsprozess bei eintretenden Problemen autonom stoppt, in der Smart Factory zur Realität wird. Andon-Systeme werden dank eines selbststeuernden Fehlermanagements und einer Verbesserung der Visualisierung von Qualitätsproblemen durch Industrie 4.0-Technologien optimiert (vgl. Kapitel 4.6.1). Der Einsatz intelligenter Assistenzsysteme ermöglicht ein digitales Poka Yoke zur Vermeidung von Fehlern durch menschliche Fehlhandlungen (vgl. Kapitel 4.6.2). Intelligente Maschinen werden die vorausschauende Instandhaltung durch Predictive Maintenance perfektionieren während Werker mittels Augmented-Reality-Technologien durch Instandhaltungstätigkeiten geführt werden können (vgl. Kapitel 4.6.3). Zudem werden die Potenziale eines flexiblen Personaleinsatzes und eines mitarbeitergebundenen Arbeitsflusses in Produktionsmodulen, die nach dem U-Layout gestaltet sind, erhöht (vgl. Kapitel 4.6.4). Daraus kann abgeleitet werden, dass das qualitätsorientierte Jidoka-Prinzip eine Weiterentwicklung durch Industrie 4.0 erfahren wird. Dieser Meinung deckt sich mit jener von Dombrowski/Richter/Ebentreich.⁶²⁷

Bezüglich des Prinzips der Flussorientierung kann zunächst konstatiert werden, dass die SMED-Methode und das Konzept des One-Piece-Flow eine wichtige Rolle in der Zukunft der Produktion spielen und durch den Einsatz von Industrie 4.0-Technologien optimiert werden können. Im Rahmen von SMED können externe und interne Rüstzeiten verkürzt und besser aufeinander abgestimmt werden (vgl. Kapitel

⁶²⁶ Vgl. „Industrie 4.0 vernichtet die Routinearbeit in Deutschland nicht“, 2016, S.1.

⁶²⁷ Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015b, S.160.

4.5.5), während sich das Konzept des One Piece Flow mit dem Ziel der Durchlaufzeitenminimierung in der Smart Factory durchgehend realisieren lässt. Innerhalb der einzelnen Produktionsmodule ist sogar die vollständige Eliminierung von Pufferbeständen im Rahmen des One Piece Flow möglich (vgl. Kapitel 4.5.2).

Auch die als weniger stark kompatibel eingestuften, flussorientierten Konzepte Taktzeit, Kanban und Milkrun können grundsätzlich durch den Einzug der IKT in die Produktion effizienter gestaltet werden. Bisher nicht eliminierbare Verschwendungen in diesen Konzepten (insbesondere Bestände, Transporte, Wartezeiten) können dank der Verschmelzung der realen und virtuellen Welt im Internet der Dinge und der echtzeitnahen Kommunikation der intelligenten Produktionsfaktoren aufgespürt und weiter reduziert werden. Dies geschieht durch eine Erhöhung von Transparenz, Sicherheit und Reaktionsschnelligkeit der Prozesse sowie durch Visualisierung wichtiger Prozessinformationen für den Mitarbeiter mittels Assistenzsystemen (vgl. Kapitel 4.5.1, Kapitel 4.5.3, Kapitel 4.5.4).

An dieser Stelle schließt die Betrachtung zur Kompatibilität zwischen Lean Production und Industrie 4.0 in der Literatur häufig ab. Dombrowski/Richter/Ebentreich sprechen lediglich von einer Optimierung der Flussorientierung oder einer Unterstützung des Pull-Prinzips am Beispiel von e-Kanban durch Industrie 4.0.⁶²⁸ Lanza et al. heben hervor, dass „verständlich dargestellte und aufbereitete Transparenz auf dem Shopfloor z.B. durch digitales Kanban oder digitales Poka-Yoke [...] einzigartige Mensch-Maschine-Zusammenarbeit“⁶²⁹ ermöglichen. Weiterhin sind sie davon überzeugt, dass „echtzeitnahe Abbilder des Status der Fabrik [...] das Heben von Potenzialen [erlauben], die bisher durch ganzheitliche Produktionssysteme nach dem Toyota-Prinzip zwar beschrieben, aber nicht gänzlich aufgespürt werden konnten“⁶³⁰. Frank fasst zusammen, dass CPS „eine vielversprechende Möglichkeit [darstellen], die Potenziale etablierter Lean-Methoden weiter zu steigern“.⁶³¹ Durch ein Ergänzung und Erweiterung der Lean-Werkzeuge mit Industrie 4.0-Lösungen soll eine Leistungssteigerung dort erreicht werden, wo heutige Lean-Werkzeuge an ihre

⁶²⁸ Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015b, S.160.

⁶²⁹ Lanza et al., 2014, S.66.

⁶³⁰ Lanza et al., 2014, S.66.

⁶³¹ Frank, 2014, S.17.

Grenzen stoßen.⁶³² Dieser Aussage folgend kommen Experten zu dem Schluss, dass sich Industrie 4.0 und Lean Production unterstützen⁶³³, ergänzen⁶³⁴ bzw. in keinem Widerspruch zueinander stehen⁶³⁵. Die Erkenntnisse dieser Arbeit lassen jedoch darauf schließen, dass diese Behauptung nicht allen Fällen zutrifft.

Kaspar/Schneider erkennen, dass bei Industrie 4.0 und Lean Production „die Vorgehensweise und die Mittel teilweise andere“⁶³⁶ sind, während Bauernhansl anmerkt, dass es zwar neue Werkzeuge bei der Gestaltung der Produktion geben werde, die Smart Factory aber auf dem klassischen TPS aufbaue⁶³⁷. Allerdings fehlten bisher Konkretisierungen dieser Aussagen. Bezüglich des Prinzips der Flussorientierung sprechen Roy/Mittag/Baumeister lediglich an, dass „die Notwendigkeit einer Pull-Produktion zu diskutieren sein wird“⁶³⁸.

Die vorliegende Arbeit hat diesen Diskussionspunkt genauer analysiert. Es wurde festgestellt, dass die flussorientierten Lean-Werkzeuge Taktzeit, Kanban und Milkrun bei sich ändernden Rahmenbedingungen hin zu einer Mass Customization an ihre Grenzen stoßen werden (vgl. Kapitel 4.1). Im Rahmen von Industrie 4.0 sollen zunächst passiv intelligente, später aktive, cyber-physische Produktionsressourcen dazu beitragen, die steigende Komplexität zu beherrschen und die höheren Flexibilitätsanforderungen an die Produktion zu erfüllen. Der Steuerungsansatz in der Smart Factory ist dezentral, selbstgesteuert und situationsbasiert. Dies soll individuelle, optimale Wege für jede Produktvariante und somit eine wirtschaftliche Fertigung hoher Variantenzahlen bis hin zu kundenindividuellen Produkten trotz hoher Stückzahlschwankungen ermöglichen (vgl. Kapitel 3.1.1, Kapitel 3.2.2). Anstelle einer festen, für alle Prozesse als Schrittmacher geltenden Taktzeit soll ein dynamischer Takt rücken, der sich situations- und kapazitätsabhängig für einzelne Produktionsmodule anpasst (vgl. Kapitel 4.5.1). Die fixen Prozessreihenfolgen im Rahmen von Kanban müssen aufgelöst werden, wenn intelligente Maschinen situativ darüber verhandeln, wo einzelne Produkte gefertigt werden. Zusätzlich widerspricht die Explosion der Variantenvielfalt dem Einsatz von Kanban. Unternehmen, die dann

⁶³² Vgl. Frank, 2014, S.17.

⁶³³ Vgl. Dombrowski/Richter/Ebentreich, 2015a, S.56.

⁶³⁴ Vgl. Kaspar/Schneider, 2015, S.20.

⁶³⁵ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.19.

⁶³⁶ Kaspar/Schneider, 2015, S.20.

⁶³⁷ Vgl. Bauernhansl, 2014, S.19.

⁶³⁸ Roy/Mittag/Baumeister, 2015, S.29.

weiter auf Kanban-Systeme setzen, werden es entweder schwer haben, Bestände auf einem wirtschaftlichen Niveau zu halten oder die rechtzeitige Versorgung der einzelnen Produktionsmodule sicherzustellen (vgl. Kapitel 4.5.3). Schließlich ist auch das Milkrun-Konzept, selbst im Falle einer bedarfsorientierten Steuerung, nicht für extreme Schwankungen in den Materialverbräuchen geeignet, die mit einer situationsbasierten Produktionssteuerung einhergehen (vgl. Kapitel 4.5.4). Dies zeigt, dass insbesondere die Anforderungen des Marktes entscheidend für ein effizientes Zusammenspiel der flussorientierten Lean-Werkzeuge und den Technologieparadigmen von Industrie 4.0 sein werden.

5.3 Abschließende Empfehlungen

Ausgehend von den Schlussfolgerungen im Fazit wird, vergleichbar mit den Ausführungen von Soder und Kaspar/Schneider empfohlen, auf dem Weg zur Smart Factory zunächst wertschöpfungsorientierte, verschwendungsfreie und motivierende Arbeitsabläufe mithilfe von Lean Production zu gestalten und diese anschließend mit intelligenten Industrie 4.0-Technologien anzureichern.⁶³⁹ Dieses Vorgehen soll verhindern, dass unzureichend aufeinander abgestimmte und ineffiziente Prozesse automatisiert und digital unterstützt werden, im Endeffekt aber ineffizient bleiben. Folglich gelten die Grundsätze „erst organisieren, dann investieren“ bzw. „erst Prozess dann Technik“. Denn Industrie 4.0 darf keinem Selbstzweck dienen, sondern soll vielmehr eine Hilfestellung für den Umgang mit Komplexität sein.⁶⁴⁰ Lean Production schafft folglich eine hervorragende Grundlage zur Einführung von Industrie 4.0. Soders Aussage „Wer beim Thema Lean nicht seine Hausaufgaben gemacht hat, ist auch mit Industrie 4.0 nicht erfolgreich“⁶⁴¹, ist daher als grundsätzlich richtig zu bewerten.

Wie die vorliegende Arbeit gezeigt hat, können diese Aussagen jedoch nicht abschließend sein. Die Schlussfolgerungen dieser Arbeit bezüglich des Zusammenspiels von Lean Production und Industrie 4.0 erlauben zusätzliche Empfehlungen. Demnach sollten Unternehmen darüber nachdenken, sich von den klassischen flussorientierten Konzepten Taktzeit, Kanban und Milkrun zu lösen, wenn deren Anwendung bei steigenden Anforderungen an Flexibilität und Komplexität im

⁶³⁹ Vgl. Soder, 2014, S.101f.

⁶⁴⁰ Vgl. Kaspar/Schneider, 2015, S.18.

⁶⁴¹ „Industrie 4.0: Logistik und Produktion sind bereits mittendrin“, 2015, S.1.

Zuge einer Mass Customization nicht mehr den gewünschten Nutzen bringt. Das Ziel sollte dann der Einsatz neuer Ansätze wie eine Flexibilisierung der Taktzeit, eine situationsbasierte Produktionssteuerung oder intelligente Transportsysteme sein, die zu Zeiten der Entwicklung von Lean Production aufgrund der Begrenzung auf einfache Mittel und einer damit verbundenen Komplexitätsreduzierung noch undenkbar waren. Da Industrie 4.0-Anwendungen häufig mit hohen Investitionskosten verbunden sind, sollte jedoch stets die Kosten-Nutzen-Relation berücksichtigt werden.

5.4 Ausblick

Wie die Beispiele aus der Unternehmens- und Forschungspraxis gezeigt haben, sind die beschriebenen Entwicklungen weniger Zukunftsmusik als sie im ersten Moment erscheinen. Dennoch befindet sich das produzierende Gewerbe noch am Anfang der Vision von Industrie 4.0. Noch fehlt die breite Basis hinsichtlich informationstechnischer Standards zur flächendeckenden Einführung von Industrie 4.0. Umso wichtiger ist es für Unternehmen, sich nun zu fragen, ob die eigenen Prozesse bereits lean gestaltet sind und wie der eigene Industrie 4.0-Integrationsgrad ist.⁶⁴² Inwiefern die skizzierten Annahmen, auf denen die Aussagen und Bewertungen dieser Arbeit beruhen, tatsächlich real werden, wird im Rahmen weiterer Nachforschungen zu überprüfen sein.

In diesem Zusammenhang ist fraglich, inwieweit sich die Auswirkungen von Industrie 4.0 tatsächlich von denen des CIM-Ansatzes unterscheiden werden. Wird der Mensch weiterhin eine zentrale Rolle in der Smart Factory einnehmen oder wird er früher oder später gänzlich von Cyber-Physischen Systemen abgelöst, wie es Negativszenarien befürchten lassen?⁶⁴³ Wird der Mensch in Zukunft weiterhin auch manuelle Tätigkeiten ausführen oder wird er irgendwann ausschließlich zum überwachenden, nur im Notfall eingreifenden Akteur? Wie würde sich eine solche Entwicklung auf den Arbeitsmarkt auswirken? Kann der mitarbeiterzentrierte Ansatz der Lean Production dann weiterhin als Basis zur Einführung von Industrie 4.0 eingesetzt werden? Die Beispiele haben gezeigt, dass Industrie 4.0 durchaus mit

⁶⁴² Vgl. Bick, 2014, S.47.

⁶⁴³ Vgl. „Lean Industrie 4.0: Erfolgreich mit Werten und Menschen im Mittelpunkt“, 2015, S.1.

Fokus auf den Menschen gestaltet werden kann. Es liegt nun an den Unternehmen, diese Vision umzusetzen.

Ferner ist davon auszugehen, dass lean organisierte Unternehmen abhängig von markt- und unternehmensspezifischen Anforderungen unterschiedlich auf die neuen Möglichkeiten im Bereich Industrie 4.0 reagieren werden. Diesbezüglich wird für solche Unternehmen bei der schrittweisen Einführung von Industrie 4.0 entscheidend sein, inwieweit sich die dargestellten Nutzen, bspw. in Sachen Flexibilität, Reaktionsschnelligkeit, Lieferzeitverkürzung oder Bestandsminimierung, auch bei abweichenden Rahmenbedingungen einstellen werden. Selbst bei einer erhöhten Variantenvielfalt oder Schwankungsbreite des Bedarfs könnte so das gültige Lean-Prinzip der Flussorientierung mit festen Prozessreihenfolgen gegenüber flexibel verketteten Produktionsmodulen in vereinzelt Prozessketten oder gar im ganzen Fertigungsprozess vorteilhaft sein und daher dort weiterhin zur Anwendung kommen. Unternehmen müssen zudem beachten, dass Investitionen in Richtung Industrie 4.0 mit hohen Kosten verbunden sein werden. Daher werden Unternehmen, für die sich bspw. eine situationsbasierte Produktionssteuerung, intelligente Transportsysteme oder dynamischen Taktzeiten nicht auszahlen, mitunter weiterhin auf Kanban, Milkruns und feste Taktzeiten setzen.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass im Rahmen dieser Arbeit die Lean-Werkzeuge in ihrer klassischen Ausprägung betrachtet wurden. Aufgrund unternehmensspezifischer Abwandlungen der Lean-Werkzeuge wird für jedes Unternehmen im Einzelfall zu beurteilen sein, welche Werkzeuge für eine Unterstützung durch Industrie 4.0-Technologien in Frage kommen, wie eine Kombination realisiert werden kann und welchen Nutzen dies mit sich bringt. Für unternehmensspezifische Einzelfälle wird daher empfohlen, im Rahmen praktischer Arbeiten konkretere Konzepte zur Integration von Industrie 4.0 in einer lean organisierten Fertigung zu entwickeln sowie die Kosten-Nutzen-Relation abzuwägen.

Der Vergleich zwischen Lean-Production und Industrie 4.0 im Rahmen dieser Arbeit wurde grundsätzlich auf das Produktionsumfeld beschränkt. Bei einer Vernetzung der gesamten Wertschöpfungskette wird es weitere Potenziale zur Vermeidung von Verschwendungen und somit zur Effizienzerhöhung geben. So könnte in einer

weiteren Arbeit bspw. das in dieser Arbeit nicht betrachtete Lean-Konzept der Just-in-Time-Anlieferungen im Industrie 4.0-Kontext betrachtet werden.

Abschließend ist anzumerken, dass es in den nächsten Jahren viele weitere Innovationen auf dem Gebiet Industrie 4.0 geben wird. Daher können weitere Synergien oder Widersprüche zu Lean-Elementen in Zukunft nicht ausgeschlossen werden. Auch an dieser Stelle könnten weitere Untersuchungen ansetzen.

Quellen der Tabellen und Abbildungen

Tab. 1: Bewertungsschema der Kompatibilitätsmatrix: Eigene Darstellung.

Tab. 2: Kompatibilitäts-Matrix zwischen Lean-Werkzeugen und Industrie 4.0-Technologieparadigmen: Eigene Darstellung.

Abb. 1: Das TPS-Haus: Eigene Darstellung, in Anlehnung an unterschiedliche Versionen, Bsp. S. Anhang S.XXXVIII.

Abb. 2: KVP im PDCA-Zyklus: Dombrowski, U./Mielke, T.: Gestaltungsprinzipien Ganzheitlicher Produktionssysteme, in: Dombrowski, U./Mielke, T. (Hrsg): Ganzheitliche Produktionssysteme - Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen, Berlin Heidelberg (Springer Verlag), 2015, S.53.

Abb. 3: Grundprinzip des One Piece Flow im Vergleich zur konventionellen Losproduktion: Eigene Darstellung.

Abb. 4: Grundprinzip eines Kanban-Systems: Schuh, G.: Produktionsmanagement II, o.J., http://www.wzl.rwth-aachen.de/de/7ab8e31a4ca7f394c1256fb700481ac7/pm_ii_v5.pdf (18.06.2016), S.15.

Abb. 5: Schritte zur Realisierung von SMED: Dombrowski, U./Mielke, T.: Gestaltungsprinzipien Ganzheitlicher Produktionssysteme, in: Dombrowski, U./Mielke, T. (Hrsg): Ganzheitliche Produktionssysteme - Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen, Berlin Heidelberg (Springer Verlag), 2015, S.105.

Abb. 6: Die fünf Säulen des TPM-Konzepts: Dombrowski, U./Mielke, T.: Gestaltungsprinzipien Ganzheitlicher Produktionssysteme, in: Dombrowski, U./Mielke, T. (Hrsg): Ganzheitliche Produktionssysteme - Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen, Berlin Heidelberg (Springer Verlag), 2015, S.43.

- Abb. 7: Industrielle Revolutionen: L-mobile solutions GmbH & Co. KG: Was ist Industrie 4.0?, o.J., <https://industrie40.l-mobile.com/komponenten/geschichte-industrie-4-0/> (18.06.2016).
- Abb. 8: Darstellung einer Smart Factory: Gunther, R.: Industrie 4.0 auf dem betrieblichen Hallenboden, Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWB), 2015, http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-3563863.pdf (18.06.2016), S.9.
- Abb. 9: Auflösung der Automatisierungspyramide durch CPS: L-mobile solutions GmbH & Co. KG: Was ist Industrie 4.0?, o.J., <https://industrie40.l-mobile.com/komponenten/geschichte-industrie-4-0/> (18.06.2016).
- Abb. 10: Entwicklungsstufen intelligenter Produkte: Engelhardt, P.R.: System für die RFID-gestützte situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage, München (Herbert Utz-Verlag), 2015, S.41.
- Abb. 11: Lose verkettete autonome Produktionsmodule: Bauernhansl, T.: Die Vierte Industrielle Revolution – Smart Production 4 Automotive, Fraunhofer IML, 2015, http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-3664835.pdf (04.05.2016), S.19.
- Abb. 12: Bsp. für autonome Fördertechnikmodule: Eigene Darstellung in Anlehnung an Günther, W./Klenk, E./Tenerowicz-Wirth, P.: Adaptive Logistiksysteme als Wegbereiter der Industrie 4.0, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014, S.304, aus <https://www.knapp.com/images/user/536.jpg>; <http://claudesettele.ch/wpset/wp-content/uploads/2016/01/Autostore-grid1080-1024x573.png>; <http://lanfer-automation.de/typo3temp/pics/255199eac2.jpg>;

http://www.ifl.kit.edu/download/forschungsprojekte/flex/Netzwerk_aus_realen_FlexF%C3%B6rderern.jpg (18.06.2016).

Abb. 13: Bsp. für autonome Transportfahrzeuge: Eigene Darstellung in Anlehnung an Günther, W./Klenk, E./Tenerowicz-Wirth, P.: Adaptive Logistiksysteme als Wegbereiter der Industrie 4.0, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014, S.304f., [aus
 http://raffaello.name/wp-content/uploads/2013/09/kiva_systems_01.jpg](http://raffaello.name/wp-content/uploads/2013/09/kiva_systems_01.jpg);
http://www.iml.fraunhofer.de/content/dam/iml/de/images/OE%20130%20Autonome%20Transportsysteme/Produkte/ZFT-Halle_FlashThumbnail.jpg; Bauernhansl, 2015, S.22; https://share.sew-eurodrive.de/media/share/images/highres/de_mecm_AGV_3030_07.jpg (18.06.2016).

Abb. 14: Geeignete Fertigungstypen der Lean Production: Lean Production als Produktionskonzept für die Unikat- und Einzelfertigung, in: Specht (Hrsg.): Weiterentwicklung der Produktion, Wiesbaden (Gabler Verlag), 2009, S.37.

Abb. 15: Reduzierung von Medienbrüchen als zusätzliches Optimierungsziel durch Industrie 4.0: Schlick, J./Stephan, P./Loskyll, M./Lampe, D.: Industrie 4.0 in der praktischen Anwendung, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014, S.77.

Abb. 16: Komplexitätsreduzierung durch Assistenzsysteme an den Grenzen von Lean Production: Hofmann, J.: Intelligente Vernetzung von Fertigungsbetrieben, o.J., https://www.duesseldorf.ihk.de/blob/dihk24/Industrie_Innovation_Umweltschutz/downloads/2593348/5cbc0101bb45f159c9bab49b5db0eb9e/V5_Petersberger_Industriedialog_2014_020714_Hofmann-data.pdf (18.06.2016), S.14.

- Abb. 17: Simulationsbasierte Entscheidungs-unterstützung durch intelligente Assistenzsysteme: Steinebach, M.: Auf der „Weltbühne der vernetzten Industrie“, 2016, <https://www.tu-chemnitz.de/tu/aktuelles/2015/1428578293-6545-0.jpg> (18.06.2016).
- Abb. 18: Optimierte Umsetzung des PDCA-Ablaufs: Dombrowski, U./Richter, T./Ebentreich, D.: Ganzheitliche Produktionssysteme und Industrie 4.0 - Ein Ansatz zur standardisierten Arbeit im flexiblen Produktionsumfeld, in: Industrie Management 31 (2015a) 3, S.55
- Abb. 19: Aufbau der Matrix Produktion: Greschke, P./Hermann, C.: Das Humanpotenzial einer taktunabhängigen Montage, in: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109 (2014) 10, S.688.
- Abb. 20: iBin der Firma Würth: o.A.: IBIN® STOCKS IN FOCUS - THE FIRST INTELLIGENT BIN, o.J., https://www.wuerth-industrie.com/web/en/wuerthindustrie/cteile_management/kanban/ibin_intelligenterbehaelter/ibin.php (18.06.2016).
- Abb. 21: inBin des Fraunhofer IML: ten Hompel, M.: Neue vernetzte Wege in der Logistik, Fraunhofer IML, 2013, http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-2760567.pdf, (18.06.2016), S.23.
- Abb. 22: Kombination aus inBin und zellularen Transportfahrzeugen: ten Hompel, M./Kirsch, C./Kirks, T.: Zukunftspfade der Logistik – Technologien, Prozesse und Visionen zur vierten industriellen Revolution, in: Schuh, G./Stich, V. (Hrsg.): Enterprise-Integration. Auf dem Weg zum kollaborativen Unternehmen, Berlin Heidelberg (Springer Vieweg), 2014, S.209.
- Abb. 23: Einsatzmöglichkeiten von Tablet-Computer und Pocket-Scanner im Rahmen eines Milkruns: Urbane Produktion bei WITTENSTEIN, o.J., http://wp12434357.server-he.de/fileadmin/rueckblick/Vortrag_Stephan_Wittenstein_final.pdf (18.06.2016), S.12.

Abb. 24: Eingesetztes intelligentes Transportsystem zur Realisierung des Injektionsprinzips: Kaspar, S./Schneider, M.: Lean und Industrie 4.0 in der Intralogistik -Effizienzsteigerung durch Kombination der beiden Ansätze, in: productivity 20 (2015) 5, S.18.

Abb. 25: Nach dem Injektionsprinzip gestalteter Fertigungsbereich: Kaspar, S./Schneider, M.: Lean und Industrie 4.0 in der Intralogistik - Effizienzsteigerung durch Kombination der beiden Ansätze, in: productivity 20 (2015) 5, S.19.

Abb. 26: Bsp. für Pick-by-Light- und Put-to-Light-Technologie: Riexinger, G.: Grünes Licht für nächsten Montageschritt, in: interaktiv - Das Kundenmagazin des Fraunhofer IPA (2015) 2, S.35.

Abb. 27: Bsp. für Pick-by-Vision-Technologie: Dickmann, Schlanke Materialfluss – mit Lean Production, Kanban und Innovationen, 2. Auflage, Berlin Heidelberg (Springer Verlag), 2009, S.460.

Abb. 28: Ressourcen-Cockpit zur Unterstützung des Instandhaltungsprozesses: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Zukunftsprojekt Industrie 4.0, o.J., <https://www.bmbf.de/de/zukunftsprojekt-industrie-4-0-848.html> (18.06.2016).

Abb. 29: Bsp. für Instandhaltung mittels Augmented-Reality: Gunther, R.: Industrie 4.0 auf dem betrieblichen Hallenboden, Fraunhofer IWB, 2015, http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-3563863.pdf (18.06.2016), S.16.

Abb. 30: Bsp. für Einsatz eines mobilen Montageassistenten in U-Zelle: Soder, J: Use Case Production: Von CIM über Lean Production zu Industrie 4.0, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014, S.98

Abb. 31: Mobiler Montageassistent zur Visualisierung aller Auftragsinformationen: Herkommer, G.: Mobile Assistenten - Die Vision von SEW-Eurodrive von der Industrie 4.0, Computer & Automation XV

Online, 2015, <http://www.computer-automation.de/feldebene/antriebe/artikel/118265/> (18.06.2016), S.1.

Abb. 32: Logistik-Kapsel für den Transport von Zwischenprodukten und Material zu U-Zellen: Herkommer, G.: Mobile Assistenten - Die Vision von SEW-Eurodrive von der Industrie 4.0, Computer & Automation Online, 2015, <http://www.computer-automation.de/feldebene/antriebe/artikel/118265/> (18.06.2016), S.1.

Abb. 33: Bsp. für Transportfahrzeug zur Bestückung und Werkstückentnahme: Bauernhansl, T.: Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014, S.22.

Abb. 34: TPS-Haus nach Gerberich: Gerberich, T.: Lean oder MES in der Automobilzulieferindustrie - Ein Vorgehensmodell zur fallspezifischen Auswahl, Wiesbaden (Gabler Verlag), 2011, S.103.

Abb. 35: TPS-Haus nach Krallmann: o.A.: Lean Management - Der schlanke Denkansatz, o.J., <https://www.krallmann.com/de/lean-management.html> (18.06.2016).

Abb. 36: TPS-Haus nach Liker: Liker, J. K.: Der Toyota Weg: Erfolgsfaktor Qualitätsmanagement, München (Finanzbuch Verlag), 9. Auflage, 2014, S.65.

Abb. 37: TPS-Haus nach Albat: o.A.: Toyota Produktionssystem und Lean Manufacturing, o.J., <http://www.albat.biz/was-ist-lean/ursprung/lean-manufacturing-und-tps.html> (18.06.2016).

Literaturquellen

Bücher

Binner, H.F.: Prozessorientierte TQM-Umsetzung, 2. Auflage, München (Hanser Verlag), 2002.

Botthof, A./Hartmann, E. A.: Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0, Berlin Heidelberg (Springer Vieweg), 2015.

Black, J. R.: Lean Production - Implementing a World-class System, New York (Industrial Press), 2008.

Brühl, V.: Wirtschaft des 21. Jahrhunderts - Herausforderungen in der Hightech-Ökonomie, Wiesbaden (Springer Gabler), 2015.

Dickmann, Schlanker Materialfluss – mit Lean Production, Kanban und Innovationen, 2. Auflage, Berlin Heidelberg (Springer Verlag), 2009.

Engelhardt, P.R.: System für die RFID-gestützte situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage, München (Herbert Utz-Verlag), 2015.

Erlach, K.: Wertstromdesign - Der Weg zur schlanken Fabrik, 2. Auflage, Berlin Heidelberg (Springer Verlag), 2010.

Fandel, G./Dyckhoff, H./Reese, J.: Industrielle Produktionsentwicklung - Eine empirisch-deskriptive Analyse ausgewählter Branchen, Berlin Heidelberg (Springer Verlag), 1990.

Frison, A.: Impact of Industry 4.0 on Lean Methods: and the Business of German and Chinese Manufacturer in China (English Edition), Kindle Edition, Amazon Media EU S.à r.l., 2015.

Gerberich, T.: Lean oder MES in der Automobilzulieferindustrie - Ein Vorgehensmodell zur fallspezifischen Auswahl, Wiesbaden (Gabler Verlag), 2011.

- Günther, H.-O./Tempelmaier, H.: Produktion und Logistik, 8. Auflage, Berlin Heidelberg (Springer Verlag), 2009.
- Gorecki, P./Pautsch, P.: Lean Management, 2. Auflage, München, (Carl Hanser Verlag), 2011.
- Grabner, T.: Operations Management - Auftragserfüllung bei Sach- und Dienstleistungen, Heidelberg (Springer Verlag), 2012.
- Hartmann, E.H.: Erfolgreiche Einführung von TPM in nichtjapanischen Unternehmen, München (Münchner Verlagsgruppe GmbH), 1995.
- Huf, M./Maisch, K.: Lean-Production - Schlank, schnell, erfolgreich. das Bordbuch für die sofortige, praktische Umsetzung. Mit Maßnahmenplänen und Checklisten, 2. Auflage, Appenweier (Verlag Manager-Werkstatt), 1995.
- Imai, M.: Kaizen – der Schlüssel zum Erfolg der Japaner im Wettbewerb, 9. Auflage, Frankfurt (Ullstein Verlag), 1993.
- Kaminske, G. F./, Brauer, J.-P.: Qualitätsmanagement von A bis Z, 4. Auflage, München (Hanser Verlag), 2003.
- Groth, U./ Kammel, A.: Lean Management. Konzept - Kritische Analyse - Praktische Lösungsansätze, Wiesbaden (Gabler Verlag), 1994.
- Klaus, P./Krieger, W./Krupp, M.: Gabler Lexikon Logistik. Management logistischer Flüsse, 5. Auflage, Wiesbaden (Gabler Verlag), 2012.
- Klug, F.: Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Grundlagen der Logistik im Automobilbau, Berlin Heidelberg (Springer Verlag), 2010.
- Kaufmann, T.: Geschäftsmodelle in Industrie 4.0, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2015.
- Liker, J. K.: Der Toyota Weg: Erfolgsfaktor Qualitätsmanagement, München (Finanzbuch Verlag), 9. Auflage, 2014.

- Liker, J. K./Meier, D.: Praxisbuch. Der Toyota-Weg für jedes Unternehmen, 2. Auflage, München (FinanzBuch Verlag), 2008.
- Lödding, H.: Verfahren der Produktionsteuerung - Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration, Berlin Heidelberg (Springer Verlag), 2005.
- Monden, Y.: Toyota Production System, 3. Auflage, Norcross, Georgia (Engineering & Management Press), 1998.
- Müller, S.: Manufacturing Execution Systeme (MES) - Status Quo, zukünftige Relevanz und Ausblick in Richtung Industrie 4.0, Norderstedt (Books on Demand), 2015.
- Oehlich, M.: Wissenschaftliches Arbeiten und Schreiben - Schritt für Schritt zur Bachelor- und Master-Thesis in den Wirtschaftswissenschaften, Berlin Heidelberg (Springer Verlag), 2015.
- Piller, F.: Mass Customization - Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter, 2. Auflage, Wiesbaden (Deutscher Universitäts-Verlag), 2001.
- Pröbster, M.: Methodik zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien am Beispiel des Nutzfahrzeugbaus, München (Herbert-Utz Verlag), 2016
- Rothlauf, J.: Total Quality Management in Theorie und Praxis, 2. Auflage, München (Oldenbourg Verlag), 2004.
- Sendler, U.: Industrie 4.0 - Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM, Berlin Heidelberg (Springer Verlag), 2013.
- Shingo, S.: A Revolution in Manufacturing - The SMED System, New York (Productivity Press), 1985.
- Sondermann, J. P.: Poka Yoke - Prinzip und Techniken für Null-Fehler-Prozesse, München (Carl Hanser Verlag), 2013.

- Spengler, T./Volling, T./Rehkopf, S.: Zum Einsatz von Chaku-Chaku-Systemen in der Montage konsumentennaher Erzeugnisse - eine Fallstudie bei Rahmenauftragsfertigung, Heidelberg (Physica-Verlag), 2005.
- Syska, A.: Produktionsmanagement - Das A – Z wichtiger Konzepte und Methoden für die Produktion von heute, Wiesbaden (Gabler Verlag), 2006.
- Takeda, H.: Das synchrone Produktionssystem - Just-In-Time für das ganze Unternehmen, 6. Auflage, Landsberg (Verlag Moderne Industrie), 2009.
- Thonemann, U.: Operations Management - Konzepte, Methoden und Anwendungen, 2. Auflage, München (Pearson Studium), 2010.
- Vahrenkamp, R.: Produktionsmanagement, 6. Auflage, München (Oldenbourg Verlag), 2008.
- Wannenwentsch, H.: Integrierte Materialwirtschaft, Logistik und Beschaffung, 5. Auflage, Berlin Heidelberg (Springer Vieweg), 2014.
- Womack, J. P.: Lean solutions - Wie Unternehmen und Kunden gemeinsam Probleme lösen, Frankfurt am Main, New York (Campus-Verlag), 2006.
- Womack, J. P./Jones, D. T.: Lean Thinking - Ballast abwerfen, Unternehmensgewinn steigern, Frankfurt (Campus Verlag), 2004.
- Womack, J. P./Jones, D. T./Roos, D. (1992): Die zweite Revolution in der Autoindustrie - Konsequenzen aus der weltweiten Studie aus dem Massachusetts Institute of Technology, Frankfurt Main New York (Campus Verlag), 1992.
- Yagyu, S: Das synchrone Managementsystem - Wegweiser zur Neugestaltung der Produktion auf Grundlage des synchronen Produktionssystems, Heidelberg (mi-Fachverlag), 2007.
- Zäpfel, G.: Grundzüge des Produktions- und Logistikmanagements, 2. Auflage, München (Oldenbourg Verlag), 2001.

Aufsätze

- Bauernhansl, T.: Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.
- Becker, K.-D.: Arbeit in der Industrie 4.0 – Erwartungen des Instituts für angewandte Arbeitswissenschaft e.V., in: Botthof/Hartmann (Hrsg.), Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0, Berlin Heidelberg (Springer Vieweg), 2015.
- Bildstein, A.: Industrie 4.0-Readiness - Migration zur Industrie 4.0-Fertigung, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.
- Bochmann, L./Gehrke, L./Gehrke, N./Mertens, C./Seiss, O.: Innovative Konzepte einer sich selbstorganisierenden Fahrzeugmontage am Beispiel des Forschungsprojekts SMART FACE, in: Roth, A. (Hrsg.): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0 - Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis, Berlin Heidelberg (Springer Gabler), 2016.
- Bubeck, A./Gruhler, M./Reiser, U./Weißhardt, F.: Vom fahrerlosen Transportsystem zur intelligenten mobilen Automatisierungsplattform, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.
- Deuse, J./Weisner, K./Hengstebeck, A./Busch, F.: Gestaltung von Produktionssystemen im Kontext von Industrie 4.0, in: Botthof/Hartmann (Hrsg.), Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0, Berlin Heidelberg (Springer Vieweg), 2015.

- Dombrowski, U./Mielke, T.: Gestaltungsprinzipien Ganzheitlicher Produktionssysteme, in: Dombrowski, U./Mielke, T. (Hrsg.): Ganzheitliche Produktionssysteme - Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen, Berlin Heidelberg (Springer Verlag), 2015.
- Dombrowski, U./Schulze, S./Crespo Otano, I.: Instandhaltungsmanagement als Gestaltungsfeld Ganzheitlicher Produktionssysteme, in: Müller, Mandelartz (Hrsg.): Betriebliche Instandhaltung, Springer Science & Business Media, 2009.
- Fallenbeck, N./Eckert, C.: IT-Sicherheit und Cloud Computing, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.
- Fechter, T./Jaich, H./Glockner, C.: Fertigungsprozesse. Produkte fertigen und montieren, in: Skolaut, W. (Hrsg.): Maschinenbau - Ein Lehrbuch für das ganze Bachelorstudium, Berlin Heidelberg (Springer Vieweg), 2014.
- Feld, T./Hoffmann, M./Schmidt, R.: INDUSTRIE 4.0. Vom intelligenten Produkt zur intelligenten Produktion, in: Scheer, A.-W. (Hrsg.): Industrie 4.0 – Wie sehen Produktionsprozesse im Jahr 2020 aus?, IM EBOOKS, 2015, 2015.
- Gorecky, D./Loskyll, M.: Mensch-Maschine-Interaktion im Industrie 4.0-Zeitalter, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.
- Günther, W./Klenk, E./Tenerowicz-Wirth, P.: Adaptive Logistiksysteme als Wegbereiter der Industrie 4.0, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.
- Hartmann, D.: Lean Management - Beziehung Kunde/Hersteller. Toyotas Philosophie, in: RKW e.V. Lean Production (Hrsg.): Tragweite und Grenzen eines Modells, Düsseldorf (Tagungsband zum Workshop), 1992.

- Hartmann, E. A.: Arbeitsgestaltung für Industrie 4.0 - Alte Wahrheiten, neue Herausforderungen, in: Botthof/Hartmann (Hrsg.), Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0, Berlin Heidelberg (Springer Vieweg), 2015.
- Hoffmann, F.-J.: iBin – Anthropomatik schafft revolutionäre Logistik-Lösungen, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.
- Kagermann, H.: Chancen von Industrie 4.0 nutzen, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.
- Kagermann, H.: Produkt-Service Pakete und individuelle Fertigung - Die virtuelle Welt verschmilzt mit der realen Produktion, in: Scheer, A.-W. (Hrsg.): Industrie 4.0 – Wie sehen Produktionsprozesse im Jahr 2020 aus?, IM EBOOKS, 2015.
- Kaspar, S./Schneider, M.: Lean und Industrie 4.0 in der Intralogistik - Effizienzsteigerung durch Kombination der beiden Ansätze, in: productivity 20 (2015) 5, S.17-20.
- Kleinemeier, M.: Von der Automatisierungspyramide zu Unternehmenssteuerungsnetzwerken, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.
- Naumann, M./Dietz, T./Kuss, A.: Mensch-Maschine-Interaktion, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.
- Niggemann, O./Jasperneite J./Vodencarevic, A.: Konzepte und Anwendungsfälle für die intelligente Fabrik, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.

- Nyhuis, P./Mayer, J./Kuprat, T.: Die Bedeutung von Industrie 4.0 als Enabler für logistische Modelle - Vorteile von Industrie 4.0 durch die Verbesserung von Entscheidungsunterstützungen auf Grundlage logistischer Modelle, in: Kersten, W./Koller, H./Lödding, H. (Hrsg.): Industrie 4.0. Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern, Berlin (GITO Verlag), 2014.
- Paulus, T./Hauske, M: Pumpen und Armaturen im Umfeld von Industrie 4.0, in: Roth, A. (Hrsg.): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0 - Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis, Berlin Heidelberg (Springer Gabler), 2016
- Pötter, T./Folmer, J./Vogel-Heuser, B.: Enabling Industrie 4.0 – Chancen und Nutzen für die Prozessindustrie, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.
- Roth, A./Siepmann, D. Industrie 4.0 – Ausblick, in: Roth, A. (Hrsg.): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0 - Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis, Berlin Heidelberg (Springer Gabler), 2016.
- Scheer, A.-W.: 4.0 ist mit weitreichenden organisatorischen Konsequenzen verbunden!, in: Scheer, A.-W. (Hrsg.): Industrie 4.0 – Wie sehen Produktionsprozesse im Jahr 2020 aus?, IM EBOOKS, 2015, 2015.
- Schlick, J./Stephan, P./Loskyll, M./Lampe, D.: Industrie 4.0 in der praktischen Anwendung, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.
- Schließmann, A.: iProduction, die Mensch-Maschine-Kommunikation in der Smart Factory, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.

- Schöning, H./Dorchain, M.: Data Mining und Analyse, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.
- Schuh, G./Potente, T./Thomas, C./Hauptvogel, A.: Steigerung der Kollaborationsproduktivität durch Cyber-Physische Systeme, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.
- Siepmann, D.: Industrie 4.0 – Struktur und Historie, in: Roth, A. (Hrsg.): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0 - Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis, Berlin Heidelberg (Springer Gabler), 2016a.
- Siepmann, D.: Industrie 4.0 – Technologische Komponenten, in: Roth, A. (Hrsg.): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0 - Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis, Berlin Heidelberg (Springer Gabler), 2016b.
- Soder, J.: Use Case Production: Von CIM über Lean Production zu Industrie 4.0, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.
- Spath, D./Schlund, S./Gerlach S./Hämmerle, M./Krause, T.: Ausblick: Produktionsprozesse im Jahr 2030, in: Scheer, A.-W. (Hrsg.): Industrie 4.0 – Wie sehen Produktionsprozesse im Jahr 2020 aus?, IM EBOOKS, 2015.
- Specht, D./Stefanska, R.: Lean Production als Produktionskonzept für die Unikat- und Einzelfertigung, in: Specht (Hrsg.): Weiterentwicklung der Produktion, Wiesbaden (Gabler Verlag), 2009.
- Steegmüller, D./Zürn, M.: Wandlungsfähige Produktionssysteme für den Automobilbau der Zukunft, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-

Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.

ten Hompel, M./Henke, M.: Logistik 4.0, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.

ten Hompel, M./Kirsch, C./Kirks, T.: Zukunftspfade der Logistik – Technologien, Prozesse und Visionen zur vierten industriellen Revolution, in: Schuh, G./Stich. V. (Hrsg.): Enterprise-Integration. Auf dem Weg zum kollaborativen Unternehmen, Berlin Heidelberg (Springer Vieweg), 2014.

Verl, A./Lechler, A.: Steuerung aus der Cloud, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.

Vogel-Heuser, B.: Herausforderungen und Anforderungen aus Sicht der IT und der Automatisierungstechnik, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.

Wegener, D.: Industrie 4.0 – Chancen und Herausforderungen für einen Global Player, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.

Zeitschriften

Bick, W.: Warum Industrie 4.0 und Lean zwingend zusammengehören, in: VDI-Z 156 (2014) 11, S. 46-47.

Bochmann, L./Gehrke, L./Bockenamp, A./Weichert, F./Albersmann, R./Prasse, C./Mertens, C./Motta, M./Wegener, K.: Towards Decentralized Production: A Novel Method to Identify Flexibility Potentials in Production Sequences Based on Flexibility Graphs, in: Int. J. of Automation Technology 9 (2015) 3, S.270-282.

- Brettel, M./Friederichsen, N./Keller, M./Rosenberg, M.: How Virtualization, Decentralization and Network Building change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective, in: International Scholarly and Scientific Research & Innovation 8 (2014) 1, S.37-44.
- Bruun, P./Mefford, R. N.: Lean Production and the Internet, in: Int. J. Production Economics 89 (2004) 3, S.247-260.
- Dombrowski, U./Richter, T./Ebentreich, D.: Ganzheitliche Produktionssysteme und Industrie 4.0 - Ein Ansatz zur standardisierten Arbeit im flexiblen Produktionsumfeld, in: Industrie Management 31 (2015a) 3, S.53-56.
- Dombrowski, U./Richter, T./Ebentreich, D.: Auf dem Weg in die vierte industrielle Revolution - Ganzheitliche Produktionssysteme zur Gestaltung der Industrie-4.0-Architektur, in: Zeitschrift Führung + Organisation (zfo) 84 (2015b) 3, S.157/163.
- Dörr, S./Garcia Lopez, F.: Vernetzte intelligente Navigation für fahrerlose Transportsysteme, Open automation (2015) 3, S.10-13.
- Forstner, L./Dümmler, M.: Integrierte Wertschöpfungsnetzwerke – Chancen und Potenziale durch Industrie 4.0, in: Elektrotechnik & Informationstechnik 131 (2014) 7, S.199-201.
- Fragner, B.: Pioniere des Digitalen, in: Industriemagazin (2015) 6, S. 76-81.
- Frank, H.: Lean Produktion versus Industrie 4.0: Gegner oder Verbündete?, in: Industrie Management 30 (2014) 6, S.17-20.
- Giusto, D./Lera, A./Morabito G. /Atzori, L.: The Internet of Things - A Survey, in: Computer networks 54 (2010) 15, S.2787–2805.
- Greschke, P./Hermann, C.: Das Humanpotenzial einer taktunabhängigen Montage, in: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109 (2014) 10, S.687-690.

- Hofmann, J.: Lean meets Industrie 4.0. Maschinenfabrik Reinhausen und die Zukunft der Produktion, in: MAV - Innovationen in der spanenden Fertigung (2014) 12, S.104-105.
- Kolberg, D./Zühlke, D.: Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies, in: IFAC-PapersOnLine 48 (2015) 3, S.1870-1875.
- Krebs, M./Goßmann, D./Erohin, O./Bertsch, S./Deuse, J./Nyhuis, P.: Standardisierung im wandlungsfähigen Produktionssystem, in: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 106 (2011) 12, S.912-917.
- Lanza, G./Peters, S./Arndt, T./Häfner, B./Stricker, N.: Die Produktion im Jahr 2025. Ein Zukunftsbild, in: Industrie Management 30 (2014) 6, S.64-66.
- Lappe, D./Veigt, M./Franke, M./Kolberg, D./Schlick, J./Stephan, P./Guth, P./Zimmerling, R.: Vernetzte Steuerung einer schlanken Intralogistik - Simulationsbasierte Potentialanalyse einer bedarfsorientierten Materialversorgung in der Fertigung, in: wt-online 104 (2014) 3, S.112-117.
- Lucke, D./Constantinescu, C./Westkämper, E.: , in: wt-online 98 (2008) 3, S.138-142.
- Maier, A./Erlach, K./Ehrt, M.: Der Kundentakt bestimmt die Montage - Vorgehen zur optimierten Gestaltung der Montage von variantenreichen Instrumenten PRODUCTIVITY Management 18 (2013) 5, S.27-30.
- o.A.: Per Signal zur Lean Production - Einfache Signalisierung schafft Transparenz an manuellen Arbeitsplätzen, in: Der Betriebsleiter (2013) 4, S.40.
- Plutz, M.: Smart Glasses - Intelligente Datenbrillen nun auch für die Prozessbeschleunigung in der Industrie, in: All about Sourcing (2015) 5, S. 14.
- Riexinger, G.: Grünes Licht für nächsten Montageschritt, in: interaktiv - Das Kundenmagazin des Fraunhofer IPA (2015) 2, S.35.

- Roy, D./Mittag, P./Baumeister, M.: Industrie 4.0 – Einfluss der Digitalisierung auf die fünf Lean-Prinzipien, in: PRODUCTIVITY Management 20 (2015) 2, S.27-30.
- Saile, P./Wunderlich, R.: Flexibel einsetzbar, in: Logistik Heute (2008) 4, S.50-51
- Schlatt, A.: C-Teile-Management - Wenn der Beschaffungsaufwand den Warenwert übersteigt, in: GENIOS WirtschaftsWissen Produktion, Materialwirtschaft & Logistik (2013) 5, S.8-11.
- Steinhilper, R./Westermann, H./Butzer, S./Haumann, M./Seifert, S.: Komplexität messbar machen - Eine Methodik zur Quantifizierung von Komplexitätstreibern und -wirkungen am Beispiel der Refabrikation, in: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 107 (2012) 5, S.360-365.
- Tröger, K.: Die Symbiose von Produkt-, Produktions- und Unternehmens-IT, in: Industrie 4.0 magazin - Zeitschrift für integrierte Produktionsprozesse (2015a) 01, S.14-17.
- Tröger, K.: Vertikale Integration und Visualisierung von Produktionssystemen, in: Industrie 4.0 magazin. Zeitschrift für integrierte Produktionsprozesse (2015a) 01, S.26-27.
- Vogel-Heuser, B./Schütz, D./Göhner, P.: Agentenbasierte Kopplung von Produktionsanlagen - Konzept für Cyber-Physische Produktionssysteme, in: Informatik Spektrum 38 (2015) 3, S.191-198.
- Veigt, M./Lappe, D./Hribernik, K.: Entwicklung eines Cyber-Physischen Logistiksystems, in: Industrie Management 29 (2013) 1, S.15-18.
- Wiegel, F./Immler, S./Knobloch, D./Abele, E.: Simulationsgestützte Optimierung innerbetrieblicher Milkruns. Entwicklung eines Simulationsmodells zur Planung und Optimierung der Materialbereitstellung, in: PRODUCTIVITY Management 18 (2013) 1, S.51-54.

Wutzke, R.: Digitale Helfer im Maschinen- und Anlagenbau, in: interaktiv - Das Kundenmagazin des Fraunhofer IPA (2015) 2, S.31-33.

Online

Artikel und Präsentationen

Anderseck, B.: Der inBin und das Internet der Dinge, Fraunhofer IML, 2014, [https://www.doag.org/formes/pubfiles/5817370/docs/Events/2014/DOAG%202014%20Logistik%20+%20IT%20\(07.05.2014\)/vortraege/Logistik%20auf%20dem%20Weg%20zur%20Industrie%204.0%20/2014-Logistik-IND40-Bjoern_Anderseck-Industrie_4_0__Der_inBin_und_das_Internet_der_Dinge-Praesentation.pdf](https://www.doag.org/formes/pubfiles/5817370/docs/Events/2014/DOAG%202014%20Logistik%20+%20IT%20(07.05.2014)/vortraege/Logistik%20auf%20dem%20Weg%20zur%20Industrie%204.0%20/2014-Logistik-IND40-Bjoern_Anderseck-Industrie_4_0__Der_inBin_und_das_Internet_der_Dinge-Praesentation.pdf) (18.06.2016).

Baum, M./Kampker, A./Kamp, S./Koch, S./Franzkoch, B.: Cleveres Rüsten macht auch Fertigung von Einzelteilen produktiver, Industrie Anzeiger Online, 2010, http://www.industrieanzeiger.de/home/-/article/12503/29350163/Cleveres-R%C3%BCsten-macht-auch-Fertigung-von-Einzelteilen-produktiver/art_co_INSTANCE_0000/maximized/ (18.06.2016).

Bauernhansl, T.: Die Smart Factory in Produktionsnetzwerken. Intelligente sichere Vernetzung in einer globalen IT-Infrastruktur, Fraunhofer IPA, Hannover Messe, 2013: http://files.messe.de/abstracts/51632_091620_Bauernhansl_Fraunhofer.pdf (18.06.2016).

Bauernhansl, T.: Die Vierte Industrielle Revolution – Smart Production 4 Automotive, Fraunhofer IML, 2015, http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-3664835.pdf (18.06.2016).

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Zukunftsprojekt Industrie 4.0, o.J., <https://www.bmbf.de/de/zukunftsprojekt-industrie-4-0-848.html> (18.06.2016).

Ciuppek, M.: Industrie 4.0 oder die vierte industrielle Revolution, VDI Nachrichten Online, 2012: <http://www.ingenieur.de/Themen/Produktion/Industrie-40-vierte-industrielle-Revolution> (18.06.2016).

Fraunhofer IWU; Projektgruppe Ressourceneffiziente mechatronische Verarbeitungsmaschinen: Industrie 4.0 – Medienhype oder Chance?, Fraunhofer IWU, Automatica Messe München, 2014, <http://docplayer.org/3440074-Industrie-4-0-medienhype-oder-chance.html> (18.06.2016).

Gunther, R.: Industrie 4.0 auf dem betrieblichen Hallenboden, Fraunhofer IWB, 2015, http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-3563863.pdf (18.06.2016).

Herkommer, G.: Mobile Assistenten - Die Vision von SEW-Eurodrive von der Industrie 4.0, Computer & Automation Online, 2015, <http://www.computer-automation.de/feldebene/antriebe/artikel/118265/> (18.06.2016).

Herkommer, G.: Industrie 4.0 – viele Unternehmen sind überfordert, Computer & Automation Online, 2014, <http://www.computer-automation.de/steuerungsebene/steuern-regeln/artikel/111806/> (06.06.2016).

Heller, T.: Industrie 4.0 und TPM - Revolution oder Evolution?, Fraunhofer IML, Jahrestagung "Maintenance in der Pharmazeutischen Industrie“, 2015: http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-3790612.pdf (18.06.2016).

Henke, M.: Industrie 4.0 - Nur mit Smarter Instandhaltung, Fraunhofer IML, 2015, http://www.easyfairs.com/fileadmin/groups/9/maintenance/Dortmund_2015/Vortraege/01_Henke_maintenance2015_Industrie_4_0_-_Nur_mit_smarterer_Instandhaltung_06.pdf (18.06.2016).

Henkel, M.: Industrie 4.0: Logistik und Produktion sind bereits mittendrin, Techtag Online, 2015, <http://www.techtag.de/it-und-hightech/industrie-4-XXXI>

0/industrie-4-0-logistik-und-produktion-sind-bereits-mittendrin-2/
(18.06.2016).

Hofmann, B.: Netzwerkfähige Kanban-Plantafel nutzt RFID-Technik, MM
Maschinenmarkt Online, 2016,
<http://www.maschinenmarkt.vogel.de/netzwerkfaehige-kanban-plantafel-nutzt-rfid-technik-a-519345/> (18.06.2016).

Holtmann, J.: C-Teile-Management - Da ist noch Luft drin, 2014,
<http://www.einkaufsmanager.net/einkauf-und-beschaffung/c-teile-management-da-ist-noch-luft-drin-7660.html> (18.06.2016).

Kerkmann, C.: Revolution in den Fabrikhallen, Handelsblatt Online, 2014:
<http://www.handelsblatt.com/technik/vernetzt/messe-beginn-plug-and-produce/9715564-2.html> (18.06.2016).

Matzer, M.: Datenfluten zur Selbstoptimierung nutzen, VDI Nachrichten Online,
2014: <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Wirtschaft/Datenfluten-Selbstoptimierung-nutzen> (18.06.2016).

Mayr, M./Mayr, N. M./Hofmann, B.: Baukastensystem für mobile
Montageplattformen, MM Maschinenmarkt Online, 2014,
<https://www.donkey-motion.de/presse/MM%20industrie%20-Baukasten%20fuer%20mobile%20Montageplattform-.pdf> (18.06.2016).

o.A.: Besser funken als Karten lesen, industrie.de - Das Fachportal der
Industrie, 2014,
http://industrie.de/industrie/live/index2.php?menu=1&submenu=3&object_id=33786067 (18.06.2016).

o.A.: Fertigungsdaten papierlos an der Maschine bereitstellen, IT & Production
Online, 2016, http://www.it-production.com/index.php?seite=einzel_artikel_ansicht&id=61991
(18.06.2016).

- o.A.: Industrie 4.0 - Dynamischer Milkrun, The Lean Knowledge Base, 2016, Video, <http://www.lean-knowledge-base.de/industrie-4-0-dynamischer-milkrun/> (18.06.2016).
- o.A.: Industrie 4.0 - Ein Schlagwort eingeordnet in das Weltbild der Schlanke Produktion, 2014, <http://institutfuerproduktivitaet.de/schlanke-produktion-und-industrie-4-0/> (18.06.2016).
- o.A.: Industrie 4.0 und industrielle Wirklichkeit - Eine Frage der Prozesse, s@pport Online, 2015, http://www.wassermann.de/fileadmin/user_upload/deutsch/dokumente/pdf/Presse/Sapport_I4.0_Wassermann062015.pdf (18.06.2016).
- o.A.: Neun typische Fehler im Produktionsprozess - und wie man sie vermeidet, Automations-Praxis Online, 2014 <http://www.automationspraxis.de/home/-/article/33568397/38952857> (18.06.2016).
- o.A.: Montageprozesse und Werkzeuge, Fraunhofer IPA, 2015, http://www.ipa.fraunhofer.de/montageprozesse_werkzeuge.html (18.05.2016).
- Schaal, S.: Industrie 4.0 - So sieht der Arbeitsplatz der Zukunft aus, Wirtschaftswoche Online, 2016, <http://www.wiwo.de/unternehmen/mittelstand/hannovermesse/industrie-4-0-so-sieht-der-arbeitsplatz-der-zukunft-aus/12583554.html> (18.06.2016).
- Soder, J.: Lean Industrie 4.0: Erfolgreich mit Werten und Menschen im Mittelpunkt, The Huffington Post Online, 2015, http://www.huffingtonpost.de/johann-soder/lean-industrie-40-mensch-im-mittelpunkt_b_7230102.html, (18.06.2016).
- Stock, P.: Industrie 4.0 vernichtet die Routinearbeit in Deutschland nicht, REFA-Institut e.V., 2016, <http://www.presseportal.ch/de/pm/100058239/100785030> (18.06.2016).

Weigang-Vertriebs-GmbH: Neue Plantafel-Generation kann Industrie 4.0, Pressbox Online, 2015, <http://www.pressebox.de/inaktiv/weigang-vertriebs-gmbh/Neue-Plantafel-Generation-kann-Industrie-40/boxid/758912> (18.06.2016).

Wiendahl, H.-P.: Belastungsorientierte Auftragsfreigabe, Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik – Online-Lexikon, 2012 <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/wi-enzyklopaedie/lexikon/informationssysteme/Sektorspezifische-Anwendungssysteme/Produktionsplanungs--und--steuerungssystem/Fertigungssteuerung/Belastungsorientierte-Auftragssteuerung> (18.06.2016).

Wolff, R.: Schlanke Auftragssteuerung – aber wie?, Blog von Schmid & Wolff, Management Consultants, 2015, <http://www.scm-blog.de/2015/02/schlanke-auftragssteuerung-aber-wie-teil-1/> (18.06.2016).

Sonstige

Studien, Projektberichte, Working Papers, Abschlussarbeiten, Broschüren

Acatech (Hrsg.): Future Business Clouds - Cloud Computing am Standort Deutschland zwischen Anforderungen, nationalen Aktivitäten und internationalem Wettbewerb, München (Herbert Utz Verlag), 2014.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hrsg.): Industrie 4.0. Innovationen für die Produktion von morgen, 2. Auflage, Rostock (Publikationsversand der Bundesregierung), 2015.

Clausen, U./Henke, M./ten Hompel, M.: Smart Maintenance – Industrie 4.0 in Instandhaltung und Service, Fraunhofer IML, Themenbroschüre Smart Maintenance, o.J..

Dufft, N./Schleife, K./Bertschek, I./Vanberg, M./Böhm, T./Schmitt, A. K./Barnreiter, M.: Das Wirtschaftliche Potenzial des Internet der Dienste, Studie im Auftrag des BMWI, Berlin (Berlecon Research GmbH), 2010.

- Dombrowski, U./Wagner, T./Riechel, C.: Concept for a Cyber Physical Assembly System, Xi'an (IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing), 2013, S.293-296.
- Eberhard, D.: Fertigungsorganisation nach dem Chaku-Chaku-Prinzip, Bachelorarbeit, Universität der Bundeswehr Hamburg, 2013 .
- Frenzel, U.: Deutscher Industrie „4.0 Index“ 2015 - Industrie 4.0 und Lean - Eine Studie der Staufen AG, Köngen (Staufen AG), 2015.
- Geisberger, E./Broy, M. (Hrsg.): acatech Studie 2012 - Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems - agendaCPS, München (acatech), 2012.
- Hermann M./Pentek, T./Otto, B.: Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review, Technische Universität Dortmund, Audi Stiftungslehrstuhl Supply Net Order Management, 2015.
- Kagermann, H./Wahlster, W./Helbig, J. (Hrsg): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 – Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0, Vorabversion, Frankfurt (Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft – Wissenschaft), 2012.
- Kagermann, H./Wahlster, W./Helbig, J. (Hrsg): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 – Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0, Frankfurt (Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft – Wissenschaft), 2013.
- Kerner, S.: Intelligenter Behälter, Fraunhofer IML, Themenbroschüre inBin, 2013
- Ortmann, D.: Konzeptentwicklung für agentenbasierte Produktionsplanung mittels ereignisdiskreter Simulationssoftware, Masterarbeit, Technische Universität Dortmund, 2015.

- Peters, M.: Losgrößenbetrachtungen im Prozesskettenparadigma - Methodik zur Berechnung der Losgröße auf Prozessebene, Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2015.
- Spath, D./Ganschar, O./Gerlach, S./Hämmerle, M./Krause, T./Schlund, S.: Studie Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0, Stuttgart (Fraunhofer Verlag), 2013a.
- Spath, D./Gerlach, S./Hämmerle, M./Schlund, S./Strölin, T.: Cyber-Physical System for Self-Organised and Flexible Labour Utilisation, Brasilien (22nd International Conference on Production Research), 2013b.

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.

Ich erkläre mich damit

- einverstanden,
- nicht einverstanden

dass ein Exemplar meiner Master-Thesis in die Bibliothek des Fachbereichs aufgenommen wird.

Ort, Datum

Unterschrift

Anhang

Darstellungen des TPS-Hauses



Abb. 34: TPS-Haus nach Gerberich

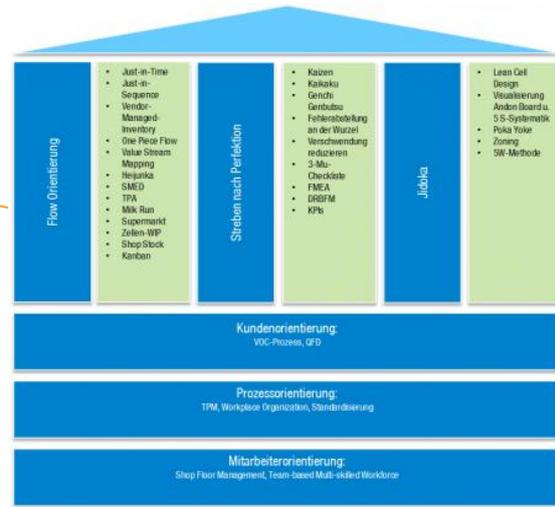


Abb. 35: TPS-Haus nach Krallmann

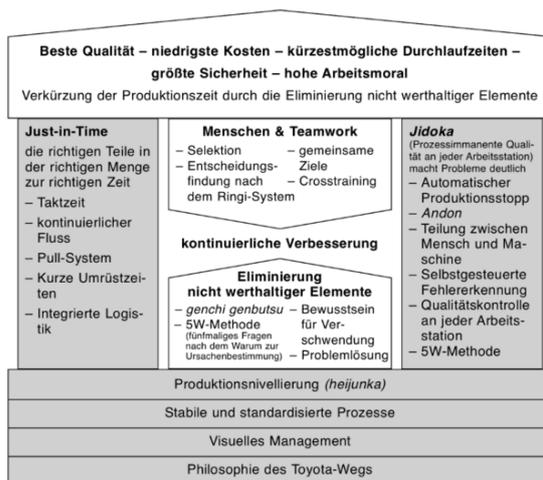


Abb. 36: TPS-Haus nach Liker

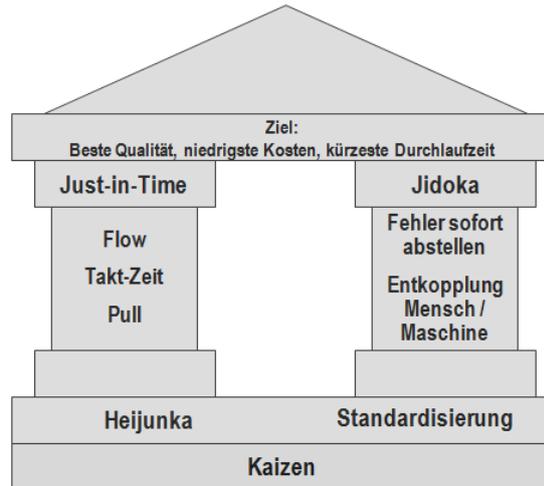


Abb. 37: TPS-Haus nach Albat