

Hrsg.: Frank Straube, Helmut Baumgarten, Raimund Klinkner

Daniel Thomas Roy

Industrie 4.0 – Gestaltung cyber-physischer Logistiksysteme zur Unterstützung des Logistikmanagements in der Smart Factory

Daniel Thomas Roy
**Industrie 4.0 –
Gestaltung cyber-physischer Logistiksysteme
zur Unterstützung des Logistikmanagements
in der Smart Factory**

Die Schriftenreihe Logistik der Technischen Universität Berlin

wird herausgegeben von:

Prof. Dr.-Ing. Frank Straube,

Prof. Dr.-Ing. Raimund Klinkner,

Prof. Dr.-Ing. Dr. rer. pol. h.c. Helmut Baumgarten

Daniel Thomas Roy

**Industrie 4.0 –
Gestaltung cyber-physischer Logistiksysteme
zur Unterstützung des Logistikmanagements
in der Smart Factory**

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Universitätsverlag der TU Berlin, 2017

<http://verlag.tu-berlin.de>

Fasanenstr. 88, 10623 Berlin

Tel.: +49 (0)30 314 76131 / Fax: -76133

E-Mail: publikationen@ub.tu-berlin.de

Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2017

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Frank Straube

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Roland Jochem

Die Arbeit wurde am 23. Juni 2017 an der Fakultät VII unter Vorsitz von Prof. Dr. Rüdiger Zarnekow erfolgreich verteidigt.

Diese Veröffentlichung – ausgenommen Zitate – ist unter der CC-Lizenz CC BY lizenziert.

Lizenzvertrag: Creative Commons Namensnennung 4.0

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Druck: docupoint GmbH

Satz/Layout: Daniel Thomas Roy

ISBN 978-3-7983-2944-7 (print)

ISBN 978-3-7983-2945-4 (online)

ISSN 1865-3170 (print)

ISSN 2197-0564 (online)

Zugleich online veröffentlicht auf dem institutionellen Repositoryum der Technischen Universität Berlin:

DOI 10.14279/depositonce-6033

<http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-6033>

DANKSAGUNG

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner dreijährigen Tätigkeit am Fachgebiet Logistik der Technischen Universität Berlin. Mein besonderer Dank während dieser Tätigkeit gilt meinem Doktorvater Professor Dr.-Ing. Frank Straube. Er hat nicht nur mit seiner Betreuung die vorliegende Arbeit ermöglicht, sondern mich stets durch Offenheit und Vertrauen bei meiner Entwicklung unterstützt, gefördert und gefordert. Auch möchte ich Herrn Professor Dr.-Ing. Jochem und Herrn Professor Dr. Zarnekow danken. Herr Jochem für die Unterstützung des Dissertationsverfahrens ebenso wie für spannende Treffen und Diskussionen über die Qualifizierung der Zukunft. Herrn Zarnekow möchte ich für den Vorsitz und die Begleitung des Verfahrens danken.

Zudem möchte ich meinen ehemaligen Kollegen am Fachgebiet Logistik danken. Insbesondere „The Fox“: Anna, Timo und Dustin. Darüber hinaus Seyit, meinem Brollegen Jan sowie Julia, Martina und Christoph. Neben der Arbeit am Fachgebiet oder am Forschungsprojekt Smart Logistics Grid fanden wir immer wieder Zeit bei dem einen oder anderen Bier, beim Beachvolleyball oder bei einem Spaziergang die Leichtigkeit des Seins zu genießen.

Ich möchte mich bei meinen Freunden Andrea, Steffi, Chris, Martin und Robert bedanken, die mich insbesondere in schwierigen Phasen moralisch unterstützt, abgelenkt und nach den zahllosen Tagen in der Bibliothek bei sich aufgenommen haben. Zudem bedanke ich mich bei Laura, Gregor, Janosch und Simon. Für die Diskussionen, Anregungen, der geteilten Freud und dem geteilten Leid während der Erstellung der Dissertation. Mein allergrößter Dank gilt meiner Familie ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Meinen Eltern und meinen Schwestern möchte ich danken, dass sie mich bei meinem Werdegang vorbehaltlos unterstützt haben und mir ein Umfeld ermöglicht haben, welches maßgeblich für den Erfolg dieser Dissertation war. Ihnen möchte ich diese Arbeit widmen.

Daniel Thomas Roy

INHALTSÜBERSICHT

INHALTSVERZEICHNIS	VII
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	XII
TABELLENVERZEICHNIS.....	XIV
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	XV
1 EINLEITUNG	1
2 THEORETISCHES BEZUGSSYSTEM.....	14
3 KONZEPTIONELLES BEZUGSSYSTEM	44
4 EMPIRISCHE ANALYSE.....	74
5 GESTALTUNG CYBER-PHYSISCHER LOGISTIKSYSTEME.....	114
6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	167
7. ANHANG.....	175
8. LITERATURVERZEICHNIS.....	191

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS	VII
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	XII
TABELLENVERZEICHNIS	XIV
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XV
1 EINLEITUNG	1
1.1 Motivation und Relevanz	1
1.2 Zielstellung	5
1.2.1 Forschungsfragen	5
1.2.2 Aufbau	6
1.3 Forschungsrahmen	7
1.3.1 Forschungsprozess	7
1.3.2 Forschungsmethodik	9
2 THEORETISCHES BEZUGSSYSTEM	14
2.1 Theorien und Lehren	14
2.1.1 Systemtheorie	15
2.1.2 Kybernetik	16
2.1.3 Netzwerktheorie	18
2.1.4 Managementlehre	19
2.2 Logistik	20
2.2.1 Logistiksysteme und -netzwerke	21
2.2.2 Logistikmanagement	23
2.3 Technologien in der industriellen Logistik	25
2.3.1 Informations- und Kommunikationstechnologien	26
2.3.2 Identifikationstechnologien	27
2.3.3 Automatisierungstechnologien	28
2.3.4 Informationssysteme	30
2.4 Auswirkungen logistischer und technologischer Trends	31
2.4.1 Logistische Trends	31
2.4.2 Technologische Trends	33

2.4.3	Herausforderungen für das innerbetriebliche Logistikmanagement.....	36
2.4.4	Anwendungspotenziale für das Logistikmanagement	38
2.5	Abgrenzung und Zusammenfassung	41
3	KONZEPTIONELLES BEZUGSSYSTEM	44
3.1	Systematische Literaturanalyse	44
3.2	Konzepte der Industrie 4.0	47
3.2.1	Cyber-physische Systeme	47
3.2.2	Internet of Everything	52
3.2.3	Smart Ecosystems	54
3.2.4	Industrie 4.0	55
3.2.5	Smart Factory.....	57
3.3	Technologien und Techniken der Industrie 4.0.....	58
3.3.1	Menschen: Assistierte Entscheider	60
3.3.2	Dinge: Intelligente Objekte und Produkte	62
3.3.3	Daten und Dienste: Integrationsplattformen.....	65
3.4	Eigenschaften und Anforderungen der Industrie 4.0	68
3.4.1	Eigenschaften.....	68
3.4.2	Anforderungen	69
3.5	Abgrenzung und Zusammenfassung	71
4	EMPIRISCHE ANALYSE.....	74
4.1	Gruppenbefragung.....	74
4.1.1	Design	74
4.1.2	Auswertung.....	75
4.1.2.1	Anforderungsanalyse	75
4.1.2.2	Eigenschaftsanalyse	77
4.1.3	Zusammenfassung	78
4.2	Fallstudienforschung.....	79
4.2.1	Design	79
4.2.2	Beschreibung Unternehmen A.....	80
4.2.2.1	Motivation, Potenziale und Herausforderungen	81

4.2.2.2	Anwendungsbeispiel und Logistikprozesse.....	82
4.2.2.3	Anforderungen.....	83
4.2.2.4	System- und Netzwerkebene.....	83
4.2.2.5	Technologieebene.....	84
4.2.2.6	Zusammenfassung.....	84
4.2.3	Beschreibung Unternehmen B.....	84
4.2.3.1	Motivation, Potenziale und Herausforderungen.....	85
4.2.3.2	Anwendungsbeispiel und Logistikprozesse.....	85
4.2.3.3	Anforderungen.....	87
4.2.3.4	System- und Netzwerkebene.....	87
4.2.3.5	Technologieebene.....	89
4.2.3.6	Zusammenfassung.....	89
4.2.4	Beschreibung Unternehmen C.....	89
4.2.4.1	Motivation, Potenziale und Herausforderungen.....	90
4.2.4.2	Anwendungsbeispiel und Logistikprozesse.....	91
4.2.4.3	Anforderungen.....	91
4.2.4.4	System- und Netzwerkebene.....	92
4.2.4.5	Technologieebene.....	93
4.2.4.6	Zusammenfassung.....	93
4.2.5	Beschreibung Unternehmen D.....	93
4.2.5.1	Motivation, Potenziale und Herausforderungen.....	94
4.2.5.2	Anwendungsbeispiel und Logistikprozesse.....	94
4.2.5.3	Anforderungen.....	95
4.2.5.4	System- und Netzwerkebene.....	95
4.2.5.5	Technologieebene.....	96
4.2.5.6	Zusammenfassung.....	96
4.2.6	Fallstudienübergreifende Zusammenfassung und Auswertung.....	97
4.2.6.1	Motivation, Potenziale und Herausforderungen.....	97
4.2.6.2	System- und Netzwerkebene.....	97
4.2.6.3	Technologieebene.....	99

4.2.6.4	Logistikprozesse	100
4.3	Zusammenführung empirische Analyse.....	101
4.3.1	Anforderungen aus der Logistikperspektive.....	102
4.3.1.1	Anpassungsfähigkeit.....	103
4.3.1.2	Transparenz (der Informationsbereitstellung)	103
4.3.1.3	(Standardisierte) Lean-Prozesse	103
4.3.1.4	Echtzeitfähigkeit	104
4.3.1.5	Automatisierung.....	104
4.3.1.6	Datensicherheit und -schutz.....	105
4.3.1.7	Ergonomie.....	105
4.3.1.8	Inter- und Intranetfähigkeit.....	106
4.3.1.9	(Standardisierte) Konnektivität.....	106
4.3.1.10	Identität	106
4.3.2	Eigenschaften aus der Logistikperspektive.....	107
4.3.2.1	Adaptivität	107
4.3.2.2	Reaktivität	108
4.3.2.3	Entscheidungsfähigkeit.....	108
4.3.2.4	Selbstmanagement	109
4.3.2.5	Integrationsfähigkeit	109
4.3.2.6	(Teil-) Autonomie.....	110
4.3.2.7	Kognition	111
4.3.2.8	Künstliche Intelligenz.....	111
4.4	Ableitung von Gestaltungsanforderungen.....	111
5	GESTALTUNG CYBER-PHYSISCHER LOGISTIKSYSTEME.....	114
5.1	Terminologie.....	114
5.2	Konzeptionierung.....	116
5.2.1	Veränderungsdimensionen.....	116
5.2.1.1	Systembezogene Veränderungsdimensionen.....	117
5.2.1.2	Netzwerkbezogene Veränderungsdimensionen.....	119
5.2.1.3	Technologiebezogene Veränderungsdimensionen	120

5.2.2	Gestaltungsempfehlungen.....	122
5.2.2.1	Systemebene	122
5.2.2.2	Netzwerkebene.....	127
5.2.2.3	Technologieebene.....	131
5.3	Entwicklung	136
5.3.1	Gestaltungsfelder	137
5.3.1.1	Fokussierung auf (klassische) Zielgrößen	137
5.3.1.2	Standardisierung der Prozesse	137
5.3.1.3	Technologieauswahl zur Virtualisierung der Prozesse.....	138
5.3.1.4	Einstellung und Verhalten der Mitarbeiter	139
5.3.2	Gestaltungsempfehlungen.....	140
5.3.2.1	Systemebene	140
5.3.2.2	Netzwerkebene.....	145
5.3.2.3	Technologieebene.....	149
5.3.2.4	Implementierung.....	151
5.3.3	Zusammenfassende Darstellung	153
5.4	Veränderungen für das Logistikmanagement	153
5.4.1	Material- und Informationsfluss	153
5.4.2	Planung, Steuerung und Kontrolle.....	156
5.5	Handlungsempfehlungen.....	162
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	167
6.1	Zusammenfassung.....	167
6.2	Kritische Würdigung und Grenzen der Gestaltung.....	171
6.3	Zukünftiger Forschungsbedarf und Ausblick.....	173
7.	ANHANG.....	175
8.	LITERATURVERZEICHNIS.....	191

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Industrielle Revolutionen im Vergleich	1
Abbildung 2: Relevanzermittlung mittels Anzahl der Suchanfragen im Internet	3
Abbildung 3: Anzahl der Beiträge auf Basis der systematischen Literaturanalyse	4
Abbildung 4: Aufbau der Arbeit	7
Abbildung 5: Forschungsprozess der angewandten Wissenschaften	9
Abbildung 6: Methodeneinsatz	10
Abbildung 7: Unterschiede von Systemgrenzen	15
Abbildung 8: Prozesskettenmodell der Logistik	21
Abbildung 9: Logistikaufgaben in der Auftragsabwicklung	24
Abbildung 10: Planungs-, Steuerungs- und Kontrollaufgaben im Regelkreis	25
Abbildung 11: Automatisierungssystem	28
Abbildung 12: Automatisierungspyramide	29
Abbildung 13: Logistiktrends	32
Abbildung 14: Auflösung der klassischen Automatisierungspyramide	34
Abbildung 15: Zusammenfassung des theoretischen Bezugssystems	42
Abbildung 16: Selektionsprozess der systematischen Literaturanalyse	45
Abbildung 17: Ergebnisse der systematischen Literaturanalyse: Führende Autoren	46
Abbildung 18: Entwicklungspfad im konzeptionellen Bezugssystem	47
Abbildung 19: CPS-basierte Automation	48
Abbildung 20: Aufbau eines cyber-physischen Systems	50
Abbildung 21: Ergebnis systematische Literaturanalyse: Industrie 4.0-Techniken	60
Abbildung 22: Abgrenzung von Konzepten im konzeptionellen Bezugssystem	72
Abbildung 23: Auswertung Anforderungsanalyse	76
Abbildung 24: Anwendungspotenzial Eigenschaften	77
Abbildung 25: Fallstudienresultate: Potenziale und Herausforderungen	98
Abbildung 26: Fallstudienresultate: I4.0-Technologien und Techniken	100
Abbildung 27: Zusammenführung Anforderungsanalyse	102
Abbildung 28: Zusammenführung Eigenschaftsanalyse	107
Abbildung 29: Gestaltungsanforderungen an cyber-physische Logistiksysteme	112
Abbildung 30: Systematisierung der Gestaltungsebenen und -merkmale von CPLS ..	116
Abbildung 31: Systembezogene Veränderungsdimensionen	117
Abbildung 32: Netzwerkbezogene Veränderungsdimensionen	119
Abbildung 33: Technologiebezogene Veränderungsdimensionen	121
Abbildung 34: Gestaltungsebene: SYSTEM	126
Abbildung 35: Gestaltungsebene: NETZWERK	130
Abbildung 36: Gestaltungsebene: TECHNOLOGIE	135

Abbildung 37: KANO-Modell und Matrix der Zielpriorisierung.....	141
Abbildung 38: Wertstromanalyse	143
Abbildung 39: Einfluss-Matrix und System-Grid	146
Abbildung 40: Relationen-Diagramm	147
Abbildung 41: Prozessregelkreis	147
Abbildung 42: Technologieattraktivität und Ressourcenstärke.....	149
Abbildung 43: Technologie-Portfolio-Analyse	150
Abbildung 44: Digitale Durchgängigkeit in der Smart Factory	151
Abbildung 45: Entwicklung cyber-physischer Logistiksysteme in der Smart Factory	153
Abbildung 46: Cyber-physische Prozesslandschaft.....	154

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Relevante Theorieansätze	14
Tabelle 2: Unterschiede Systemtheorie und Kybernetik	16
Tabelle 3: Informationssysteme des Logistikmanagements	31
Tabelle 4: Terminologie cyber-physischer Systeme.....	49
Tabelle 5: Terminologie Industrie 4.0	56
Tabelle 6: Industrie 4.0-Technik: Assistierte Entscheider (Assistenzsysteme).....	62
Tabelle 7: Industrie 4.0-Technik: Intelligente Objekte.....	64
Tabelle 8: Industrie 4.0-Technik: Integrationsplattformen (Anwendungen).....	67
Tabelle 9: Ergebnis literaturbasierte Eigenschaftsanalyse.....	69
Tabelle 10: Ergebnis literaturbasierte Anforderungsanalyse.....	70
Tabelle 11: Fallstudienauswahl	80
Tabelle Anhang 12: Automatisierungssysteme	176
Tabelle Anhang 13: Iterativer Auswahlprozess der systematischen Literaturanalyse .	179
Tabelle Anhang 14: Referenzen Basisliteratur Kagermann et al. (2013)	180
Tabelle Anhang 15: Referenzen Basisliteratur Spath (2013)	180
Tabelle Anhang 16: Beiträge Basisliteratur Bauernhansl et al. (2014)	181
Tabelle Anhang 17: Referenzen Basisliteratur Bauernhansl et al. (2014).....	182
Tabelle Anhang 18: Ergebnis syst. Literaturanalyse: Industrie 4.0-Techniken.....	183
Tabelle Anhang 19: Ergebnis syst. Literaturanalyse: Anforderungen.....	187
Tabelle Anhang 20: Ergebnis syst. Literaturanalyse: Eigenschaften	189
Tabelle Anhang 21: IoE-Ansätze.....	190

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AG	Aktiengesellschaft
AM	Advanced Manufacturing
APS	Advanced Planning and Scheduling System
AS	Automatisierungssystem
AT	Automatisierungstechnologie
B2B	Business-to-Business
B2C	Business-to-Consumer
BDE	Betriebsdatenerfassung
Bitkom	Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V.
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BSC	Balanced Scorecard
CPLS	Cyber-physisches Logistiksystem
CPPS	Cyber-physisches Produktionssystem
CPS	Cyber-physisches System
Eb	Exabyte
ERP	Enterprise Resource Planning System
EU	Europäische Union
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
HM	Hannover Messe
I4.0	Industrie 4.0
IdD	Internet der Dinge
IDT	Identifikationstechnologie
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IoE	Internet of Everything
IP	Internet Protocol

LIS	Logistisches Informationssystem
KAP	Kundenauftragsabwicklungsprozess
KEZ	Kennzahlensystem
KI	Künstliche Intelligenz
MAS	Multiagentensystem
MDE	Maschinendatenerfassung
MES	Manufacturing Execution System
MRP-I	Material Requirements Planning
MRP-II	Manufacturing Resources Planning
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
RFID	Radio Frequency Identification
RHB	Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
SOA	Service-Oriented Architecture
SCEM	Supply Chain Event Management
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TMS	Transport Management System
TPA	Technologie-Portfolio-Analyse
TU	Technische Universität
TUM	Technische Universität München
US	United States
USA	United States of America
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
WMS	Warehouse Management System
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie

1 EINLEITUNG

Ausgehend von der Motivation und Relevanz für Praxis und Wissenschaft (Abschnitt 1.1) werden in diesem einleitenden Kapitel die Zielstellung und die primäre Forschungsfrage dieser Arbeit entwickelt (Abschnitt 1.2). Der letzte Abschnitt 1.3 dieses Kapitels erläutert das Forschungsdesign zur Erreichung des Forschungsziels.

1.1 Motivation und Relevanz

„Industrie 4.0“ steht für die vierte industrielle Revolution¹. Diese Revolution ist gekennzeichnet durch Trends in Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT), der Automation sowie einer zunehmenden Vernetzung über das Internet, die die Grenzen von physischer und digitaler Welt sukzessive auflöst. Dieser Revolution wird eine vergleichbare Auswirkung auf die Wirtschaft und Arbeitsorganisation wie den vorangegangenen industriellen Revolutionen zugetraut.² Die Erwartungen sind immens, so rechnet der Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) mit einer knappen Vervierfachung des weltweiten Bruttoinlandsproduktes (BIP) pro Kopf im Vergleich zur dritten industriellen Revolution (Abbildung 1).

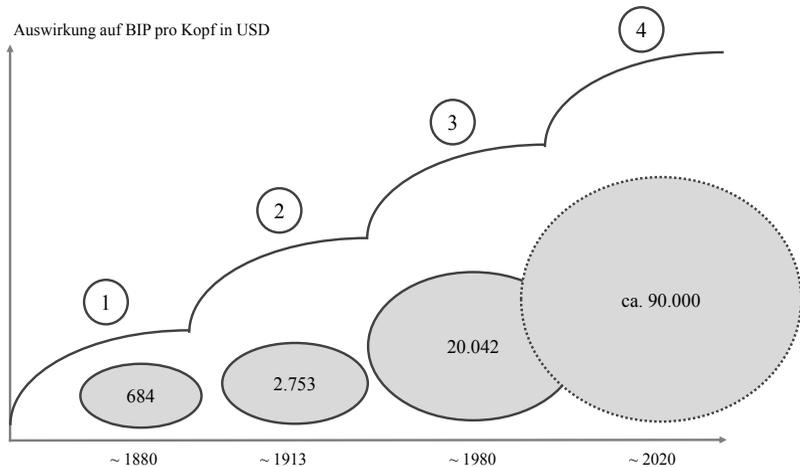


Abbildung 1: Industrielle Revolutionen im Vergleich³

Volkswirtschaften weltweit adressieren zunehmend diese Entwicklung und unterstützen den Prozess aktiv mit Programmen und Initiativen.⁴ Das Engagement scheint gerecht-

¹ Vgl. Spath (2013), S. 22

² Vgl. Kagermann (2014), S. 603

³ Eigene Darstellung (kaufkraftbereinigt in Mrd. \$ pro Jahr) in Anlehnung an Bauernhansl (2014), S. 5 f.; Wahlster (2014), S. 3; ZVEI (2013), S. 28 f.

⁴ Vgl. Kagermann et al. (2013), S. 74 f.

fertigt. Im Rahmen der Digitalisierung wird für Europa ein Wertschöpfungspotenzial in Höhe von über 1 Bio. € erwartet. Auf Deutschland entfallen in diesem Szenario 425 Mrd. € bis 2025.⁵ Verantwortlich ist u. a. der Beitrag zum Geschäftserfolg, der 2016 bereits bei 43 % (2015: 27 %) liegt. Die gewerbliche Wirtschaft weist mit 60 % Anteil an digitalisierten Produkten und Diensten einen höheren Anteil auf als das verarbeitende Gewerbe mit 27 %.⁶ Daher stößt die vierte industrielle Revolution in der deutschen Industrie auf zunehmendes Interesse. Laut einer Studie erwarten in den nächsten fünf Jahren 88 % der Befragten in Deutschland eine hohe bis sehr hohe Bedeutung der Industrie 4.0 (I4.0) für die Wettbewerbsfähigkeit des Wirtschaftsstandorts Deutschlands. Der erwartete zusätzliche Umsatz von ca. 30 Mrd. € pro Jahr stützt diese positive Einschätzung⁷ und veranlasst deutsche Unternehmen bis 2020 zu geplanten jährlichen Investitionen in I4.0-Lösungen in Höhe von 40 Mrd. €.⁸

Trotz des relativ geringen Bekanntheitsgrads des Begriffs „Industrie 4.0“ (57 %) sind die Unternehmen von dessen nachhaltiger Auswirkung auf das Wirtschaftsleben überzeugt.⁹ Die Ergebnisse der Umfragen decken sich mit Erkenntnissen von Interviews aus den Jahren 2014 und 2015, die u. a. auf der *Hannover Messe*¹⁰ (HM) geführt wurden. Die Interviewten bemängelten, dass die Möglichkeiten der zunehmenden Digitalisierung industrieller Prozesse Ausrüstern wie Anwendern kaum bekannt sind. Insbesondere bemängelten die Anwender die unzureichende Transparenz über Nutzungsmöglichkeiten. Ausrüster wiesen auf die noch unzureichende Umsetzung neuer Geschäftsmodelle hin. Ein möglicher Grund für die asymmetrische Wissensverteilung besteht darin, dass kein einheitliches Verständnis über I4.0 und die angrenzenden Konzepte existiert. Dennoch teilten beide Marktseiten den Optimismus für das erwartete Potenzial von I4.0. Aktuell ist zu beobachten, dass Messen, Symposien, Forschungsprojekte und Veröffentlichungen im Kontext der I4.0 zunehmen. Die Meinungen bzgl. Begrifflichkeiten oder Potenzialen differieren jedoch. Dennoch ist die vorherrschende Meinung, dass I 4.0 kommt, lediglich dessen konkrete Gestalt ist noch ungewiss.

„Industrie 4.0 ist ein vergleichsweise unbestimmter Begriff“¹¹, weswegen eine der zentralen Forderungen in der Beschreibung, Definition und Abgrenzung von Begriffen sowie der Etablierung eines gemeinsamen Verständnisses von Zielen, Potenzialen und Herausforderungen besteht.¹² Im Kontext von I4.0 werden die Konzepte „Internet of Things“, „Smart Factory“ und „cyber-physische Systeme“ thematisiert. Die Zunahme diesbezüglicher Internet-Suchanfragen (Abbildung 2), kann als positiver Trend der weltweiten Relevanz interpretiert werden.

⁵ Vgl. Roland Berger Strategy Consultants (2015), S. 7

⁶ Vgl. BMWi (2016), S. 9

⁷ Vgl. PWC und Strategy& (2014), S. 31 ff.

⁸ Vgl. PWC und Strategy& (2014), S. 14

⁹ Vgl. IDC (2014), S. 2 ff.

¹⁰ „Industrie 4.0“ stellt seit 2013 das Leitmotiv der Messe dar.

¹¹ Bienzeisler et al. (2014), S. 8

¹² Vgl. Kagermann et al. (2013), S. 45 f.; Dais (2014), S. 625; Interviewpartner HM (2014)

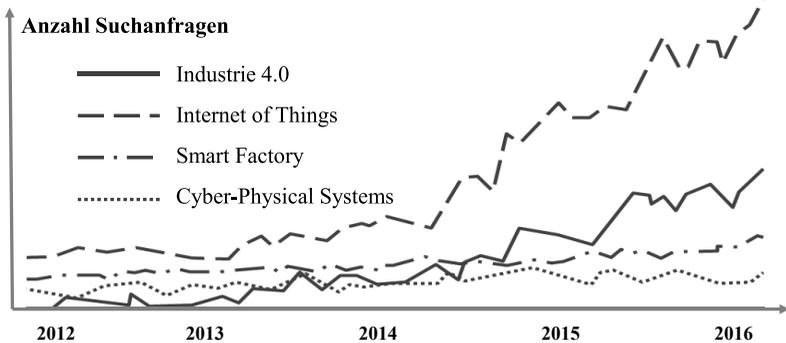


Abbildung 2: Relevanzermittlung mittels Anzahl der Suchanfragen im Internet¹³

14.0 als „Umsetzung des Internets der Dinge“¹⁴ ist 2012 durch die Veröffentlichung des „Zukunftsprojektes Industrie 4.0“ der Bundesregierung erstmalig in Erscheinung getreten. Neben der begrifflichen Eruierung liegt der Forschungsbedarf aus Sicht der Praxis in der Entwicklung von Ansätzen des Technologieeinsatzes im Fabrikbetrieb für die positive Beeinflussung von Kosten, Qualität und Liefertreue.¹⁵ Dazu bedarf es der Erforschung von Ordnungsrahmen, Referenzarchitekturen, Plattformen und Systemansätzen.¹⁶ Diese Modelle sollten die Anforderungen der Anwender sowie die Analyse von Modellierungs- und Steuerungskonzepten berücksichtigen.¹⁷ **Internet of Things** – als ältestes Konzept – findet im zeitlichen Verlauf die größte Verbreitung und wurde in den letzten Jahren zunehmend nachgefragt. Grund ist die Ausdehnung des Konzeptes auf *Dinge, Daten, Dienste und Menschen* zum **Internet of Everything (IoE)** sowie deren Vernetzung in der industriellen Anwendung. Die **Smart Factory** als *industrielles Ökosystem für Produktion und Logistik* weist ebenfalls eine Relevanzzunahme auf und adressiert die Netzbildung der Elemente des IoE hin zu *cyber-physischen Logistik- und Produktionssystemen (CPLS bzw. CPPS)*. *CPLS sind Netzwerke in einer Smart Factory, bestehend aus Produkt-, Objekt- und Subjektsystemen, die die Erfüllung von Zielen und Aufgaben des Logistikmanagements zur Befriedigung der Kundenwünsche unterstützen.* **Cyber-physische Systeme (CPS)** bilden die technologische Basis der anderen Konzepte und bestehen aus *dezentralen, autonomen eingebetteten Systemen, die die physische mit der virtuellen Realität vernetzen.* Die internet-basierte Relevanzermittlung zeigt für CPS im Vergleich zu den anderen Konzepten eine steigende, aber geringere Popularität auf.

¹³ Eigene Darstellung basierend auf Google Trends (2016), Stand: 04.03.2016. Google Trends zeigt das relative Maß für die Anzahl von Suchanfragen in einem bestimmten Zeitintervall.

¹⁴ Interviewpartner auf der HM (2014).

¹⁵ Vgl. Interviewpartner auf der HM (2014).

¹⁶ Vgl. Geisberger und Broy (2012), S. 72 ff.; Niggemann et al. (2014), S. 174 ff.; ten Hompel (2010), S. 6 f.; Westkämper (2013b), S. 313 f.

¹⁷ Vgl. Geisberger und Broy (2012), S. 170 ff.

Aufgrund der Aktualität des Forschungsgegenstandes existieren kaum wissenschaftliche Publikationen, die explizit Bezug auf I4.0 im logistischen Kontext nehmen. Die ersten Analysen zu logistischen Planungs- und Steuerungsaufgaben zeigen das gleiche Bild, obwohl diese insbesondere in der Vision der I4.0 relevant sein sollen. Die zukünftigen Entwicklungen, Potenziale und Herausforderungen lassen erwarten, dass die Logistik nicht im Zentrum dieser Entwicklung stehen wird. Das in Abbildung 3 vorgestellte Ergebnis der systematischen Literaturanalyse, in der 49 Literaturquellen identifiziert, analysiert und untersucht wurden, zeigt den Forschungsbedarf auf.¹⁸

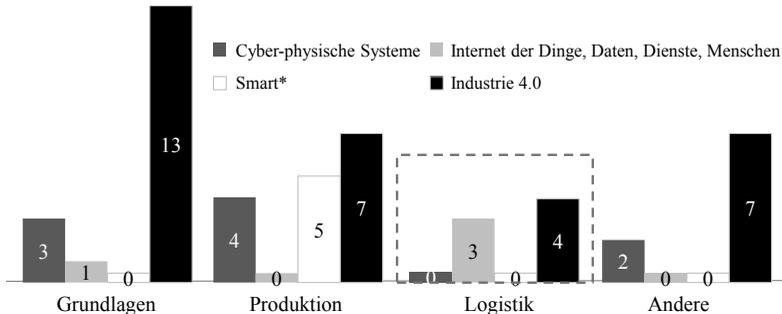


Abbildung 3: Anzahl der Beiträge auf Basis der systematischen Literaturanalyse¹⁹

Die Literatur beschreibt Konzepte und Anwendungen von Unternehmen, Forschungsinstituten sowie anderen Einrichtungen. Bislang fehlt gänzlich eine Konzeptionierung und stringente Darstellung der Zusammenhänge von I4.0 sowie angrenzender Konzepte. Die Schwerpunkte liegen in der Erforschung von Grundlagen in der Produktion, während die Logistik bisher nur im Rahmen des Internets der Dinge und einiger Anwendungsbeispiele berücksichtigt wurde. Die Auseinandersetzung mit CPS und der Smart Factory mit Bezug zu Logistik und CPLS findet bisher kaum statt, obwohl die Entwicklung und Erforschung von CPLS im industriellen Einsatz von der Bundesregierung wie von Unternehmen gefordert wird.²⁰

Logistik ist die „herausragende[n] Anwendungsdomäne der vierten industriellen Revolution“.²¹ Dennoch betrachten nur 49% der Befragten die Logistik auf I4.0 vorbereitet.²² Mit 2,8 Mio. Beschäftigten in Deutschland und einem Umsatz in Höhe von 228 Mrd. € in 2014 stellt sie den drittgrößten Wirtschaftszweig in Deutschland dar.²³ Die Logistik – und somit die Branchen, mit denen sie in Wechselwirkung steht – ist in den kommenden Jahren mit Herausforderungen und Trends konfrontiert. Stetig steigende und sich verändernde Kundenerwartungen an Produkte, Prozesse und Dienstleistungen in Unterneh-

¹⁸ Das Vorgehen der Literaturanalyse wird in Kapitel 3 vorgestellt.

¹⁹ Eigene Darstellung.

²⁰ Vgl. Kagermann et al. (2013), S. 89 ff.

²¹ ten Hompel und Henke (2014), S. 615

²² Vgl. McKinsey & Company (2015), S. 54

²³ Vgl. BVL.de (2014), Zugriff 22.01.2015

men erhöhen u. a. die Variantenvielfalt.²⁴ Individualisierte Kundenwünsche, die Vernetzung der Wirtschaft, der Kostendruck, der Mangel an qualifiziertem Personal sowie die Bedeutung neuer Technologien sind für das Logistikmanagement Treiber und Hemmnis zugleich. Die kürzeren Produkt- und Innovationszyklen sowie die Zunahme von Logistikzielen und deren teils diametral entgegengesetzte Priorisierungen verstärken die Komplexität zukünftiger Entscheidungsfindungsprozesse, die z. B. durch End-to-End-Integration, integrierte Planung sowie koordinierte Investitionen in Basistechnologien unterstützt werden können.²⁵

Aktuell fokussiert die Wissenschaft und Praxis im Kontext von I4.0 die Produktion in und außerhalb von Unternehmensnetzwerken. Neben CPPS wird im industriellen Einsatz die Auseinandersetzung mit bisher kaum erforschten und entwickelten CPLS angestrebt,²⁶ da es aufgrund der Verbundenheit von Produktion und Logistik „eine Industrie 4.0 [nicht] ohne adaptive, cyber-physische Logistiksysteme“²⁷ geben wird.

1.2 Zielstellung

Diese Arbeit setzt sich das Ziel, ein cyber-physisches Logistiksystem im Kontext der I4.0 zu gestalten und dessen Beitrag zur Unterstützung des Logistikmanagements in einer Smart Factory zu untersuchen. Der Fokus liegt auf der internen Sicht der taktischen und operativen Ebene von Beschaffungs-, Produktions- und Distributionslogistik produzierender Industrieunternehmen. Fallweise wird er auf externe Schnittstellen, wie z. B. Lieferanten und Kunden, erweitert, um dem integrierten, ganzheitlichen Anspruch der Logistik gerecht zu werden.

1.2.1 Forschungsfragen

Als primäre Forschungsfrage ergibt sich daraus:

Wie lässt sich ein cyber-physisches Logistiksystem der Industrie 4.0 für das Logistikmanagement in der Smart Factory gestalten?

Zur Beantwortung der primären Forschungsfrage wurden sechs sekundäre Forschungsfragen formuliert. Die erste sekundäre Forschungsfrage beschreibt die logistischen und technologischen Trends von I4.0 sowie deren Auswirkungen auf das Logistikmanagement innerhalb des theoretischen Bezugssystems.

F.1 Welche Auswirkungen im Kontext von Industrie 4.0 können für das Logistikmanagement festgestellt werden?

Die zweite und dritte sekundäre Forschungsfrage thematisieren die Terminologie und den Status quo von I4.0. Integriert in ein konzeptionelles Bezugssystem wird neben dem

²⁴ Vgl. Jochem et al. (2010), S. 2

²⁵ Vgl. Handfield et al. (2013), S. 45 ff.

²⁶ Vgl. Kagermann et al. (2013), S. 89 ff.

²⁷ Günthner et al. (2014), S. 321

Konzept I4.0 dessen Zusammenhang zu den Konzepten CPS, des Internets der Daten, Dienste, Dinge und Menschen sowie der Smart Factory beschrieben und abgegrenzt. Anschließend erfolgen die Identifikation und Zuordnung von Technologien und Techniken sowie deren Eigenschaften und die an sie gestellten Anforderungen.

F.2 Welche Konzepte können im Kontext von Industrie 4.0 beschrieben und abgegrenzt werden?

F.3 Welche Technologien und Techniken können der Industrie 4.0 zugeordnet werden und welche Eigenschaften und Anforderungen existieren prinzipiell?

Die vierte sekundäre Forschungsfrage erforscht im Rahmen des empirischen Teils den gegenwärtigen Einsatz von I4.0 innerhalb der Smart Factory und eruiert die relevanten Eigenschaften und Anforderungen aus der Perspektive des Logistikmanagements.

F.4 Warum und wie wird Industrie 4.0 in der industriellen Logistik eingesetzt und welche Anforderungen und Eigenschaften präferiert das Logistikmanagement?

Die letzten beiden sekundären Forschungsfragen beinhalten die Gestaltung des cyber-physischen Logistiksystems unter Berücksichtigung der zuvor gewonnenen Erkenntnisse sowie die Ableitung von Handlungsempfehlungen.

F.5 Wie können cyber-physische Logistiksysteme gestaltet werden?

F.6 Welche Handlungsempfehlungen können für das Logistikmanagement im Kontext von Industrie 4.0 abgeleitet werden?

1.2.2 Aufbau

Ausgehend von der Darstellung von Motivation und Relevanz der Arbeit werden in Kapitel 1 die Zielstellung sowie der Forschungsrahmen aufgezeigt. Nach der Definition von forschungsrelevanten Theorien und Lehren sowie der Logistik und deren Technologien werden die Auswirkungen auf das Logistikmanagement (Kapitel 2) beschrieben. Kapitel 3 thematisiert das konzeptionelle Bezugssystem, in dem Konzepte der I4.0 beschrieben, abgegrenzt sowie deren Technologien und Techniken identifiziert werden. Anschließend erfolgen die Identifikation von Eigenschaften und Anforderungen und die Zuordnung zu den Konzepten. Kapitel 4 enthält die empirische Analyse, in der mit Hilfe von Gruppenbefragung und Fallstudienforschung der Einsatz von I4.0-Lösungen in der Logistik erforscht wird. Zudem erfolgt die Aufnahme und Priorisierung von Eigenschaften und Anforderungen aus der Perspektive des Logistikmanagements. Die gewonnenen Erkenntnisse münden in die Gestaltung des cyber-physischen Logistiksystems (Kapitel 5). Auf die Gestaltung folgen die Validierung sowie die Ableitung von Handlungsempfehlungen. Die vorliegende Arbeit schließt in Kapitel 6 mit einer Zusammenfassung, kritischen Würdigung sowie einem Ausblick. In grafischer Form stellt sich der Aufbau der Arbeit (Abbildung 4) wie folgt dar:

Kapitel	Inhalt	Methode
1	<p style="text-align: center;">Einleitung</p> <p>Motivation und Relevanz → Zielstellung → Forschungsrahmen</p>	(Systematische) Literaturanalyse Experteninterview
2	<p style="text-align: center;">Theoretisches Bezugssystem</p> <p>Theorien und Lehren → Technologien in der industriellen Logistik → Auswirkungen auf das Logistikmanagement (F.1)</p>	Literaturanalyse
3	<p style="text-align: center;">Konzeptionelles Bezugssystem</p> <p>Konzepte der I4.0 (F.2) → Technologien und Techniken der I4.0 (F.3) → Eigenschaften und Anforderungen der I4.0 (F.3)</p>	Systematische Literaturanalyse
4	<p style="text-align: center;">Empirische Analyse</p> <p>Status quo des I4.0-Einsatzes in der Logistik (F.4) → Anforderungsanalyse aus der Logistikperspektive (F.4) → Eigenschaftsanalyse aus der Logistikperspektive (F.4)</p>	Gruppenbefragung und Fallstudienforschung
5	<p style="text-align: center;">Cyber-physisches Logistiksystem</p> <p>Konzeptionierung (E.5) → Entwicklung (E.5) → Handlungsempfehlungen (F.6)</p>	Experteninterview
6	<p style="text-align: center;">Zusammenfassung und Ausblick</p> <p>Zusammenfassung → Kritische Würdigung und Grenzen der Gestaltung → Zukünftiger Forschungsbedarf und Ausblick</p>	

Abbildung 4: Aufbau der Arbeit²⁸

1.3 Forschungsrahmen

Für die Beantwortung der primären und sekundären Forschungsfragen ist ein systematischer Forschungsrahmen notwendig. Nach der Beschreibung und Begründung des gewählten Forschungsprozesses (Abschnitt 1.3.1) werden die verwendeten Forschungsmethoden (Abschnitt 1.3.2) vorgestellt.

1.3.1 Forschungsprozess

„Wissenschaft bezeichnet den Prozess, Erkenntnis systematisch zu gewinnen, um so „unseren“ Vorrat an Wissen zu vergrößern (= Wissenschaft als Tätigkeit).“²⁹ Ziel wissenschaftlicher Tätigkeit ist die Beschreibung, Erklärung und Gestaltung gesammelter Erkenntnisse. Im Ergebnis müssen die am Forschungsgegenstand gewonnenen Resultate in einem kausalen Zusammenhang stehen. Das Ziel einer Wissenschaftstheorie und somit des Forschungsprozesses ist es, mit wissenschaftlichen Instrumenten den Erkenntnisfortschritt bzgl. des Forschungsgegenstandes zu dokumentieren.³⁰ Für den Forschungsprozess stehen der Wissenschaftstheorie im Generellen der deduktive, induktive und abduktive Ansatz zur Verfügung. Im Rahmen der Deduktion wird vom „Allgemeinen auf das Besondere, vom Ganzen auf das Einzelne, vom Abstrakten auf das Konkrete“³¹ geschlossen. Ausgehend von einem theoretischen Bezugssystem werden Hypothe-

²⁸ Eigene Darstellung.

²⁹ Kornmeier (2006), S. 4

³⁰ Vgl. Füllbier (2004), S. 266 f.; Kornmeier (2006), S. 5 ff.

³¹ Bortz und Döring (2006), S. 300

sen formuliert und empirisch falsifiziert bzw. bestätigt (Hypothesenprüfung). Ausgangspunkt beim induktiven Ansatz sind empirische Beobachtungen in der Praxis, auf deren Grundlage Hypothesen formuliert werden (Hypothesenentwicklung). Diese fließen in die Entwicklung theoretischer Bezugssysteme ein.³² Aus einer endlichen Anzahl einzelner Beobachtungen wird auf eine allgemeine Gesetzmäßigkeit geschlossen.³³ Der abduktive Ansatz ist eine Kombination beider zuvor skizzierter Ansätze. Ausgehend von einem theoretischen Grundverständnis werden Hypothesen abgeleitet und Erkenntnisse gewonnen (Deduktion). Beobachtungen in der Praxis, die bisher nicht ausreichend theoretisch erschlossen wurden, verifizieren diese Hypothesen (Induktion). Iterativ werden die Datensammlung und die Phase der Theorienbildung kontinuierlich abgeglichen.³⁴

Prinzipiell lässt sich zwischen theoretischer (Grundlagen) und praktischer (Anwendung) Wissenschaft unterscheiden.³⁵ Nach *ULRICH* wird die Betriebswirtschaftslehre als angewandte Wissenschaft verstanden, deren unmittelbarer Zweck im Praxisbezug liegt.³⁶ Probleme entstehen in den angewandten Wissenschaften nicht in der Wissenschaft selbst, sondern außerhalb der Wissenschaft, in der Praxis. „*Angewandte Forschung ist [...] ihrem Wesen nach interdisziplinär.*“³⁷ Die identifizierten Probleme sind nicht rein psychologischer oder physikalischer Natur, wie dies in der Grundlagenforschung der Fall ist. Vielmehr sind die Probleme, die in Interaktion mit dem Menschen entstehen, adisziplinär. Das Forschungsziel der theoretischen Wissenschaften fokussiert die Erklärung bestehender Wirklichkeiten. In diesem Rahmen sind die Theorieentwicklung sowie deren Prüfung essentiell, um diese bestehenden Wirklichkeiten zu erklären. Anwendungsorientierte Wissenschaften dagegen entwerfen neue mögliche Realitäten. Das Postulat der Wertfreiheit ist in der angewandten Wissenschaft nicht einhaltbar. Ihre Aussagen sind normativ und dementsprechend wertend, während diese in der empirischen Grundlagenforschung beschreibend und wertfrei sind. Die Praxis ist nicht wertfrei und daher wäre eine wertfreie Wissenschaft für diese auch nicht zielführend. Während theoretische Wissenschaften auf wahre wissenschaftliche Aussagen zielen, wird bei der anwendungsorientierten Forschung in erster Linie der Nutzen der erschaffenen Wirklichkeiten fokussiert. Während die theoretischen Wissenschaften die Allgemeingültigkeit, den Bestätigungsgrad sowie die Erklärungs- und Prognosekraft von Theorien als Fortschrittskriterien definieren, beschreiben die angewandten Wissenschaften die praktische Problemlösungskraft von Gestaltungsmodellen und Regeln. Das Ziel besteht darin, die Entscheidungs- und Handlungsmethoden für die erarbeiteten Problemlösungen nicht nur

³² Vgl. Lamnek (2005), S. 249 f.; Spens und Kovács, S. 376

³³ Vgl. Kornmeier (2006), S. 36 f.

³⁴ Vgl. Spens und Kovács, S. 376 ff.

³⁵ Vgl. Ulrich (1998), S. 163; Ulrich (2001), S. 220 f.

³⁶ Vgl. Ulrich (1984), S. 179 f.

³⁷ Ulrich (2001), S. 220 f.

der Wissenschaft, sondern insbesondere der Praxis zugänglich zu machen.³⁸ Die Logistik als Wissenschaftsdisziplin ist den angewandten Wissenschaften zuzuordnen.³⁹

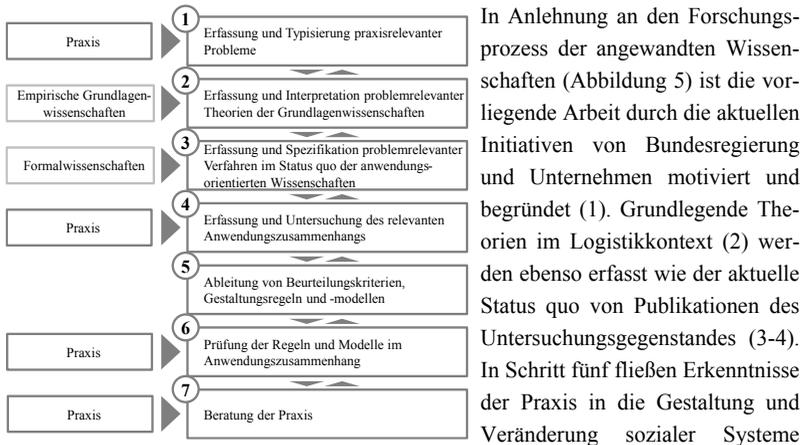


Abbildung 5: Forschungsprozess der angewandten Wissenschaften⁴⁰

mittels der Entwicklung eines cyber-physischen Logistiksystems ein. Die wissenschaftsbasierten Erkenntnisse münden durch Rückkopplung mit der Praxis in die Anpassung des Gestaltungsansatzes (6) sowie in die Formulierung von Handlungsempfehlungen (7). Für den Forschungsprozess ist nach der Identifikation eines geeigneten Untersuchungsgegenstandes sowie der Formulierung von Forschungsfragen und deren Beantwortung die Auswahl einer oder mehrerer geeigneter Forschungsmethoden notwendig.⁴¹

1.3.2 Forschungsmethodik

Für den Erkenntnisgewinn betriebswirtschaftlicher Forschung können quantitative und/oder qualitative Methoden zum Einsatz kommen.⁴² Während quantitative Methoden mehrheitlich anhand numerischer Daten für die Hypothesenprüfung während der Deduktion für die Beantwortung von „Was“-Forschungsfragen genutzt werden, werden qualitative Methoden zur Beantwortung von explorativen „Wie“- und „Warum“-Forschungsfragen eingesetzt.⁴³ Die qualitative Forschung verbalisiert die Erfahrungswirklichkeit und wertet sie interpretativ aus, indem ihre Forschungslogik sowohl der Induktion wie auch der Abduktion folgen kann. Sie unterstützt die Konkretisierung und lässt Subjektivität gelten. Qualitative Methoden sind den explorativen Untersuchungen

³⁸ Vgl. Ulrich (1998), S. 163; Ulrich (2001), S. 220 f.

³⁹ Vgl. Straube (2014), S. 5

⁴⁰ Vgl. Ulrich (2001), S. 195

⁴¹ Vgl. Golicic et al. (2005), S. 20

⁴² Vgl. Mayring (2002), S. 9

⁴³ Vgl. Spens und Kovács, S. 382 ff.

zuzuordnen und haben das Ziel, Hypothesen in einem verhältnismäßig unerforschten Gebiet zu entwickeln bzw. theoretische oder begriffliche Vorbedingungen für die Hypothesen zu schaffen.⁴⁴ Aufgrund der Aktualität des kaum erforschten Konzeptes I4.0 mit logistischem Bezug liegt der Methodenschwerpunkt auf (abduktiv) qualitativen Methoden zur Beantwortung der Forschungsfragen. Der angewandte Forschungsansatz folgt damit den Grundsätzen qualitativer Sozialforschung, teilt die „*Forderung stärkerer Subjektbezogenheit der Forschung, die Betonung der Deskription und der Interpretation der Forschungssubjekte, die Forderung, die Subjekte auch in ihrer natürlichen, alltäglichen Umgebung (statt im Labor) zu untersuchen, und schließlich die Auffassung von der Generalisierung der Ergebnisse als Verallgemeinerungsprozess.*“⁴⁵ Abbildung 6 zeigt die verwendeten Forschungsmethoden im Forschungsrahmen bzgl. Relevanz (R) des Themas und den sechs sekundären Forschungsfragen (F) auf.

Methode \ R & F	R	1	2	3	4	5	6
(Systematische) Literaturanalyse							
Einzelbefragung	a					c	
Gruppenbefragung							
Fallstudienforschung					b		

R: Relevanz F: Forschungsfrage a, b, c: Einzelbefragung/Experteninterviews

Abbildung 6: Methodeneinsatz⁴⁶

Die **systematische Literaturanalyse** in Anlehnung an *DURACH*⁴⁷ dient zunächst der Analyse von Motivation und Relevanz sowie zur Begründung des Forschungsvorhabens. Aufgrund der geringen wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit der Logistik und explizit von CPLS im Kontext von I4.0 dient die systematische Literaturanalyse zudem der Beantwortung der zweiten und dritten sekundären Forschungsfrage zur Identifikation, Beschreibung und Abgrenzung von Konzepten, Technologien und Techniken sowie der Eigenschaften und Anforderungen im Untersuchungsgegenstand. Aufgrund der Neuartigkeit der Problemstellung und dem daraus resultierenden Fehlen einer breiten wissenschaftlichen Basis wurde auf das Schneeballverfahren zurückgegriffen, welches sich zunächst für den Aufbau einer breiten Wissensbasis sowie der Identifikation der relevanten Autoren und der mit I4.0 verbundenen Konzepte eignet. Für die Literaturanalyse wurden drei Basiswerke aus den Jahren 2013 und 2014 sowie deren Referenzen analysiert. Dieses Vorgehen soll die Risiken von Lücken und fehlender Aktualität

⁴⁴ Vgl. Bortz und Döring (2006), S. 296 ff.; Lamnek (2005), S. 295

⁴⁵ Vgl. Mayring (2002), S. 19 ff.

⁴⁶ Eigene Darstellung.

⁴⁷ Das detaillierte Vorgehen in Anlehnung an Durach (2016), S. 23 ff. erfolgt in Kapitel 3.

der verwendeten Basiswerke ausgleichen.⁴⁸ Zusätzlich wurde auf die Ergänzung älterer sowie neuester Literatur außerhalb der Basiswerke zurückgegriffen. Die identifizierte Literatur wird einer qualitativen Inhaltsanalyse unterzogen, mit deren Hilfe ein Kategoriensystem entwickelt, systematisch analysiert, gefiltert und kontinuierlich während des Analyseprozesses erweitert und angepasst wird. Zentrale Aussagen werden selektiert und unverändert übernommen. Die Forschungsfragen erhalten durch das elaborierte strukturierte Suchraster eine relevante Informationsbasis. Die qualitative Inhaltsanalyse hilft somit, die Menge an generierten Inhalten zu systematisieren, zu reduzieren und den für den Untersuchungsgegenstand förderlichen Zielfindungsprozess zu strukturieren.⁴⁹

Die **Gruppenbefragung**⁵⁰ dient im Rahmen der vierten Forschungsfrage der Erforschung von Anforderungen und Eigenschaften aus der Perspektive des Logistikmanagements, die in der Wissenschaft bisher kaum stattgefunden hat. Die gewonnenen Erkenntnisse werden mit den Ergebnissen aus Literatur und Fallstudien abgeglichen, zusammengefasst und vereinheitlicht. Für die interaktive Arbeit einer begrenzten Teilnehmerzahl sind Gruppenbefragungen und deren Auseinandersetzung mit praktischen Problemstellungen in interdisziplinärer Zusammensetzung geeignet. Gruppendiskussionen unterstützen den Austausch von Wissen sowie die Möglichkeit der Diskussionsführung und der Schaffung eines gemeinsamen Verständnisses konkreter Fragestellungen.⁵¹ Die Befragung wird um die Moderationsmethode ergänzt. Der moderierte und strukturierte Gruppendiskussionsprozess wird durch schriftliche Befragungen, Kreativitätsmethoden und Visualisierungen erweitert werden. In der explorativen Forschung wird die Nutzung der Moderationsmethode im Rahmen von Gruppendiskussionen explizit empfohlen.⁵² Der Moderator gewährleistet eine aktive Teilnahme, um von jedem Experten Erfahrung und Wissen generieren zu können. Das anonyme Aufnahmeverfahren reduziert die Beeinflussung der Teilnehmer untereinander. Die anschließende Gruppendiskussion unterstützt die Ausarbeitung einer standardisierten Diskussionsgrundlage für das weitere Vorgehen.⁵³ Nachteilig kann sich die gegenseitige Beeinflussung durch z. B. dominante Teilnehmer auswirken, so dass die Rolle des Moderators von besonderer Relevanz ist.

Die **Einzelbefragung** wird zunächst im Rahmen der Relevanzermittlung durch leitfadengestützte Interviews (a) eingesetzt. Für die Forschungsfragen vier und fünf unterstützt sie in der explorativen Fallstudienforschung (b) die Beantwortung des „*Warum*“ und „*Wie*“ bzgl. des Einsatzes von I4.0. Die dritte Einzelbefragung (c) dient in Anlehnung an den Forschungsprozess der angewandten Wissenschaften nach *ULRICH* (Abschnitt 1.3.1) der Validierung des Gestaltungsansatzes für das CPLS. Die Einzelbefra-

⁴⁸ Vgl. Straube (2014), S. 14

⁴⁹ Vgl. Gläser und Laudel (2009), S. 199 ff.; Mayring (2002), S. 114 ff.

⁵⁰ Das detaillierte Vorgehen wird im Rahmen der empirischen Analyse erläutert.

⁵¹ Vgl. Bruhn (2012), S. 1224

⁵² Vgl. Bortz und Döring (2006), S. 319 f.

⁵³ Vgl. Lloyd (2011), S. 107

gung als problemzentriertes Interview bezieht sich auf einen klar definierten Ausschnitt gesellschaftlicher Probleme, deren objektive Seite im Vorhinein analysiert wird.⁵⁴ Durch einen Interviewleitfaden werden die Interviewten sensibilisiert, durch die offene Gestaltung bleiben die Antworten ohne Vorgaben.⁵⁵ Der Leitfaden dient als Rahmen der Interviewdurchführung und erhöht die Vergleichbarkeit der Daten. Um den Prinzipien von Offenheit und Flexibilität qualitativer Forschung gerecht zu werden und um eine Vorstrukturierung vornehmen zu können, werden die Leitfadeninterviews mit offenen Fragen durchgeführt.⁵⁶ Für die Reduzierung des Materialumfangs wird der Leitfaden mit der Systematisierung der qualitativen Inhaltsanalyse abgeglichen.⁵⁷ In die Entwicklung des Leitfadens flossen neben theoretischen Vorüberlegungen Erkenntnisse aus der eingehend analysierten Literatur in Bezug auf die Zielstellung der Arbeit ein. Als Vorteile sind die Anpassungs- und Reflexionsfähigkeit von Einzelbefragungen bei kaum erforschten Themengebieten der qualitativen Forschung zu nennen. Nachteile durch Interviewer oder Interviewten können z. B. durch unterschiedliche Tonfälle oder fehlende Erfahrung entstehen. Der Befragte seinerseits kann Antwortverfälschungen herbeiführen, um z. B. den Interviewer zu imponieren.⁵⁸

Einzelbefragungen in Form von Interviews unterstützen die hier angewendete **Fallstudienmethodik**.⁵⁹ Exploratorische Fallstudien kommen bei neuen Themenfeldern sowie der Untersuchung von Zusammenhängen zur Anwendung. Dadurch unterstützen sie „*Warum*“- und „*Wie*“-Fragestellungen⁶⁰, wie es bei qualitativen Forschungsmethoden gefordert wird. Die Fallstudienmethodik dient somit zur Beantwortung der vierten sekundären Forschungsfrage, um den Status quo des I4.0-Einsatzes in der Logistik sowie Anforderungen und Eigenschaften aus der Praxis heraus zu ermitteln. Die Fallstudienmethode erforscht Phänomene aus der Praxis, deren Bezugssystem nicht eindeutig abgegrenzt ist. Die Untersuchung sollte sich auf eine Vielzahl von Datenquellen beziehen, um möglichst viele Variablen komplexer Fragestellungen zu untersuchen.⁶¹ Die Datensammlung kombiniert verschiedene Quellen, wie z. B. Unternehmensmaterial, Interviews oder Beobachtungen. Diese Arbeit wird sich im Rahmen der Fallstudie auf die Durchführung von Interviews sowie die Auswertung von nicht-/öffentlichen Dokumenten der partizipierenden Unternehmen stützen. Anwendung findet die Mehrfachfallstudie („Multiple Case Design“), um mögliche methodische Schwächen der geringen empirischen Anzahl von Untersuchungen auszugleichen. Die Fokussierung auf nur einen spezifischen Fall kann zu falschen Schlüssen führen, die durch die Nutzung unterschiedlicher Perspektiven mehrerer Fälle abgeglichen werden soll. Mehrere Fallstudien

⁵⁴ Vgl. Mayer (2002), S. 37

⁵⁵ Vgl. Mayring (2002), S. 69

⁵⁶ Vgl. Bähring et al. (2008), S. 941 ff.; Gläser und Laudel (2009), S. 12; Mayer (2002), S. 42 ff.

⁵⁷ Vgl. Mayring (2002), S. 94 f.

⁵⁸ Vgl. Bortz und Döring (2006), S. 243 ff.

⁵⁹ Das detaillierte Vorgehen wird im Rahmen der empirischen Analyse (Kapitel 4) erläutert.

⁶⁰ Vgl. Meyer (2003), S. 476

⁶¹ Vgl. Yin (2003), S. 13 f.

erhöhen die Reproduzier- und Generalisierbarkeit von möglichen Erkenntnissen⁶² und erfüllen somit u. a. die geforderte Triangulation. Die Anwendung der Fallstudienforschung bietet sich insbesondere bei der Betrachtung primär qualitativer und subjektiver Problemstellungen an, deren wissenschaftlicher Erkenntnisstand aufgrund geringer Strukturiertheit und Formalisierung zunächst exploratorisch erfasst und verstanden werden muss.⁶³ Das aktuelle und kaum erforschte Konzept I4.0 bietet sich daher für die Fallstudienforschung explizit an.

⁶² Vgl. Eisenhardt (1989), S. 534 f.; Yin (2003), S. 53

⁶³ Vgl. Meyer (2003), S. 478

2 THEORETISCHES BEZUGSSYSTEM

Kapitel 2 setzt sich mit dem theoretischen Bezugssystem der Arbeit auseinander. Zunächst werden in Abschnitt 2.1 die Theorien und Lehren der Systemtheorie, Kybernetik, Netzwerktheorie sowie der Managementlehre beschrieben. Abschnitt 2.2 bindet Theorien und Lehren in das Begriffsverständnis der Logistik ein und spezifiziert die Abgrenzung des Untersuchungsgegenstandes. In Abschnitt 2.3 werden relevante Technologien der industriellen Logistik vorgestellt. Die Auswirkungen von Entwicklungen in Logistik und Technologien münden in Abschnitt 2.4 in die Beantwortung der ersten sekundären Forschungsfrage:

F.1 Welche Auswirkungen im Kontext von Industrie 4.0 können für das Logistikmanagement festgestellt werden?

Die Auswirkungen werden anhand von Trends, Herausforderungen und erwarteten Anwendungspotenzialen im Kontext von I4.0 beschrieben. Kapitel 2 schließt mit einer Abgrenzung und Zusammenfassung.

2.1 Theorien und Lehren

Tabelle 1 zeigt die forschungsleitenden Theorien bzw. Lehren des theoretischen Bezugssystems, auf die im Folgenden detailliert eingegangen wird.

Allgemeine Systemtheorie	Kybernetik	Netzwerktheorie	Managementlehre
Lehre vom Aufbau und der Klassifikation von Systemen	Lehre von der Struktur und dem Verhalten dynamischer Systeme	Lehre von der Netzwerkanalyse zwischen Akteuren und deren Mustern	Lehre vom Gestalten und Lenken zweckorientierter sozialer Systeme

Tabelle 1: Relevante Theorieansätze⁶⁴

Systemtheorie und **Kybernetik** bieten Erklärungsansätze für die Planung und Steuerung von Systemen, den zugehörigen Elementen und der Abgrenzung zur Umwelt. Diese Arbeit bedient sich der Systembetrachtung für die Smart Factory als System von Systemen und den darin zu gestaltenden CPLS. Die **Netzwerktheorie** ermöglicht die Betrachtung der entstehenden kurz- bis langfristigen Netzwerke aus Systemelementen. Für die entstehenden Wechselwirkungen zwischen den Elementen bedarf es im betrieblichen Umfeld etablierter Regelwerke, mit denen Zielkonflikte vermieden und Verantwortlichkeiten geregelt werden. Die **Managementlehre** ermöglicht Erklärungsansätze für die Planung, Steuerung und Kontrolle des Gesamtsystems Smart Factory bzw. der CPLS sowie der darin befindlichen Elemente.

⁶⁴ Vgl. Stegbauer (2010), S. 48; Ulrich (2001), S. 244

2.1.1 Systemtheorie

Nach SCHWANINGER ist die „Systemtheorie [...] eine formale Wissenschaft von der Struktur, den Verknüpfungen und dem Verhalten komplexer Systeme“⁶⁵, die sich auf den Aufbau und die Planung und weniger auf die Steuerung von Systemen konzentriert.⁶⁶ Das Ziel liegt in der Unterstützung der Lösungsfindung für komplexe Fragestellungen, einem Ordnungssystem für Prozesse und Aktivitäten sowie in der Entwicklung einheitlicher, allgemeingültiger Betrachtungsebenen. Dieser Rahmen hilft, die unterschiedlichen Untersuchungsgegenstände miteinander zu vergleichen und zu systematisieren.⁶⁷ Die systemorientierte Managementlehre wird „als Mittler zwischen Theoriebildung und Grundlagenforschung einerseits, der Unternehmenspraxis andererseits“⁶⁸ verstanden. Die Systemtheorie unterstützt die Entwicklung eines Bezugssystems für einen ganzheitlichen, integrierten Ansatz für die Managementlehre.⁶⁹

Nach BERTALANFFY besteht ein System aus einer Vielzahl von Elementen, die miteinander in Beziehung stehen.⁷⁰ Analog besteht für KRALLMANN *et al.* ein System „aus einer Menge (im mathematischen Sinne) von Elementen, die durch eine Menge von Relationen miteinander verbunden sind“.⁷¹ Systemelemente sind fundamentale Eigenschaftsträger der untersten Betrachtungsebene bestimmter Objekte der Realität. Existierenden Wirkungszusammenhänge zwischen unterschiedlichen Elementen, stellen diese Relationen die Funktion des Elementes dar, bei denen mindestens ein Output einem Input entspricht. Input meint in diesem Kontext den Einfluss der Umwelt auf ein System, Output den Einfluss eines Systems auf die Umwelt. Die Systemgrenze ist durch die inhärenten Systemelemente determiniert.⁷² Von geschlossenen und offenen Systemen werden selbstreferentielle Systeme (Abbildung 7) unterschieden.

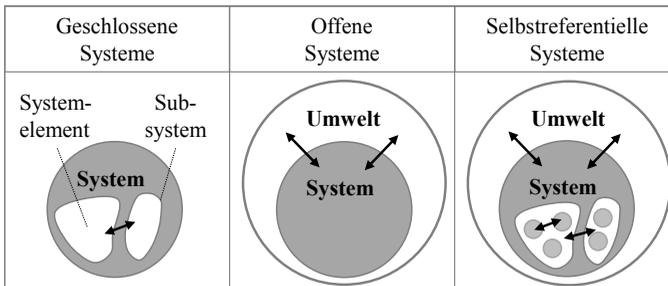


Abbildung 7: Unterschiede von Systemgrenzen⁷³

⁶⁵ Schwaninger (2004), S. 4

⁶⁶ Vgl. Schwaninger (2004), S. 4

⁶⁷ Vgl. Bertalanffy (1969), S. 34; Ulrich (2001), S. 42

⁶⁸ Ulrich (2001), S. 59

⁶⁹ Vgl. Ulrich (2001), S. 59f.

⁷⁰ Vgl. Bertalanffy (1969), S. 18

⁷¹ Krallmann *et al.* (2002), S. 24

⁷² Vgl. Krallmann *et al.* (2002), S. 24f.

⁷³ Vgl. Brosze (2011), S. 17f.; Steffens (2014), S. 110f.

Geschlossene Systeme streben einen Gleichgewichtszustand an und sind durch undurchlässige Systemgrenzen sowie eine hierarchische Struktur charakterisiert. Offene Systeme dagegen besitzen durchlässige Systemgrenzen, tauschen sich mit der Umwelt aus und passen sich dieser durch Selbstorganisation und -optimierung an. Selbstreferentielle Systeme können sowohl offen als auch geschlossen sein. Zentral sind bei diesen Systemen die Elemente und deren Verknüpfungen.⁷⁴ Elemente bzw. ihre Systeme können auf gleichen oder unterschiedlichen Hierarchiestufen in Wechselbeziehung zueinander stehen. Diese Beziehungen können auf den horizontalen oder vertikalen Hierarchieebenen existieren. Ob ein System als dynamisch oder statisch klassifiziert wird, hängt von der zeitlichen Stabilität von Merkmalen der Beziehungen und Elemente ab. Ist diese konstant und unverändert, handelt es sich um ein stabiles System. Verändern sich hingegen die Relationen im Zeitverlauf, ist das System dynamisch.⁷⁵

2.1.2 Kybernetik

Die Kybernetik zielt auf die Gestaltung und Steuerung dynamischer Systeme ab.⁷⁶ Sie „ist die Wissenschaft von Kommunikation und Regelung.“⁷⁷ Die Unternehmensführung ist eng mit der Gestaltung und Lenkung von dynamischen Systemen verknüpft, daher ist es erstrebenswert, kybernetische Überlegungen für die Unternehmensführung zu übernehmen. *BROSZE* erweitert das Verständnis der Kybernetik als Wissenschaft und nennt neben der Lenkung die Anpassung und Kommunikation von Systemen als Aufgaben.⁷⁸ Tabelle 2 zeigt die Unterschiede von Kybernetik und Systemtheorie.

Kybernetik	Systemtheorie
Ursprung aus diversen Wissenschaften, speziell der Regelungstechnik und künstlichen Intelligenz	Ursprung vordergründig in Naturwissenschaften, speziell der Biologie
Grundlage sind alle möglichen Systemzustände mit ihrer Kommunikationsstruktur unabhängig von der tatsächlichen Realisierbarkeit	Grundlage sind existierende und tatsächliche Systeme
Untersucht Verhalten, Prozesse und zirkuläre Kommunikation	Untersucht bei Gesamtheiten und Teilen deren Interaktionen und Hierarchien
Funktionsweise und Lenkung, Anpassung und Kommunikation von dynamischen Systemen	Aufbau und Planung (Ebenen) von statischen und dynamischen Systemen

Tabelle 2: Unterschiede Systemtheorie und Kybernetik⁷⁹

Die Steuerung von Prozessen ist in der Kybernetik mit dem Regelkreis verknüpft. Bei diesem werden ermittelte Ausgangsgrößen in Form von Ist-Werten an die Regelinstanz „rückgekoppelt“, um mit den definierten Soll-Werten abgeglichen zu werden. Sind Ab-

⁷⁴ Vgl. Steffens (2014), S. 110 f.

⁷⁵ Vgl. Krallmann et al. (2002), S. 26 f.

⁷⁶ Vgl. Ulrich (2001), S. 42 f.

⁷⁷ Beer (1962), S. 21

⁷⁸ Vgl. Brosze (2011), S. 19

⁷⁹ In Anlehnung an Brosze (2011), S. 16; Duffy (1984), S. 35; Schwaninger (2004), S. 4 f.

weichungen identifiziert, werden Korrekturmaßnahmen vorgeschlagen oder direkt eingeleitet. Die anvisierten Prozesskorrekturen können immer nur rückblickend auf Grundlage historischer Daten ausgeführt werden. Um prospektiv agieren zu können, existiert das Prinzip der Vorkopplung, durch das den Auswirkungen möglicher Störungen im Vorfeld durch antizipative Entscheidungen begegnet werden kann.⁸⁰ Der Rückkopplungsprozess beginnt mit der Zieldefinition. Anschließend wird jedes Ziel kontinuierlich auf Zielerreichung und -abweichung hin kontrolliert (Soll-Ist-Abgleich). Am Ende des Prozesses fließen Informationen wieder in den Anfangszustand für eine etwaige Zielanpassung ein (Rückkopplung). Alle drei Phasen sind in einem Regelkreis durch eine Kontrollschleife verknüpft. Die kontinuierlich zirkulierenden Informationen über die Prozessergebnisse werden in definierten Intervallen zwischen Quelle und Senke ausgetauscht. So wird eine Selbstregelung des Systems angestrebt, die unabhängig von Einwirkungen der Umwelt ist. Entsteht eine Kommunikation mit der Umwelt, wird ein offener Regelkreis mit den entsprechenden Schnittstellen definiert.⁸¹

Nach *SIMON* wird die Konzeption technischer Rückkopplungssysteme als Kybernetik erster Ordnung bezeichnet.⁸² Diese erforscht die „*Steuerung und Regelung des Verhaltens von Systemen, die von ihrer Umwelt und vom Beobachter isoliert sind*“⁸³, d.h. der Regler ist nicht Teil des Systems. Seine Aufgabe besteht in der Einflussnahme auf in der Umwelt begründete Störungen. Er selbst wird von einer Führungsinstanz überwacht, die über Variation der Einflussgrößen auf den Regler einwirkt.⁸⁴ Die dadurch generierte Perspektive für Anpassungsmaßnahmen ermöglicht es, das selbstregelnde System in ein selbstorganisiertes umzuwandeln.⁸⁵ Der Integration des Beobachters trägt die Kybernetik zweiter Ordnung Rechnung, in der die Selbstorganisation, Autonomie sowie die Befähigung zur Selbststeuerung (z.B. sozialer Systeme) im Vordergrund stehen.⁸⁶ Diese erforscht die „*Steuerung und Regelung des Verhaltens in den übergeordneten Systemen, die entstehen, wenn man den Beobachter mit einschließt*“⁸⁷, d.h. der Regler und das beobachtete System sind Teil des übergeordneten Systems. Damit kann der Regler innerhalb des definierten Zielkorridors eigenständige Entscheidungen fällen. Durch die Abkehr von der Trennung von Beobachter und beobachtetem System kann die Analyse, Auswertung und Entscheidungsfindung zur Realisierung des selbstorganisierten Systems beitragen.⁸⁸

Während sich die Systemtheorie auf den Aufbau und die Planung von Systemzielen, -grenzen sowie -elementen und die Kybernetik sich auf die Steuerung, Kontrolle

⁸⁰ Vgl. Brosze (2011), S. 19 f.

⁸¹ Vgl. Duffy (1984), S. 35 f.

⁸² Vgl. Simon (2013), S. 18

⁸³ Simon (2013), S. 41 f.

⁸⁴ Vgl. Schwaninger (1994), S. 23

⁸⁵ Vgl. Beer (1979), S. 63 ff.

⁸⁶ Vgl. Schwaninger (1994), S. 23 f.

⁸⁷ Simon (2013), S. 41 f.

⁸⁸ Vgl. Brosze (2011), S. 20

und Anpassung dynamischer, heterarchischer Systeme im Regelkreis konzentriert, fokussiert die Netzwerktheorie den Aufbau von Netzwerken, die aus Systemen bestehen.

2.1.3 Netzwerktheorie

In der Managementpraxis wird im Kontext von Netzwerken häufig die vernetzte Zusammenarbeit thematisiert. Der Begriff „Netzwerk“ ist in der Wissenschaft nicht einheitlich definiert und wird in unterschiedlichen Zusammenhängen dargestellt.⁸⁹ Dementsprechend ist die junge Wissenschaftsdisziplin der Netzwerkanalyse und Netzwerktheorie ebenfalls unbestimmt.⁹⁰ Netzwerktheoretische Ansätze wurden ursprünglich in der Soziologie zur Beschreibung und Analyse sozialer Netzwerke entwickelt.⁹¹ „Bei der Analyse sozialer Netzwerke [...] handelt es sich sowohl um eine Reihe von formalen Verfahren zur Analyse von Beziehungen zwischen Akteuren und deren Mustern als auch um eine Theorieperspektive auf eben solche Beziehungen.“⁹² Die Netzwerkanalyse adressiert somit Aspekte der Systemtheorie und Kybernetik. Neben der Untersuchung sozialer Beziehungen und der Identifikation von Mustern, thematisiert die Netzwerkanalyse als empirische Methode die Analyse von Voraussetzungen und Konsequenzen dieser Muster sowie die Strukturierung und -beschreibung.⁹³ Diese Ansätze können nach THOM als Beschreibungsmodelle genutzt werden, um Unternehmensnetzwerke zu erforschen.⁹⁴

Nach MILES und SNOW ist ein Unternehmensnetzwerk „a unique combination of strategy, structure and management processes“⁹⁵, welche in ein Netz von Unternehmen oder Organisationseinheiten eingeflochten sind.⁹⁶ Unterschieden wird zwischen inter- und intraorganisationalen Netzwerktypen. Der interorganisationale Netzwerkbegriff untersucht die Vernetzung rechtlich unabhängiger Unternehmen.⁹⁷ Intraorganisationale Netzwerke dagegen fokussieren die Vernetzung innerhalb des Unternehmens zwischen unterschiedlichen Modulen, Einheiten oder Abteilungen.⁹⁸ Diese Module, Einheiten oder Abteilungen in internen Netzwerken tauschen Leistungen zu einem Marktpreis untereinander aus. Die dadurch häufig entstehende Modularisierung von Leistungsstellen ist gekennzeichnet durch dezentrale Organisationsmodule, die eine eigene Ergebnisverantwortung haben.⁹⁹ Die zentrale und dezentrale Planung, Steuerung und Kontrolle von Modulen, Einheiten oder Abteilungen in internen Netzwerken sind Funktionen der Managementlehre.

⁸⁹ Vgl. Sydow (1993), S. 61

⁹⁰ Vgl. Stegbauer (2010), S. 11

⁹¹ Vgl. die Ausführungen von Sparsam (2015); Stegbauer (2010); Sydow (2003)

⁹² Stegbauer (2010), S. 48

⁹³ Vgl. Sydow (1993), S. 121

⁹⁴ Vgl. Thom (2007), S. 25

⁹⁵ Miles und Snow (1986), S. 62

⁹⁶ Vgl. Sydow (2003), S. 1

⁹⁷ Vgl. Sydow und Windeler (1997), S. 8 f.

⁹⁸ Vgl. Sydow (1993), S. 57 f.

⁹⁹ Vgl. Thom (2007), S. 26

2.1.4 Managementlehre

HUNGENBERG und *WULF* stellen die Koordination von Menschen im Unternehmen in den Vordergrund und betonen deren Einflussnahme auf das Gesamtunternehmen auf allen Hierarchiestufen (untere, mittlere, obere Führungsebene). Die Unternehmensführung stufen sie als Institution ein. Neben der institutionellen Einordnung gilt die Führung eines Unternehmens als Funktion oder Tätigkeit. Zur Unterstützung der Entscheidungsfindung dienen die drei Hauptaufgaben Planung, Steuerung und Kontrolle. Für den Führungsprozess stellt die Planung den Ausgangspunkt dar. Hier werden Ziele bestimmt, Analysen durchgeführt sowie Strategien und Maßnahmen formuliert, bewertet und ausgewählt. Die Steuerung dient der Verknüpfung von Planung und Umsetzung. Sie fokussiert die Festlegung von Verantwortlichkeiten sowie die Steuerung der Mitarbeiter. Im Rahmen der Erfolgskontrolle werden Ergebnisse und deren Abweichungen vom Ziel kontinuierlich überprüft. Liegen Abweichungen vor, werden etwaige Gegenmaßnahmen ergriffen. Die Kontrolle finalisiert den Kreisprozess und stößt gleichzeitig eine erneute Planung an.¹⁰⁰

MALIK weist auf die häufige Beschränkung der Management-Disziplin auf das Führen von Menschen hin. Er plädiert hingegen für einen erweiterten Begriff. Das Management soll nicht nur auf das Führen von Menschen, Gruppen oder Teams beschränkt sein, sondern muss die Gesamteinstitution berücksichtigen und dementsprechend als Unternehmensführung bzw. als Führen von Organisationen verstanden werden. Nach *MALIK* liegen die Aufgaben des Managements in der Zieldefinition, der Organisation, der Entscheidung, dem Kontrollieren und der Entwicklung von Mitarbeitern.¹⁰¹

ULRICH unterteilt die Teilfunktionen des Managements in Lenken, Gestalten und Entwickeln. Diese werden in Bezug auf Hierarchiestufen beschrieben, da wesentliche Unterschiede der Funktionen in der zeitlichen und inhaltlichen Reichweite der angestrebten Zielerreichung liegen. Während sich die Funktion der Entwicklung auf der strategischen, d. h. oberen Führungsebene bewegt, ist die Lenkung auf der operativen Managementebene angesiedelt. Die Gestaltungsfunktion ist keiner der Ebenen eindeutig zuordenbar, vielmehr hat sie die Aufgabe, die operativen Systeme so zu gestalten, dass sie innerhalb des Zielkorridors für die strategische Führungsebene lenkfähig sind. Ein Gestaltungsmodell, in dem die Auswahl von Menschen und Objekten aus der Umwelt und deren Darstellung als Komponenten eines Systems mit ihren spezifischen Merkmalen in einer noch zu entwerfenden Wirklichkeit verknüpft sind,¹⁰² wird in die Gestaltung des cyber-physischen Logistiksystems einfließen.

Die Betriebswirtschaftslehre als Management- und Führungslehre thematisiert die Gestaltung, Lenkung sowie die Entwicklung von sozialen Systemen,¹⁰³ d. h. Unterneh-

¹⁰⁰ Vgl. Hungenberg und Wulf (2011), S. 21 f.

¹⁰¹ Vgl. Malik (2005), S. 45 f.

¹⁰² Vgl. Ulrich (2001), S. 66 ff.

¹⁰³ Vgl. Ulrich (1984), S. 168

men.¹⁰⁴ Unternehmen werden überwiegend hierarchisch mittels einer oder mehrerer Leitungsebenen koordiniert. Die oberste Ebene hat die Aufgabe, die strategischen Ziele und Pläne für das Unternehmen mit langfristigem (ca. fünf Jahre) Planungshorizont festzulegen. Auf der zweiten Ebene des mittleren Managements werden taktische, d. h. mittelfristige (bis zu drei Jahren) Pläne ausgearbeitet, um die Strategien der oberen Ebene umzusetzen. Die operativen Manager realisieren und überwachen die taktischen Pläne. *ALPAR et al.* betonen die Abnahme hierarchischer Organisationen und die sinkende Überwachung und Weitergabe von Informationen durch die Leitungsebene. Ziel ist die Führung möglichst vieler Mitarbeiter durch wenige Führungskräfte. Der wachsende Einsatz von Informationssystemen unterstützt diesen Prozess,¹⁰⁵ der Einfluss auf cyber-physische Logistiksysteme haben wird.

2.2 Logistik

Für die Abgrenzung des Untersuchungsgegenstandes soll der definitorischen Beschreibung der Logistik von *STRAUBE* gefolgt werden: „*Logistik umfasst die Gestaltung des Wertschöpfungsnetzwerks sowie die Planung des Kundenauftragsprozesses und die Erfüllung von Kundenaufträgen. Die dabei zum Einsatz kommenden Informationssysteme, Technologien und Managementkonzepte dienen der Ausrichtung aller an der Leistungserstellung beteiligten Akteure und Prozesse auf die Kundenanforderungen hinsichtlich Servicequalität, Kundennutzen, Kosteneffizienz und Nachhaltigkeit*“¹⁰⁶. Das übergeordnete Unternehmensziel der Erhöhung der Produktivität mit den Dimensionen Qualität, Kosten und Zeit sowie Erfüllung und Erhöhung der Kundenzufriedenheit gilt gleichfalls in der Logistik.¹⁰⁷ Dafür ist es essentiell, Kundenwünschen und deren Schwankungen gerecht zu werden. *STRAUBE* und *PFOHL* betonen daher die Erfüllung der Kundenanforderungen zur Erreichung eines nachhaltigen Gewinnbeitrages.¹⁰⁸ Der Kunde determiniert den Kundenauftragsabwicklungsprozess (KAP), der nach *BAUMGARTEN* im ganzheitlich integrierten Prozesskettenmodell in Abbildung 8 dargestellt ist. Eine Prozesskette ist durch die Verknüpfung aller Prozesse beschrieben, die einem gemeinsamen Ziel folgen. Ein Prozess definiert sich durch das gemeinsame Wirken von Mensch, Maschine, Material und Arbeitsweise, das in eine spezifische Dienstleistung bzw. Produkt mündet.¹⁰⁹

¹⁰⁴ Vgl. Ulrich (2001), S. 44

¹⁰⁵ Vgl. Alpar et al. (2014), S. 19 f.

¹⁰⁶ Straube (2014a), S. 11

¹⁰⁷ Vgl. Jochem et al. (2015), S. 75; Pfohl (2010), S. 33; Straube (2004), S. 303

¹⁰⁸ Vgl. Pfohl (2010), S. 33; Straube (2014a), S. 10

¹⁰⁹ Vgl. Baumgarten und Darkow (2000), S. 4 ff.

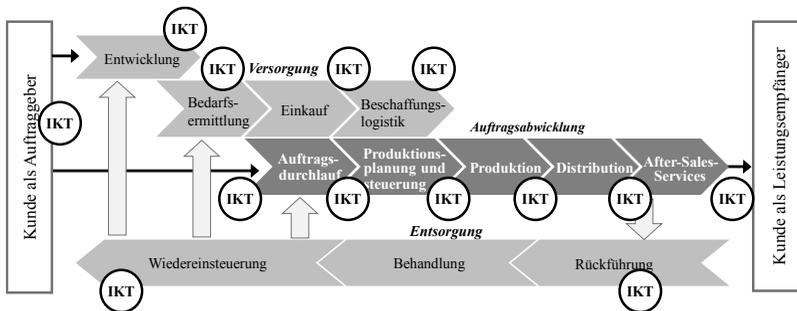


Abbildung 8: Prozesskettenmodell der Logistik¹¹⁰

Ausgangspunkt des Prozesskettenmodells ist der Kunde als Auftraggeber und Leistungsempfänger. Die drei Systeme des Prozesskettenmodells, die zwischen dem Anfangs- und Endkunden zur Erfüllung der Kundenanforderungen stehen, setzen sich aus der Versorgung, der Auftragsabwicklung sowie der Entsorgung zusammen. Die drei Subsysteme einer ganzheitlichen Logistik sind sequentiell und parallel miteinander verknüpft. Es entsteht ein Regelkreis¹¹¹, der der Logik der Kybernetik folgt und Wechselwirkungen erzeugt. Die Auftragsabwicklung bildet den Kern der Prozesskette und unterteilt sich in fünf Subsysteme. Die Entsorgung schließt den Regelkreis und gewährleistet die Rückführung der Ressourcen aus der Leistungserstellung der ersten beiden Systeme. Dem Integrationsaspekt widmet sich *STRAUBE*, indem er neben der materialbezogenen Verzahnung der inner- und außerbetrieblichen Leistungserstellung die Gestaltungsbereiche des Prozesskettenmodells um den Aspekt der Informations- und Kommunikationssysteme erweitert. Dem Informationsaspekt der zuvor präsentierten Definition wird so Rechnung getragen. Die Zunahme an Informations- und Kommunikationssystemen wird die Veränderung von „*allen Prozessketten der Logistik und an allen Schnittstellen zu Wertschöpfungspartnern*“¹¹² zur Folge haben. Diese Arbeit untersucht die Veränderungen infolge von I4.0 in der innerbetrieblichen Auftragsabwicklung und den darin zu gestaltenden CPLS.

2.2.1 Logistiksysteme und -netzwerke

Die Betrachtung logistischer Problemstellungen im Rahmen des Systemdenkens stößt in Praxis und Wissenschaft zunehmend auf Interesse. Ziel ist die Erforschung definitorischer, beschreibender, erklärender und gestaltender Ansätze.¹¹³

Logistiksysteme sind durch Akteure (z. B. Industrieunternehmen) gekennzeichnet, deren zahlreiche Standorte (z. B. Fabriken) über Kunden-Lieferanten-Beziehungen verknüpft sind. Ein Logistiksystem kann zwecks Analyse und Darstellung als Netzwerk modelliert

¹¹⁰ In Anlehnung an Baumgarten (2002); Straube (2004), S. 6

¹¹¹ Vgl. Straube (2014a), S. 28

¹¹² Straube (2004), S. 5f.

¹¹³ Vgl. Pfohl (2010), S. 27

werden, welches derart zu gestalten und zu betreiben ist, dass die geforderten Logistikleistungen kostenoptimal erfüllt werden können.¹¹⁴ „Ein Logistiknetzwerk ist eine durch Abstraktion gewonnene, vereinfachte Abbildung eines realen Logistiksystems, wobei Knoten und Pfeile die relevanten Elemente des Realsystems und deren Beziehungen darstellen.“¹¹⁵ Knoten dienen der temporären Speicherung oder zur Überleitung von fließenden Objekten zu anderen Knoten. Die Kanten beschreiben den Bewegungskorridor von Objekten durch das Netzwerk zur Erreichung anderer Knoten.¹¹⁶ Knoten und Kanten zwischen Wareneingang und -ausgang sind z. B. Lager- oder Transportsysteme, die nach *GUDEHUS* einen geringen Vernetzungsgrad in der Fabrik aufweisen.¹¹⁷ In I4.0 dagegen wird eine Erhöhung des Vernetzungs- bzw. Integrationsgrades dieser Systeme erwartet. Nach *MEYER* sind Gestaltungsobjekte von Logistiksystemen

- Organisation (Einheiten und hierarchische Gliederung),
- I&K-Systeme (Erfassung, Verarbeitung und Bereitstellung von Informationen),
- technische Anlagen (Unterstützung der Kernprozesse, z. B. Lagerung) und
- Logistikprozesse (zeitlich/räumliche Transformation von Material- und Informationen).¹¹⁸

Die Hauptaufgabe innerbetrieblicher Logistiksysteme besteht in der „Versorgung und Entsorgung der Maschinen- und Handarbeitsplätze zwischen Wareneingang und Warenausgang“¹¹⁹. In diesem Netzwerk besitzen die Knoten materialfluss- oder produktions-technische Funktionen wie z. B. die Be- und Entladung, Verteilung, Pufferung oder die Lagerung. Die Konzepte der technischen Realisierung unterscheiden sich je nach Branche und beziehen neben dem physischen Materialfluss und der Materialbereitstellung den Informationsfluss mit ein.¹²⁰

In Anlehnung an Abschnitt 2.1 können Gestaltungsobjekte von innerbetrieblichen Logistiksystemen der System-, Technologie- und Netzwerkebene zugeordnet werden. Da Einheiten bzw. Elemente in CPLS technische Anlagen (Objekte) und Mitarbeiter (Subjekte) darstellen können, stehen die System- und Technologieebene in Wechselwirkung. Die Netzwerkebene adressiert diese Wechselwirkung durch die hierarchische Gliederung und deren Regelwerk. Logistikprozesse sind ebenfalls Teil von Logistiksystemen und werden im Rahmen der funktionalen und institutionellen Abgrenzung der innerbetrieblichen Industrielogistik nach *PFOHL* entlang des Materialflusses bzgl. der Beschaffungs-, Produktions- und Distributionslogistik sowie mit den Schnittstellen zu Beschaffungs- und Absatzmarkt betrachtet.¹²¹

¹¹⁴ Vgl. Arnold et al. (2008), S. 934; Gudehus (2010), S. 550

¹¹⁵ Arnold et al. (2008), S. 934

¹¹⁶ Vgl. Pfohl (2010), S. 5

¹¹⁷ Vgl. Gudehus (2010), S. 551

¹¹⁸ In Anlehnung an Meyer (2007), S. 19

¹¹⁹ Arnold et al. (2008), S. 19

¹²⁰ Vgl. Arnold et al. (2008), S. 18 f.

¹²¹ Vgl. Pfohl (2010), S. 14 ff.; Schuh und Stich (2013), S. 7

Die Gestaltungsebenen werden im 5. Kapitel durch den Erkenntniszuwachs der Arbeit weiter spezifiziert und angepasst. Die vorliegende Arbeit untersucht innerbetriebliche Logistiknetzwerke in der Smart Factory, die aus selbstreferentiellen dynamischen Objekt- und Subjektsystemen bestehen. Diese CPLS befähigen das Logistikmanagement, Logistikziele zu erreichen.

2.2.2 Logistikmanagement

Das Logistikmanagement „verfolgt das Ziel der unternehmensübergreifenden ganzheitlichen Planung, Steuerung und Kontrolle sowohl von Informations- und Güterströmen als auch den damit zusammenhängenden Finanzströmen, eine operative Erfüllung von Kundenwünschen sowie das Controlling von Kosten- und Leistungsparametern.“¹²² Gemessen wird die Zielerreichung u. a. an der Produktivität und Kundenzufriedenheit, die sich auf klassische Zielgrößen der Logistik herunterbrechen lassen. Qualität und Kosten sind klassische und zeitlose Zielgrößen. Ihre Priorisierung ist Schwankungen unterworfen. Im Verlauf der letzten Jahrzehnte kamen weitere Ziele wie die Zeit und die Flexibilität des Systems zur proaktiven und reaktiven Anpassung hinzu.¹²³ Neben den strategischen Logistikzielen existieren operative Logistikziele, die sich der Logistikleistung (z. B. Liefertreue und -zeit) und den Logistikkosten (z. B. Bestands- und Prozesskosten) zuordnen lassen.¹²⁴ Um Logistikziele entlang der Auftragsabwicklung zu erreichen sind nach *SCHUH* und *STICH* Erfolgsfaktoren wie die Bedarfs- und Bestandssicherheit sowie die Prozesstransparenz, -sicherheit und -beherrschung zu berücksichtigen. Kernprozesse bilden dabei Transportieren, Umschlagen, Kommissionieren, Verpacken, Lagern und Disponieren.¹²⁵

Für die Zielerreichung hat das Logistikmanagement strategische, taktische (System- und Netzwerkmanagement) sowie operative Logistikaufgaben (System- und Netzwerkbetrieb) zu erfüllen.¹²⁶ Für *STRAUBE* liegt das klassische Aufgabenfeld in der „Auftragsabwicklung, der Beschaffungssteuerung, der Produktionsplanung und -steuerung, der Distributionssteuerung, dem Netzwerkmanagement, der Qualitätssicherungsfunktion, der Produktentwicklung und dem Kundenservicemanagement sowie den hierzu notwendigen Informationssystemen, um übergreifend eine Waren- und Informationsverfügbarkeit gegenüber dem Markt sicherzustellen“¹²⁷. Diese Aufgaben können den Funktionsbereichen der Logistik zugeordnet werden (Abbildung 9).

¹²² Straube (2014a), S. 10

¹²³ Vgl. Straube (2014a), S. 12 f.

¹²⁴ Vgl. Arnold et al. (2008), S. 324; Schuh und Stich (2013), S. 21

¹²⁵ Vgl. Schuh und Stich (2013), S. 9 ff. und S. 21

¹²⁶ Vgl. Gudehus (2010), S. 60 ff.

¹²⁷ Straube (2004), S. 49

	Vertrieb	Beschaffung	Produktion	Distribution	Entsorgung	Entwicklung
Taktisch (mittlerer Planungshorizont)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verkaufsplanung ▪ Bedarfsplanung ▪ Vertriebsprognose 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedarfsplanung ▪ Bestandsplanung ▪ Disposition ▪ Lager/Transport ▪ Beschaffung von Behälter, Verpackung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Produktionsprogramm-, Mengen-, Bestands-, Termin- und Kapazitätsplanung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kapazitäts- und Bestandsplan. ▪ Disposition ▪ Lager/Transport ▪ Kommissionierung ▪ Verpackung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedarfsplanung ▪ Transport ▪ Planung ▪ Entsorgungsprozesse 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Logistikplan. Forschung und Entwicklung ▪ Variantenplanung ▪ Serienintegration
Operativ (kurzer Planungshorizont)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Auftrags-eingang ▪ Auftragssteuerung ▪ Kunden-auskunft 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bestellung/ Abruf ▪ Lieferantenstrg. ▪ Material-anlieferung und -bereitstellung ▪ Transport 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Auftrags-veranlassung und -überwachung ▪ Material-versorgung ▪ Flächendispo. ▪ Transport 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Versandsteuerung ▪ Lagerabwicklung ▪ Bestandsdisposition 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bestandsdispo. ▪ Steuerung ▪ Entsorgungsprozesse ▪ Transportopt. ▪ Retourenstrg. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Logistikdokumentation ▪ Steuerung ▪ Anlaufreife

Abbildung 9: Logistikaufgaben in der Auftragsabwicklung¹²⁸

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Gestaltung cyber-physischer Logistiksysteme der innerbetrieblichen Beschaffungs-, Produktions- und Distributionslogistik (sowie fallweise deren externe Schnittstellen) in produzierenden Unternehmen sowie auf deren Einfluss auf Ziele und Aufgaben der taktischen und operativen Ebene des KAP. Während die taktische Ebene die Planungsaufgaben des KAP umfasst, fokussiert die operative Ebene deren Erfüllung.¹²⁹ Für die Planung, Steuerung und Kontrolle (insbesondere durch Lokalisation und Identifikation von Gütern) des Materialflusses bedarf es vorauseilender (z. B. für Planung und Disposition), begleitender (z. B. operative Ausführung von Transport-, Umschlags- und Lagertätigkeiten) und nacheilender (z. B. Rückmeldung über den Bearbeitungsstand oder die Qualität des Lieferservice) Informationsflüsse.¹³⁰ Diese können einen durchgängigen Auftragsabwicklungsprozess etablieren, der durch logistische Ziele und Aufgaben der Planung, Durchführung, Steuerung und Kontrolle der Material- und Informationsflüsse beeinflusst wird.¹³¹ In Anlehnung an die Systemtheorie bilden logistische Aufgaben die Systemfunktionen zur Generierung von Output (Logistikzielen). Abbildung 10 stellt Planungs-, Steuerungs- und Kontrollaufgaben der innerbetrieblichen Logistik im Regelkreis dar.

¹²⁸ Vgl. Straube (2004), S. 61

¹²⁹ Vgl. Straube (2014a), S. 16

¹³⁰ Vgl. Pföhl (2010), S. 73

¹³¹ Vgl. Arnold et al. (2008), S. 324; Schuh und Stich (2013), S. 21

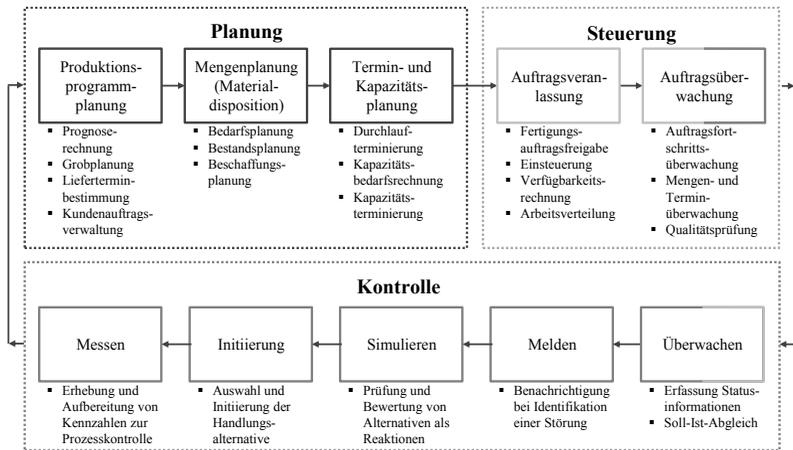


Abbildung 10: Planungs-, Steuerungs- und Kontrollaufgaben im Regelkreis¹³²

Zur Unterstützung der Zielerreichung sowie zur Erstellung eines technischen Regelkreises stehen dem Logistikmanagement Technologien zur Verfügung, die im nächsten Abschnitt vorgestellt werden sollen.

2.3 Technologien in der industriellen Logistik

Die vierte industrielle Revolution wird mit einem breiten Spektrum an Technologien das industrielle Umfeld beeinflussen. In dieser Arbeit wird deren Einsatz in der industriellen Logistik untersucht, um im Rahmen des Technologiemanagements das Logistikmanagement in der Smart Factory bei der Zielerreichung unterstützen zu können.

Die **Technologie** ist das Wissen, um technische Zusammenhänge in eine technische Problemlösung zu übersetzen. Das Ergebnis von Technologien sind Verfahren und Produkte, deren Ergebnisse in Techniken münden. Diese stellen Anwendungen von Technologien dar,¹³³ d.h. eine Technologie kann mehrere Techniken zum Ergebnis haben, die als Materialisierung der Technologie interpretiert werden.¹³⁴ Das Management von Technologien hat als Teil der Unternehmensführung die Planung des Technologieeinsatzes zur Sicherung der Wettbewerbssituation zum Ziel.¹³⁵ Aufgaben liegen in der Befähigung der heutigen oder zukünftigen Leistungserstellung mit geeigneten Technologien zu adäquaten Kosten und Zeitpunkten¹³⁶ sowie der Bereitstellung und Nutzung dieser in Produkten und Prozessen.¹³⁷

¹³² Eigene Darstellung in Anlehnung an Arnold et al. (2008), S. 325; Bensel et al. (2008), S. 8 ff.; Klinkner (2015), S. 46; Kropik (2009), S. 99

¹³³ Vgl. Bullinger (1996), S. 4-27; Zahn (1995), S. 4

¹³⁴ Vgl. Binder und Kantowsky (1996) zitiert nach Schuh et al. (2011), S. 34

¹³⁵ Vgl. Gerpott (2005), S. 57; Schuh und Klappert (2011), S. 5

¹³⁶ Vgl. Schuh und Klappert (2011), S. 5

¹³⁷ Vgl. Gerpott (2005), S. 57

Technologien, die in mehreren Techniken in unterschiedlichen Bereichen zur Anwendung kommen, werden als **Querschnittstechnologien** bezeichnet. Mit ihrer branchenübergreifenden Anwendung bilden sie, im Gegensatz zu Technologien mit speziellem Anwendungsfeld, meist das Fundament für andere Technologien.¹³⁸ In der vorliegenden Arbeit stellen IK-, Identifikations- und Automatisierungstechnologien (IDT bzw. AT) Querschnittstechnologien dar.

2.3.1 Informations- und Kommunikationstechnologien

Nach *ALPAR et al.* ist „Information [...] zusätzliches zweckorientiertes Wissen“ und die „Kommunikation ist [der] Austausch von Nachrichten.“¹³⁹ Für heutige und zukünftige Anforderungen an den Fabrikbetrieb im Rahmen von I 4.0 ist die Kommunikation von Maschine zu Maschine (M2M) und zwischen Mensch und Maschine von Bedeutung (HMI)¹⁴⁰. M2M beschreibt die Vernetzung von Maschinen untereinander, um z. B. den Datenaustausch zwecks Auslastung und Produktivität hinsichtlich eines Gesamtoptimums zu verbessern. In diese Kommunikation sind nicht nur Maschinen, sondern weitere in der Fabrik benötigte Objekte, wie z. B. Behälter integriert. Für die Entscheidungsfindung werden die Mensch-Maschine-Interaktionen im Zuge einer intelligenten Vernetzung der I4.0 aller Subjekte und Objekte in einem kooperativen Netzwerk an Relevanz zunehmen. Dem Menschen als Sensor, Akteur und Entscheider in diesem Netzwerk kommt eine besondere Bedeutung zu.¹⁴¹

Um miteinander in Austausch treten zu können, benötigen physische und virtuelle Objekte eine Identität. Physische Komponenten müssen als Informationsträger in die Lage versetzt werden, kommunikationstechnisch in das technologische Informationsnetzwerk des Systems eingebunden zu werden. Die Kommunikationsfähigkeit kann nur über (digitale) Kommunikationssysteme erfolgen, die sich z. B. über Ethernet, einem Feldbus oder mittels TCP/IP zu einem Netzwerk wie dem LAN¹⁴² verbinden lassen. Die Identität kann in unbekannt, anonym bekannt, individuell bekannt oder als Entität verwaltet kategorisiert werden. Nicht bekannte Gegenstände können in der Informationswelt nicht identifiziert werden. Bei anonym bekannten Objekten kann die Art und der Platz bestimmt werden, allerdings sind sie nicht individuell erkennbar (z. B. eine Schraube in einem Behälter). Individuell bekannte Gegenstände sind der Informationswelt bekannt und können über IDT eindeutig einem systemweiten Namen zugeordnet werden.¹⁴³ Besitzen logistische Objekte eine Identität, müssen mit ihrer Hilfe zur Steuerung und Überwachung des Material- und Informationsflusses auf der operativen Ebene Daten

¹³⁸ Vgl. Gerpott (2005), S. 27; Schuh et al. (2011), S. 36

¹³⁹ Alpar et al. (2014), S. 8

¹⁴⁰ M2M = Machine-to-Machine-Communication. HMI = Human-Machine-Interface.

¹⁴¹ Vgl. Bauer et al. (2014), S. 23

¹⁴² Feldbusse verbinden Sensor und Aktor, Ethernet Hard- und Software zu kabelgebundenen Datennetzen und TCP/ IP = Transmission Control Protocol bzw. Internet Protocol sind Netzwerkprotokolle. LAN = Local Area Network sind Rechnernetzwerke.

¹⁴³ Vgl. VDI und VDE (2014), S. 4

erfasst, gespeichert, verarbeitet und ausgegeben werden, um die Bereitstellung von Waren und Materialien für das logistische Informationssystem zu gewährleisten.¹⁴⁴ Für die Erfassung, Speicherung und Verarbeitung von Daten stellen IDT die Schnittstelle zwischen Informations- und Materialfluss dar.¹⁴⁵

2.3.2 Identifikationstechnologien

Für die Aufgabenerfüllung ist die Erfassung und somit die Identifikation in der Informationswelt relevant. Die Identifikation ist „*das eindeutige und unverwechselbare Erkennen eines Gegenstandes anhand von Merkmalen (Identifikationsmerkmalen) mit der für den jeweiligen Zweck festgelegten Genauigkeit*“.¹⁴⁶ Ziele, die mit IDT verfolgt werden, sind u. a. die Effizienzsteigerung durch (partielle) Automation von operativen Prozessschritten. Zusätzlich wird eine höhere Datenqualität über Standort und Status logistischer Einheiten angestrebt.¹⁴⁷ IDT identifizieren Objekte im gesamten Materialfluss mittels Datenerfassungsgeräten oder Sensoren.

Vertreter automatisierter IDT (Auto-ID-Verfahren) sind z. B. biometrische Systeme (Spracherkennung, Fingerabdruckscan), optische Systeme (wie Barcodes und Objekterkennung) oder elektromagnetische Systeme, wie RFID (Radio Frequency Identification). In der Logistik kommen besonders berührungslose IDT, d. h. optische (Barcode, Infrarot, optische Analyse), funkbasierte bzw. elektromagnetische (RFID) und magnetische Verfahren (Magnetkarten) zum Einsatz. Das Einsatzgebiet und die Handhabung der Informationstechniken sind aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften unterschiedlich. Mechanische Techniken sind günstig, robust und einfach in der Handhabung, besitzen allerdings nur eine geringe Informationsdichte und haben keine Wiederbeschreibbarkeit. Ihre heutige Relevanz ist als gering zu bewerten. Magnetische Informationsträger besitzen eine hohe Datenaufnahmekapazität sowie eine gute Lesefähigkeit und Unempfindlichkeit gegenüber Verschmutzungen. Sie können berührungslos erfasst werden, besitzen allerdings eine geringe Abtastentfernung. Opto-elektronische Techniken nutzen Markierungen oder die Umrisse von Transporteinheiten. Sie können mittels Laser oder Kameras ausgelesen werden. Elektronische/elektromagnetische Informationsträger sind fest codierte (nicht veränderbare) oder frei programmierbare (veränderbare) Datenträger, die berührungslos Informationen in elektronische Speicher übertragen können. Hinsichtlich der Lesegenauigkeit sowie der automatischen Erkennung von Objekten gelten diese als vorteilhaft. Sie bilden die heute vorherrschenden Codierungen.¹⁴⁸ Die Funktionen von IDT wie Informationserfassung, -speicherung und -verarbeitung bilden in Form von Sensoren und Aktoren eine wichtige Komponente der AT.

¹⁴⁴ Vgl. Martin (2014), S. 504

¹⁴⁵ Vgl. Arnold et al. (2008), S. 816

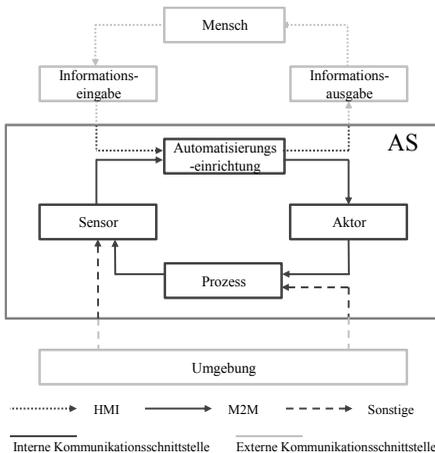
¹⁴⁶ DIN 6763 (1985), S. 3

¹⁴⁷ Vgl. Straube et al. (2007), S. 20 ff.

¹⁴⁸ Vgl. Martin (2014), S. 505

2.3.3 Automatisierungstechnologien

„Automatisieren heißt künstliche Mittel einsetzen, damit ein Vorgang automatisch abläuft.“¹⁴⁹ Die Ziele von AT liegen in der Steigerung bzw. der Bewahrung eines definierten Qualitätsniveaus,¹⁵⁰ der Sicherheit von Gefahrenquellen und der Entlastung von Personal und Betriebsmitteln von immer wiederkehrenden Arbeitsabläufen sowie der Daueraufmerksamkeit bei der Überwachung von Prozessen. Technologische Prozesse und Abläufe sind häufig komplex. Für Mitarbeiter wird es schwieriger, die Sachzusammenhänge hinreichend zu erfassen und die geforderte kontinuierliche Leistungserhöhung, in Form von gesteigerten Produktionsmengen oder der Sicherstellung von Termintreuen, zu gewährleisten.¹⁵¹



Nach *VOGEL-HEUSER et al.* bestehen **Automatisierungssysteme** (AS) aus einem (1) technischen System (technisches Produkt oder Anlage), welches in einem (2) technischen Prozess (Umwandlung, Transport oder Speicherung von Energie, Materie oder Information) arbeitet, sowie aus einem (3) Rechner- und Kommunikationssystem, welches für die Erfassung, Verarbeitung und Darstellung von Informationen für das (4) Bedienpersonal verantwortlich

Abbildung 11: Automatisierungssystem¹⁵²

ist.¹⁵³ Abbildung 11 zeigt Wirkungszusammenhänge und Elemente eines AS. Prozesse stehen im Mittelpunkt der Automatisierung und determinieren die Eigenschaften eines AS. Zu den Hauptanwendern gehören industrialisierte Prozesse aus dem verfahrens- und fertigungstechnischen Bereich. Hinzu kommen Prozesse, an denen stationäre oder mobile Roboter beteiligt sind.¹⁵⁴ Die Datenerfassung (Sensoren), -verarbeitung (Algorithmus), und -ausprägung (Aktoren) von Prozessen vollzieht sich überwiegend auf Basis von Daten, die Informationen in codierter Form besitzen. Signale werden zu diesem Zweck in Daten umgewandelt und vice versa. Für die Erfassung von unterschiedlichen Prozess- und Zustandsgrößen werden Sensoren genutzt, für die Transformation von

¹⁴⁹ DIN 19233 (1972), S. 1 ff.

¹⁵⁰ Sie erfüllen damit die gleiche Aufgabe wie die Standardisierung von Prozessen.

¹⁵¹ Vgl. Weller (2008), S. 22 ff.

¹⁵² Eigene Darstellung in Anlehnung an VDI 2206 (2004), S. 14; Weller (2008), S. 11 und 14

¹⁵³ Vgl. Vogel-Heuser et al. (2013), S. 670

¹⁵⁴ Vgl. Weller (2008), S. 14 f.

Informationen in prozesswirksame Handlungen physischer Art Aktoren.¹⁵⁵ In der Automatisierungseinrichtung (Regler bzw. Steuereinrichtung) werden die aktuellen Prozessinformationen aus den Sensoren sowie Umfeldinformationen mit den zuvor definierten Vorgaben des Personals verarbeitet. Das Ergebnis gelangt als Stellsignal zur Aktorik oder mittels eines geeigneten Mediums zum Mitarbeiter. Das geeignete Medium für Informationseingaben und -ausgaben existiert in Form einer Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI), die an menschliche Sinne adressiert ist.¹⁵⁶ Neben den Material- und Informationsflüssen sind für ein AS Energieflüsse zum Betrieb relevant,¹⁵⁷ die nicht im Fokus der Arbeit stehen. Informationstechnisch hat sich als funktionale und hierarchische Beschreibung die Automatisierungspyramide (Abbildung 12) etabliert.¹⁵⁸

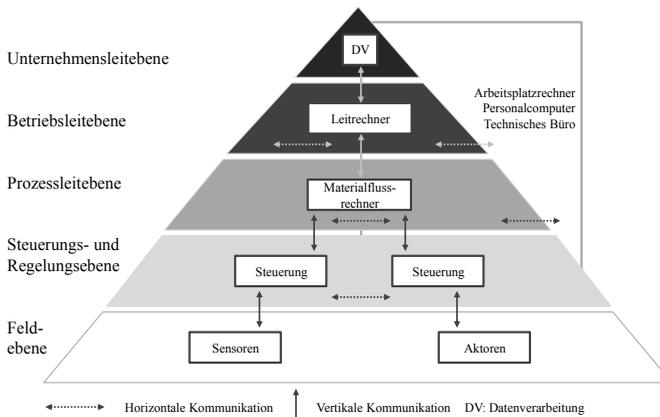


Abbildung 12: Automatisierungspyramide¹⁵⁹

Auf der **Feldebene** befindet sich der Herstellungsprozess und die daran beteiligten Objekte und Subjekte, wie z. B. Mensch und Maschine. Durch die manuelle Betriebsdatenerfassung (BDE) via Dokumente oder Erfassungsgeräte und die automatisierte maschinelle Erfassung mittels Sensoren (MDE) wird die Datensammlung von Ist-Werten meist über binäre Signale im Prozess im Sekundentakt oder schneller erfasst, gemessen und angepasst. Die binären Ein-/Ausgangssignale stellen die technische Schnittstelle zum Produktionsprozess dar und werden in der darüber liegenden Ebene, der **Regelungs- und Steuerungsebene**, über Sensoren in Steuer- und Regelsystemen gesammelt. Um die Prozessstabilität zu gewährleisten, erfolgt auf dieser Ebene die manuelle oder automatisierte Steuerung sowie Überwachung des physischen Prozesses in Stunden- bis Sekundenintervallen. Mit Hilfe von speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) werden die Teilsysteme (i. d. R. Maschinen) gesteuert oder geregelt. Der Materialflussrech-

¹⁵⁵ Vgl. Litz (2012), S. 5 f.; Weller (2008), S. 12

¹⁵⁶ Vgl. Weller (2008), S. 12 ff.

¹⁵⁷ Vgl. VDI 2206 (2004), S. 16

¹⁵⁸ Vgl. Scholz-Reiter und Höhns (2006), S. 763

¹⁵⁹ Eigene Darstellung in Anlehnung an Haehnel (2010), S. 312; DIN EN 62264-1 (2014), S. 17

ner (MFR) kann sich auf der zweiten, der dritten oder der **Prozessleitebene** befinden und diese miteinander verknüpfen. Der MFR ist für die Informationsverteilung in der Fabrik zuständig. Dafür werden Messwerte der unteren drei Schichten für das ganze System (inklusive den oberen beiden Schichten) aggregiert und für die Koordination des Herstellungsprozesses tages-, schichten- bis sekundenweise geplant, gesteuert und kontrolliert. Systeme zur Überwachung und Steuerung von technischen Prozessen für das Gesamtsystem werden als *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA)¹⁶⁰ bezeichnet. Auf den höchsten beiden Ebenen, der **Unternehmens- bzw. Betriebsleitebene** (Ebene der Unternehmensplanung und Logistik), erfolgt die Grobplanung für die Produktion und Logistik, wie z. B. der Materialverbrauch oder die Anlieferung. Zusätzlich werden die Lagerbestände und die Materialzulieferung sichergestellt. Die Informationen aus den vorangegangenen Ebenen sind essentiell für die oberste Ebene. Die Unternehmensleitebene arbeitet im Monats-, Wochen- oder Tageszyklus.¹⁶¹ Die untersten drei Ebenen bilden die Materialflusssteuerung (d. h. die industrielle Umgebung) ab, wohingegen die beiden oberen Ebenen die Planungsebene (d. h. die administrative Umgebung) abbilden. Auf den Ebenen kommen Informationssysteme zum Einsatz, die Mensch und Maschine bei der Durchführung logistischer Aufgaben unterstützen.

2.3.4 Informationssysteme

ALPAR et al. definieren ein Informationssystem als „*ein künstliches, konkretes System, das aus maschinellen und menschlichen Elementen besteht und seine Nutzer mit Informationen versorgt.*“¹⁶² Die Hauptaufgaben liegen in der Sammlung, Speicherung, Bearbeitung, Sicherung und Optimierung von Informationen. Die Komponenten bestehen aus Hardware (Rechner), dem Netzwerk (Infrastruktur) sowie aus Software (Datenbank, Programm, Betriebssystem). Die vorliegende Arbeit fokussiert logistische Informationssysteme. Ein **logistisches Informationssystem (LIS)** hat die Aufgabe, die richtigen Informationen zur richtigen Zeit am richtigen Ort für Logistikprozesse bereit zu stellen, um Material und Produkte in der richtigen Menge, zum richtigen Zeitpunkt, in der richtigen Qualität an den richtigen Ort zu liefern. Auf der operativen Ebene bedeutet dies die Erfassung, Speicherung, Verarbeitung und Ausgabe von Daten für die Steuerung und Kontrolle des Material- und Informationsflusses.¹⁶³ Auf den unterschiedlichen Ebenen der Automatisierungspyramide kommen LIS zum Einsatz, die die Verbindung von Objekten und Subjekten innerhalb der Organisation ermöglichen und Planungs-, Steuerungs- und Kontrollaufgaben unterstützen. Die Vielzahl der LIS ist abhängig von ihrem Einsatzgebiet, weswegen in dieser Arbeit eine Auswahl vorgestellt wird. Tabelle 3 zeigt den Überblick über die Funktionsbreite sowie die Zuteilung der hier behandelten LIS zu

¹⁶⁰ Mehrere HMI bilden in der Regel ein SCADA-System.

¹⁶¹ Vgl. DIN EN 62264-1 (2014), S. 16 f.; Fallenbeck und Eckert (2014), S. 404 ff.; Haehnel (2010), S. 312; Pritschow et al. (1996), S. 10 ff.; Scholz-Reiter und Höhns (2006), S. 763

¹⁶² Alpar et al. (2014), S. 24

¹⁶³ Vgl. Martin (2014), S. 504

Planungs-, Steuerungs- und Kontrollaufgaben. Die Beschreibung der Informationssysteme befindet sich im Anhang.

	APS/SCM	ERP	MES	WMS	TMS	SCEM
Planung						
<i>Produktionsprogrammplanung</i>	✓	✓				
<i>Mengenplanung</i>	✓	✓		(✓)	✓	
<i>Termin- und Kapazitätsplanung</i>	✓	✓			✓	
Steuerung & Kontrolle						
<i>Auftragsveranlassung</i>	✓	✓	✓		✓	✓
<i>Auftragsüberwachung</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabelle 3: Informationssysteme des Logistikmanagements¹⁶⁴

LIS beeinflussen durch Planungs-, Steuerungs- und Kontrollaufgaben Prozessabläufe und machen häufig eine Systemanpassung der Abläufe notwendig. Unter den diversen LIS existieren Lösungen unterschiedlicher Anbieter, die eine unternehmensweite Vernetzung und einen einheitlichen Informationsfluss zwischen den Systemen erschweren. Die Integration der Systeme der Feldebene mit den Informationssystemen der höheren Ebenen stellt die Systemarchitekten vor technische Herausforderungen. Während Maschinen und deren SPS, Sensoren und Aktoren der Steuerungs- bzw. Feldebene industrielle Bussysteme zur Kommunikation nutzen, kommunizieren LIS via Ethernet und Internet. Die Nutzung von Internetprotokollen wird als Voraussetzung von I4.0 angesehen. Für die Überwindung von Schnittstelleninteroperabilität, -standardisierung und -integration werden bspw. plattformunabhängige OPC- und OPC UA-Standards¹⁶⁵ für Geräte der Steuerungsebene sowie BDE und MDE diskutiert.¹⁶⁶

2.4 Auswirkungen logistischer und technologischer Trends

Aktuelle logistische und technologische Trends beeinflussen das Logistikmanagement durch alte und neue Herausforderungen sowie Anwendungspotenziale. In diesem Kontext bietet I4.0 zusätzliche Werkzeuge, um die Auswirkungen proaktiv zu gestalten.

2.4.1 Logistische Trends

Die Schnittstellenfunktion der Logistik gestaltet das Aufgabenfeld der Planer zunehmend komplexer und setzt sie einer Vielzahl von inneren und äußeren Einflüssen aus. Die Einflüsse und Trends für die Logistik – und somit die Branchen, mit denen sie in Wechselwirkung steht – konfrontieren Logistikverantwortliche mit einer Zunahme von

¹⁶⁴ In Anlehnung an Fallenbeck und Eckert (2014), S. 404 ff.; Schuh und Lassen (2006), S. 196; Straube (2013), S. 29; Straube (2014b), S. 22. Beschreibungen der LIS im Anhang.

¹⁶⁵ OPC UA = Operation Planning and Control Unified Architecture. In der OPC-Foundation haben sich in den letzten Jahren ca. 470 Unternehmen zusammengeschlossen, um das Standardprotokoll OPC-UA zu entwickeln.

¹⁶⁶ Vgl. Bildstein und Seidelmann (2014), S. 585 f.

Logistikzielen sowie deren teils konträren Priorisierungen. Abbildung 13 zeigt die Logistiktrends der nächsten Jahre, deren Relevanz ausnahmslos zunehmen wird.

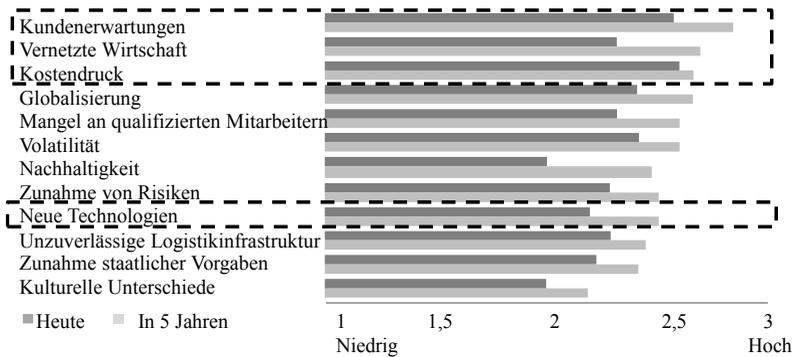


Abbildung 13: Logistiktrends¹⁶⁷

Die stetig steigenden Kundenerwartungen mit einhergehender Individualisierung der Kundenwünsche, die zunehmende Vernetzung der Wirtschaft und der Kostendruck sind die wichtigsten Logistiktrends der nächsten Jahre. Folgende Ausführungen basieren – wenn nicht anders gekennzeichnet – auf dieser Studie.

Steigende Kundenerwartungen und Individualisierung der Kundenwünsche

Die zunehmenden Kundenerwartungen bedeuten für das Logistikmanagement eine Vielfalt an kundenspezifischen Wünschen, die das Logistiknetzwerk fragmentieren und komplexer werden lassen. Die Komplexität äußert sich insbesondere in der Zunahme der Variantenvielfalt. Unternehmen sind angehalten, Varianten vorzuhalten, die z. B. unterschiedliche Verpackungsdesigns sowie unterschiedliche logistische Vereinbarungen mit Partnern auf globalen Märkten zur Folge haben. Gleichzeitig werden eine hohe Qualität, niedrige Kosten, zuverlässige Lieferungen und CO₂-arme Lösungen erwartet. Die zunehmende Vernetzung unterschiedlicher privater, industrieller oder öffentlicher Anspruchsgruppen verstärkt diesen Trend und die damit verbundenen Zielkonflikte.

Zunehmende Vernetzung der Wirtschaft

Um der Zunahme an Varianten und Komplexität mit erhöhter Flexibilität zu begegnen, vernetzen sich Unternehmen. Dies äußert sich in vermehrtem Informationsaustausch, der Zunahme an Kooperationen sowie dem Outsourcing von z. B. Bestandsmanagement oder Planungsaufgaben. Die Bündelung von und Vergabe einer Vielzahl von Logistikleistungen ermöglicht z. B. in der Automobilindustrie durch informatorische Vernetzung echtzeitfähige Bestandsüberwachungen durch den Lieferanten. Die zunehmende horizontale und vertikale Vernetzung der Akteure sowie die digitale Durchgängigkeit

¹⁶⁷ In Anlehnung an Handfield et al. (2013), S. 14 ff.

ist in I4.0 ein zentraler Baustein,¹⁶⁸ erhöht jedoch auf der anderen Seite Abhängigkeiten und kann die Prozessstabilität beeinträchtigen.

Zunehmender Kostendruck und Zielkonflikte

69% der Befragten bewerten den Kostendruck als konstant bzw. steigend. Die Erfüllung der Kundenerwartungen sowie die termingerechte Lieferung bilden die wichtigsten Ziele. Im Jahr 2008 waren dies noch die Liefertreue sowie die Logistikkosten. Dabei weisen Leistungskennzahlen wie die Lieferzeit, -flexibilität und -zuverlässigkeit, in Deutschland einen negativen Trend auf, obwohl sie in direktem Zusammenhang mit den beiden wichtigsten Zielen stehen. Das Logistikmanagement sieht sich somit mit einer Vielzahl an Zielen konfrontiert, die im Konflikt zueinander stehen, in der Priorität schwanken oder durch neue Ziele ergänzt werden.¹⁶⁹

2.4.2 Technologische Trends

Die Dynamik aktueller technologischer Trends im Kontext der I4.0 wird für die Logistik zusätzlich weitreichende Veränderungen zur Folge haben.

Virtualisierung und Digitalisierung

In der aktuellen Entwicklung von Technologien im industriellen Umfeld findet der Begriff „*Digitalisierung*“ häufig Verwendung. Eine enge Definition beschreibt Digitalisierung als Transformation von analogen zu digitalen Daten.¹⁷⁰ Im weiteren Sinne bildet die IKT die Basis einer Digitalisierung, die alle Lebensbereiche der Gesellschaft zunehmend beeinflusst.¹⁷¹ Im industriellen Umfeld führt die IKT-Anwendung zu einer Verlagerung geschäftlicher Aktivitäten von der realen in die virtuelle Umgebung. Diese Virtualisierung führt zu einer zunehmenden Vernetzung der Wertschöpfungspartner. Die Dynamik dieses Vernetzungsprozesses einer breiten gesellschaftlichen Basis auf Grundlage von IKT nimmt seit Jahren stetig zu¹⁷², weshalb von einer „*digitalen Transformation*“¹⁷³ gesprochen wird. Die *digitale Transformation* beschleunigt die domänenübergreifende Schließung von Medienbrüchen mit Hilfe von IKT, IDT und AT.

Auflösung der Automatisierungspyramide und Dezentralisierung

Abbildung 14 zeigt den Paradigmenwechsel in der Automation, mittels dessen die Verbände *VDI* und *VDE* die sukzessive Auflösung der Automatisierungspyramide durch vernetzte dezentral organisierte bzw. teilweise selbstorganisierende Dienste skizzieren.

¹⁶⁸ Vgl. BMBF (2013), S. 6; Kagermann et al. (2013), S. 24

¹⁶⁹ Vgl. Handfield et al. (2013), S. 45 ff.

¹⁷⁰ Vgl. Deloitte & Touche GmbH (2013), S. 8

¹⁷¹ Vgl. Bitkom (2012), S. 3

¹⁷² Nach PWC und Strategy& (2014), S. 15 nimmt der Digitalisierungsgrad von 2014 bis 2019 in horizontalen und vertikalen Wertschöpfungsketten um das Vierfache zu.

¹⁷³ Vgl. Deloitte & Touche GmbH (2013), S. 2 ff.

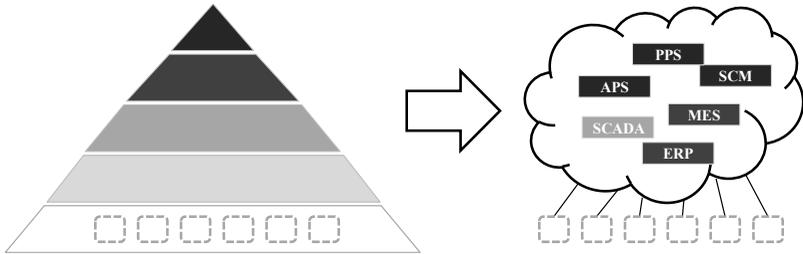


Abbildung 14: Auflösung der klassischen Automatisierungspyramide¹⁷⁴

Die Verschiebung von hierarchischen, zentral organisierten Aufgaben hin zu vernetzten dezentral (selbst-) organisierten Einheiten und Diensten¹⁷⁵ hat Einfluss auf Steuerungs- und Planungsaufgaben. Die Ausstattung von Elementen der Feldebene mit „Intelligenz“, die einer zentralen Planung und Steuerung kaum mehr bedarf, wird weitreichende Konsequenzen haben.¹⁷⁶ Zusätzlich werden Miniaturisierung, Systemintegration, Konvergenz und Vernetzung auf die Logistik und Produktion Einfluss nehmen.¹⁷⁷ Für die Logistik, als relevantes Anwendungsfeld, sind diese Veränderungen bisher kaum erforscht.¹⁷⁸ Sind es auf der IKT-Seite insbesondere die Verschiebung von zentralen zu dezentralen Ansätzen, von Software-Suiten zu Apps (SaaS) und von zeitversetzten Informationen zu Echtzeitanformationen,¹⁷⁹ wird in der Automation u. a. die Auflösung der klassischen Automatisierungspyramide die Folge sein. Die AT ist durch die stetige Zunahme von IKT beeinflusst.¹⁸⁰ Der Art der Kommunikationssysteme zwischen Objekten kommt bei dezentralen Automatisierungskonzepten eine wichtige Rolle zu, da der Kommunikationsbedarf zwischen diesen Einheiten zunehmen wird.¹⁸¹

Vernetzung von Objekten und Subjekten via Internet

Bis zum Jahr 2020 prognostiziert der Netzwerkausrüster CISCO die Vernetzung von 50 Mrd. Geräten – eine Verdopplung im Vergleich zum Jahr 2015.¹⁸² Im industriellen Umfeld wird die Zunahme von intelligenten Objekten und Produkten im Netzwerk durch die technische vertikale und horizontale Integration von CPS, als zentrales Element der I4.0,¹⁸³ realisiert. In dem entstehenden „Internet of Everything“ (IoE) wird alles mit allem vernetzt sein und im Austausch stehen. Neben den Objekten werden operative und strategische Logistikmanager in den Mittelpunkt der Entscheidungsfindung rücken. Neben internen Objekten und Subjekten sollen Kunden in die Smart Factory über intel-

¹⁷⁴ Eigene Darstellung in Anlehnung VDI und VDE (2013), S. 4

¹⁷⁵ Vgl. VDI und VDE (2013), S. 4

¹⁷⁶ Vgl. ten Hompel und Henke (2014), S. 615

¹⁷⁷ Vgl. Botthof et al. (2009), S. 11 f.

¹⁷⁸ Vgl. ten Hompel und Henke (2014), S. 615

¹⁷⁹ Vgl. Vgl. Bauernhansl (2014), S. 29

¹⁸⁰ Vgl. Vogel-Heuser et al. (2013), S. 672

¹⁸¹ Vgl. Haehnel (2010), S. 309

¹⁸² Vgl. IBSG (2011), S. 3

¹⁸³ Vgl. Bauer et al. (2014), S. 18; Schuh et al. (2014), S. 281; ten Hompel und Henke (2014), S. 621; Vogel-Heuser (2014), S. 39

ligente Produkte in das Wertschöpfungsnetzwerk integriert werden und in Echtzeit über den aktuellen Status ihres Produktes informiert werden.¹⁸⁴ Inwiefern Kunden aktiv in den Leistungserstellungsprozess eingreifen, ist bisher unklar.

Integration von Daten, Diensten, Objekten und Subjekten durch Plattformen

„Die Plattformisierung ist ein Megatrend, der die Märkte stark verändert.“¹⁸⁵ Im Rahmen des Konzeptes I4.0 wird daher dem Plattformgedanken hohe Relevanz zugesprochen.¹⁸⁶ Mittels Cloud Computing-Lösungen ist es möglich, größere Datenmengen als bei herkömmlichen innerbetrieblichen Lösungen für die Analyse, Planung, Regelung und Optimierung von (intelligenten) Fabriken den Anwendern (z. B. Planer) zur Verfügung zu stellen. Über die Cloud können z. B. die (intelligenten) Objekte mittels der Kommunikationsnetze verbunden sowie diverse Dienstleistungen im Intra- und Internet angeboten werden.¹⁸⁷ Auf der operativen Ebene werden die Entwicklungen bei IDT durch Sensorik und Aktorik die technischen Voraussetzungen für die Kommunikation zwischen z. B. Betriebsmitteln oder Behältern realisieren. Diese sollen in die Lage versetzt werden, selbstständig Informationen in Echtzeit auszutauschen und sich gegenseitig zu steuern. Die Vernetzung von Anlagen wird durch horizontale Kommunikation realisiert, die i. d. R. Echtzeitbedingungen (Millisekunden) benötigt. Die Vernetzung der Informationssysteme wird durch vertikale Kommunikation mit weniger strengen Anforderungen (Sekunden bis Millisekunden) realisiert.¹⁸⁸ Diese Kommunikation wird die Datenmengen weiter ansteigen lassen, was als eine der größten Herausforderungen im Kontext von I4.0 angesehen wird. Die Daten müssen analysiert und für die Anwender aufbereitet werden, um die notwendigen Maßnahmen ableiten zu können.¹⁸⁹ Die resultierende Zunahme der Daten wird unter dem Stichwort Big Data diskutiert.¹⁹⁰ Für die jährliche Datenzunahme allein für den mobilen Datenverkehr wird von 2015 bis 2018 eine Erhöhung von 4,4 Eb¹⁹¹ auf 15,9 Eb erwartet.¹⁹² Werden Daten zu Informationen, entstehen „Smart Data“. Die Entwicklungen in IKT, IDT und AT stellen die Basis der digitalen Transformation dar, die sich in dieser Arbeit in den Konzepten der CPS, des IoE und der Smart Ecosystems widerspiegelt.

Logistische und technologische Trends beeinflussen das Logistikmanagement in Form von Herausforderungen und damit verbundenen Anwendungspotenzialen. Technologische Herausforderungen werden im Rahmen dieser Arbeit nur skizziert.

¹⁸⁴ Vgl. BMBF (2013), S. 32 f.

¹⁸⁵ Baums et al. (2015), S. 8

¹⁸⁶ Vgl. Fallenbeck und Eckert (2014), S. 427 ff.

¹⁸⁷ Vgl. Bauer et al. (2014), S. 21

¹⁸⁸ Vgl. Hoppe (2014a), S. 263

¹⁸⁹ Kleinemeier (2014), S. 573

¹⁹⁰ Vgl. Kagermann (2014), S. 605 f.

¹⁹¹ Ein Exabyte (Eb) entspricht einer Mrd. Gigabyte.

¹⁹² Vgl. Cisco Systems Inc. (2014), S. 5

2.4.3 Herausforderungen für das innerbetriebliche Logistikmanagement

Zielkonflikte

Das Logistikmanagement ist internen und externen Zielkonflikten unterworfen, die eine Ausschöpfung von Potenzialen auf Systemebene erschweren können. Interne Zielkonflikte bestehen z. B. im Spannungsfeld von Lieferservice, Beständen sowie dem Durchsatz der Produktions- und Logistiksysteme. Wird ein hoher Lieferservice angestrebt, wird dies z. T. durch höhere Bestände zwischen den Arbeitsstationen realisiert. Die Erhöhung des Durchsatzes von Logistiksystemen ist daher häufig mit einer Entkopplung der Materialflüsse sowie dem Aufbau von Lägern verbunden. Das Spannungsfeld von Logistikkosten und -leistung in innerbetrieblichen Logistiksystemen führt i. d. R. zu einer suboptimalen Ausschöpfung des Systemoptimums zwischen Bereichen, Abteilungen oder Akteuren von Logistiknetzwerken.¹⁹³

Intransparenz und isolierte, zeitversetzte Planung, Steuerung und Kontrolle

Informationen werden mehrheitlich am Anfang bzw. Ende eines Bearbeitungsschrittes aufgenommen, der Status logistischer Einheiten dazwischen ist unklar.¹⁹⁴ Nicht synchronisierte Material- und Informationsflüsse erzeugen Asymmetrien in der Qualität der Planungs- und Steuerungsparameter bei langfristigen Prognosen oder kurzfristigen Anpassungen.¹⁹⁵ Die generierte Intransparenz der Informationsbereitstellung über innerbetriebliche Abläufe hat direkten Einfluss auf die Entscheidungsqualität des Personals, wenn die steigende Daten- und Informationskomplexität nicht benutzergerecht für die Anwender aufbereitet wurde. Die unterschiedlichen Anwender agieren in unterschiedlichen Bereichen und Planungsebenen, wie z. B. der Vertriebs- und Produktionsplanung. Dies führt zu einer (zentralen) isolierten Planung, Steuerung und Kontrolle von Material- und Informationsflüssen sowie zu Zeit- und Mentalitätsunterschieden. Daraus resultiert u. a. eine fehlende Rückkopplung (bzw. Regelkreise) bei Änderungen im Ablauf sowie bei einer beeinträchtigten Verfügbarkeit, Aktualität und Verteilung von Daten innerhalb der Prozesse.¹⁹⁶ Dieses Defizit wird durch die fehlende Echtzeitfähigkeit verstärkt, was z. B. kurzfristige Terminänderungen oder die Feinsteuerung für Auslastungsgrade erschwert. Grund können neben unterschiedlichen Zeitanforderungen der Ebenen Medienbrüche in der Datenaufnahme sowie die nicht konsequente Ausstattung des Materialflusses mit IDT sein.¹⁹⁷

Die resultierende Informationsasymmetrie zwischen Realität und Virtualität erhöht asynchrone Material- und Informationsflüsse und erschwert die Integration für Planungs-, Steuerungs- und Kontrollaufgaben in den KAP. Die Vernetzung findet über-

¹⁹³ Vgl. Schuh und Stich (2013), S. 22 f.

¹⁹⁴ Interviewpartner Fallstudienforschung (2016)

¹⁹⁵ Vgl. Schuh et al. (2014), S. 289 ff.

¹⁹⁶ Vgl. Straube (2004), S. 130 ff.

¹⁹⁷ Interviewpartner Fallstudienforschung (2016)

wiegend zu angrenzenden vor- bzw. nachgelagerten Ebenen, wie bei der klassischen Automatisierungspyramide, statt. Dies führt zu einer erhöhten Informationsdichte sowie erhöhter Verarbeitungsleistung in vertikaler Richtung, da Informationssysteme wie SCM, ERP oder MES die Informationen der jeweils untergeordneten Stufe nutzen. Die unteren Ebenen benötigen dagegen eine erhöhte Verfügbarkeit von Daten und Informationen, die zu den höheren Hierarchieebenen abnimmt.¹⁹⁸

Inadäquate Nutzung von Kundeninformationen

Als Folge von Bereichsdenken sowie isolierter, zeitversetzter Teilplanungen werden Auftragsdaten des Kunden nicht direkt an die involvierten Akteure weitergeleitet. Daten des Vertriebs werden verzögert und/oder unvollständig der Beschaffung, Produktion etc. zur Verfügung gestellt, was u. a. Redundanzen und Wiederholungsprozesse zur Folge hat. Anpassungen werden z. T. kurzfristig vorgenommen, ohne tiefgehend die Konsequenzen der Entscheidungen zu bewerten.¹⁹⁹

Bereichsdenken und Führungsverhalten

Kennzahlenbasierte Zielkonflikte können durch organisatorische Hemmnisse aufgrund unterschiedlicher interner und externer Anspruchsgruppen verstärkt werden.²⁰⁰ Logistische Aktivitäten sind im Unternehmen i. d. R. auf unterschiedliche Bereiche aufgeteilt. Durch ihre Querschnittsfunktion sind sie mit Silodenken und lokalen Bereichszielen konfrontiert, die den Systemzielen entgegenstehen. Treffen Organisationseinheiten lokale Priorisierungen und ändern diese, werden die Auswirkungen auf das Gesamtsystem schwieriger einschätzbar bzw. einsehbar, was wiederum zu Suboptima führt. Dies stellt ein häufiges Szenario in Unternehmen dar. Der Einkauf z. B. ist darin bestrebt, hohe Volumina für bessere Einkaufsbedingungen zu ordern, was in Lager und Produktion zu hohen Beständen führt, die aufgrund der Entkopplung vom eigentlichen Bedarf u. U. abgeschrieben werden müssen.²⁰¹ Zusätzlich führt das Bereichsdenken zu asynchroner Kommunikation aufgrund der Informationsautonomie zentraler Instanzen und der damit fehlenden oder verspäteten Informationsweitergabe. Verzögerungen oder Vorenthaltungen können Entscheidungen über Kapazitäten und Bestände negativ beeinflussen, zu Folgefehlern und Störungen führen.²⁰²

Infolge der Datenzunahme werden Führungskräfte und Mitarbeiter einer erhöhten Prozess- und Informationskomplexität ausgesetzt. Für die Gewährleistung der Akzeptanz sowie der Vermeidung von Überforderung werden Qualifizierungsmaßnahmen und ein Umdenken in der Arbeitsorganisation und -gestaltung nötig.²⁰³

¹⁹⁸ Vgl. Stich et al. (2013), S. 271 f.

¹⁹⁹ Vgl. Straube (2004), S. 130 ff.

²⁰⁰ Interviewpartner Fallstudienforschung (2016)

²⁰¹ Vgl. Schuh und Stich (2013), S. 23 f.

²⁰² Vgl. Straube (2004), S. 130 ff.

²⁰³ Vgl. Günthner et al. (2014), S. 311 f.; IDC (2014), S. 6; Kagermann et al. (2013), S. 5 ff. und Kagermann et al. (2013), S. 562 ff.; Schuh et al. (2014), S. 279 ff.

Heterogene Systemlandschaften, Standards und Datensicherheit

Organisch gewachsene System- und Technologielandschaften durch Unternehmenskäufe münden in heterogene Verteilungen von Funktionen. Resultat sind fehlende Standards und Kompatibilitätsprobleme zwischen den Schnittstellen der Geschäftsprozesse. Aus der heterogenen Systemlandschaft und fehlender Kompatibilität resultiert eine Komplexitätszunahme, die das Spannungsverhältnis zwischen Logistik- und Technologieanforderungen erhöhen kann.²⁰⁴ Kürzere Anpassungszyklen von Logistiknetzen und Technologien in immer kürzerer Frequenz werden notwendig. Die systembedingte Inflexibilität zur Gestaltung und Adaption von Informationssystemen und Logistiktechnologien für Systeme und Prozesse stoßen an die Grenzen der tatsächlichen Machbarkeit. Eine Konsequenz ist die entstehende Automatisierungslücke, die durch Asymmetrien in der internetbasierten Integration zwischen realer Welt (Objekte und Subjekte) und virtueller Welt (Informationssysteme) entsteht.²⁰⁵ Bei der zukünftig zu bewältigenden Datenübertragung, -haltung und -verarbeitung wird die Datensicherheit und -qualität zu einer elementaren Voraussetzung für die Systemverfügbarkeit.²⁰⁶ Zusätzlich sind aktuell die Leistungsfähigkeit, der wirtschaftliche Nutzen sowie rechtliche Fragestellungen zur Datennutzung und Produkthaftung für I4.0-Lösungen unklar.²⁰⁷ Die intransparente Angebotskomplexität im sich neu definierenden „I4.0-Markt“ verstärkt die Unsicherheit.

2.4.4 Anwendungspotenziale für das Logistikmanagement

Zur Adressierung von Trends und Herausforderungen wird in Deutschland verstärkt auf die Potenziale durch die zukünftigen Entwicklungen hingewiesen. So fordert der Verband BITKOM, dass „Deutschland [...] der weltweit führende Standort für Industrie 4.0 werden“²⁰⁸ müsse. Dies gilt insbesondere für Maschinenbauunternehmen, deren Fokus als Anwender und Ausrüster in der konventionellen Abwicklung auf physischen Produkten und Prozessen liegt, durch I4.0 aber eine Verschiebung zu Vernetzung und Dienstleistung erfahren wird.²⁰⁹

Markt- und Einsparpotenzial

Die Forderung scheint gerechtfertigt, wenn man sich das geschätzte Gesamtpotenzial von bis zu 425 Mrd. € bis zum Jahr 2025 in Deutschland und von 1,25 Bio. € in Europa vergegenwärtigt.²¹⁰ Das Potenzial für die Volkswirtschaft Deutschland scheint immens. Umso erstaunlicher ist, dass der drittgrößte Wirtschaftszweig – die Logistik – bisher kaum thematisiert wurde. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass die Logistik

²⁰⁴ Vgl. Kagermann et al. (2013), S. 5 ff.; PWC und Strategy& (2014), S. 37; Straube (2014f), S. 24 ff. und den dort zitierten Quellen.

²⁰⁵ Vgl. Straube (2014f), S. 24 ff. und den dort zitierten Quellen.

²⁰⁶ Vgl. Diemer (2014), S. 369 ff.

²⁰⁷ Interviewpartner Fallstudienforschung (2016)

²⁰⁸ Bitkom (2014), S. 21

²⁰⁹ Interviewpartner HM (2014)

²¹⁰ Vgl. Roland Berger Strategy Consultants (2015), S. 7

„als herausragende Anwendungsdomäne der vierten industriellen Revolution“²¹¹ gilt. Auf Grundlage von Initiativen und erwarteten Potenzialen werden Investitionen in I4.0-Lösungen im Logistikkontext sukzessive erhöht. Im Fokus liegen Technologien zur Vernetzung von Betriebsmitteln und Logistiksystemen. Die Zunahme „intelligenter“, in Echtzeit vernetzter Geräte, die untereinander selbstständig Daten austauschen, soll gänzlich neue Geschäftsmodelle mit neuen Dienstleistungen ermöglichen.²¹² Berechnungen deuten auf ein Wachstum in allen Märkten mit „intelligenten Technologien“ hin.²¹³ Aber nicht isolierte Betrachtungen, sondern deren Verknüpfung lassen systemische Synergiepotenziale erwarten.

Das übergeordnete Ziel bleibt jedoch die Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit.²¹⁴ Die Einsparungspotenziale sollen im Produktions- bzw. Logistikumfeld zwischen 20 und 70 % betragen. Z. B. soll die Reduzierung von Bestandskosten (30 bis 40 %) mit einer Minderung von Sicherheitsbeständen und Abmilderung des Bullwhip-Effektes realisiert werden. Für Instandhaltungskosten (20 bis 30 %) spielt neben den Ersatzteilbeständen die dynamische Priorisierung eine Rolle. Nach *BAUERNHANSL* wird die Erhöhung des Automatisierungsgrads den größten Effekt auf die Logistik (10 bis 20 %) haben. Bei Fertigungs- und Qualitätskosten (je 10 bis 20 %) sind die Prozess- bzw. Qualitätsregelkreise sowie die Mitarbeiterflexibilität ausschlaggebend.²¹⁵

Synchronisation von Material- und Informationsflüssen

SCHLICK et al. weisen auf Grundlage von Untersuchungen darauf hin, „dass sich im Umfeld von Industrie 4.0 weder das Optimierungsziel, noch die zu optimierenden Bereiche verändern.“²¹⁶ Der Technologieeinsatz im Kontext von I4.0 stellt demnach ein Werkzeug dar, um die klassischen Ziele zu adressieren. Durch I4.0 stehen dennoch neue Instrumente zur Verfügung. Im Zentrum steht die Reduzierung von Medienbrüchen, die aktuell vom Personal überwiegend durch manuelle Datenerfassung geleistet wird. Dadurch wird der Mensch im Informationsfluss zum Engpass, was eine Veränderung zur bisherigen Suche nach der „Engpassmaschine“ klassischer Optimierungsansätze darstellt. Hier kann IDT unterstützen, um eine Erhöhung der Transparenz von betrieblichen Abläufen für die Planung, Steuerung und Kontrolle zu erzielen.²¹⁷ Die automatische Datenerfassung beschleunigt die Virtualisierung aller Abläufe und trägt damit zur Schließung der Informationslücken bei. Werden Objekte und Subjekte horizontal/vertikal mit einander in Echtzeit durchgängig vernetzt, können Material- und Informationsflüsse entlang des KAP synchronisiert werden.

²¹¹ ten Hompel und Henke (2014), S. 615

²¹² Vgl. Diemer (2014), S. 370; Kagermann et al. (2013), S. 19 f.; Spath (2013), S. 132 ff.

²¹³ Vgl. MarketsandMarkets Analysis zitiert nach Trage (2012), S. 47

²¹⁴ Vgl. Kagermann et al. (2013), S. 19 f.

²¹⁵ Vgl. Bauernhansl (2014), S. 31

²¹⁶ Schlick et al. (2014), S. 76 ff.

²¹⁷ Vgl. BMBF (2013), S. 7; Kagermann (2014), S. 608; Schlick et al. (2014), S. 76 ff.

Vernetzung und Integration der Wirtschaft

Die durchgängige Vernetzung von Objekten und Subjekten in Produktion und Logistik ermöglicht durch eine erhöhte Datenqualität ein Abbild der innerbetrieblichen Abläufe, das als Voraussetzung für eine dezentrale Steuerung in Echtzeit gilt. Dadurch wird z. B. die Reaktion auf schwankende Abläufe kurzfristig mittels Kapazitätsanpassung möglich werden. Durch die Vernetzung soll entlang der Wertschöpfungskette eine flexible, echtzeitnahe Produktionsplanung und -steuerung möglich sowie die Optimierung von Logistiksystemen gestärkt werden.²¹⁸ Dadurch wird eine Ad hoc-Planung u. a. zur Anpassung von Zielsystemen durch zyklisch aktualisierte Plandaten der sonst starren planungskalenderorientierten Mittel- und Kurzfristplanung möglich. Produktions- und Logistiksysteme erhöhen ihre Flexibilität, in dem sie durch die CPS-basierte Ad hoc-Vernetzung kurzfristig auf interne oder externe Störungen reagieren.²¹⁹ Diese adaptiven Logistiksysteme sollen sich selbstständig durch den Materialfluss steuern, identifizierbar und lokalisierbar sein, Informationen austauschen und gegen Störungen robuster werden. Alternativrouten z. B. sollen automatisch und dezentral durch Um- bzw. Neuplanungen systemimmanent realisiert werden. Vordefinierte Routen (Ziele) werden dadurch obsolet, da sich Objekte gegenseitig selbstständig über die schnellsten oder kürzesten Wege und Service-Angebote abstimmen können.²²⁰

Kundenerwartungen und Individualisierung der Kundenwünsche

Eine bessere Planung und Steuerung in Logistik und Produktion kann u. a. die kundenindividuelle Fertigung bis hin zur Losgröße 1 ermöglichen und durch die Berücksichtigung kurzfristiger Änderungswünsche die Kundenzufriedenheit erhöhen.²²¹ Eine Steigerung der Kundenzufriedenheit erwarten die meisten Unternehmen im Zusammenhang mit I4.0.²²² Die logistische Planung mittels Prognosen auf Basis von Wahrscheinlichkeiten kann die deterministisch, taktgetriebene Logik vorgegebener Kundenwünsche zu einer nicht-deterministischen, ereignisgesteuerten Logik entwickeln. Durch die Service-Oriented Architecture (SOA) werden individuelle Services zunehmend starre Prozessketten ersetzen. Diese Service-Orientierung gestattet die individuelle Gestaltung, Organisation und Modularisierung logistischer (IT-) Systeme.²²³

Entscheidungsunterstützung bei logistischen Zielkonflikten und Aufgaben

Die Datenzunahme ermöglicht weitere Verbesserungsmaßnahmen, wenn mittels analytischer Verfahren aus Big Data Smart Data gemacht werden. Die komplexeren Entscheidungssituationen können damit unterstützt oder dezentral selbstständig getroffen werden. Der Mensch als flexible Einheit bleibt dadurch weiterhin eine wichtige Kon-

²¹⁸ Vgl. Diemer (2014), S. 370; Schlick et al. (2014), S. 76 ff.

²¹⁹ Kagermann et al. (2013), S. 19 f.

²²⁰ Vgl. Günthner et al. (2014), S. 300

²²¹ Vgl. Kagermann et al. (2013), S. 5 ff.

²²² Vgl. PWC und Strategy& (2014), S. 12 ff.

²²³ Vgl. ten Hompel (2010), S. 6 f.

troll- und Entscheidungsinstanz.²²⁴ I4.0 soll durch unterstützende Entscheidungsfindungsprozesse z.B. die Ressourcenproduktivität und -effizienz verbessern.²²⁵ Bilden Smart Data-Anwendungen die Basis der Aufbereitung zur Komplexitätsbeherrschung,²²⁶ wird der Visualisierung durch Smart Phones und Tablets für die Mitarbeiter ein hohes Potenzial zugeschrieben.²²⁷ Neben der Unterstützung bei Entscheidungen soll die Arbeitsgestaltung zwischen Mensch und Maschine dem demografischen Wandel und der Diversität der Arbeitnehmer Rechnung tragen. Die Arbeitsorganisation wird flexibilisiert, wenn Assistenzsysteme den Flexibilitätsanforderungen von beruflichen und privaten Leben entgegenkommen.²²⁸

Die identifizierten Potenziale sind im Kern mit den klassischen Zielen identisch. Strategisch werden im Kontext von I4.0 zunehmend Geschäftsmodelle, Komplexitätsbeherrschung, Kundenintegration sowie Synergien mit anderen Branchen angestrebt. Operativ werden gleichbleibend Leistungskennzahlen wie Bestandsreduzierung oder die Erhöhung der Auslastung fokussiert. Hinzugekommen sind Anwendungen und Instrumente, die Logistikaufgaben und somit die Ziele unterstützen. Die qualitativen und quantitativen Anwendungspotenziale sind vage und in der Literatur auf Grund der Aktualität der I4.0 nicht eingehend erforscht. Die empirische Analyse wird in Kapitel 4 einen Beitrag bzgl. dieses Desiderates liefern.

2.5 Abgrenzung und Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit fokussiert die Gestaltung cyber-physischer Logistiksysteme und deren Einfluss auf das innerbetriebliche Logistikmanagement bzgl. Zielen und Aufgaben der taktischen und operativen Ebene. Zu diesem Zweck wurden Modellaspekte von Theorien und Lehren auf die System-, Netzwerk- und Technologieebenen von Logistiksystemen übertragen. Logistikprozesse wurden in Anlehnung an die funktionale und institutionelle Abgrenzung der innerbetrieblichen Industrielogistik entlang des Materialflusses auf die Beschaffungs-, Produktions- und Distributionslogistik sowie die Schnittstellen zu Beschaffungs- und Absatzmarkt bezogen. Die vorliegende Arbeit fokussiert interne Abläufe produzierender Unternehmen (Anwender/Ausrüster des Maschinenbaus) und ergänzt diesen Fokus um die äußeren Schnittstellen, da eine ausschließlich interne Betrachtung dem integrierten, ganzheitlichen Anspruch der Logistik nicht gerecht werden würde.

Im Rahmen des Logistikmanagements steht die Planung, Steuerung und Kontrolle von Material- und Informationsflüssen im Fokus. Logistikaufgaben stellen Werkzeuge zur Zielerreichung dar. Neben den Logistikaufgaben stehen Aspekte der Mitarbeiterführung und -befähigung im Fokus. Die klassischen Ziele der Kundenzufriedenheit sowie Pro-

²²⁴ Vgl. Spath (2013), S. 132 ff.

²²⁵ Vgl. Kagermann et al. (2013), S. 5 ff.; Kaufmann (2014), S. 364 ff.

²²⁶ Vgl. Kaufmann (2014), S. 364 ff.

²²⁷ Vgl. Hoffmann (2014), S. 218

²²⁸ Vgl. Kagermann et al. (2013), S. 19 f.

duktivität können auf strategische Logistikziele wie Kosten, Qualität, Zeit und Flexibilität und operative Logistikziele bzgl. Logistikleistung und -kosten heruntergebrochen werden. Diese Ziele stellen Anforderungen an die Logistik dar.

Für die Zielerreichung sowie die dafür notwendigen Aufgaben unterstützen Technologien die industrielle Logistik. Zur Grundlagenlegung wurden die meist diskutiertesten Querschnittstechnologien vorgestellt. IKT, IDT sowie AT bilden die Basis von technischen Anwendungen im industriellen Umfeld. Folglich stellt die Technik die Materialisierung von Technologie dar. Logistische Informationssysteme dienen den logistischen Planungs-, Steuerungs- und Kontrollaufgaben und konnten diesen zugeteilt werden. Abbildung 15 stellt den Zusammenhang von Theorien, Lehren, Logistik und Technologien dar.

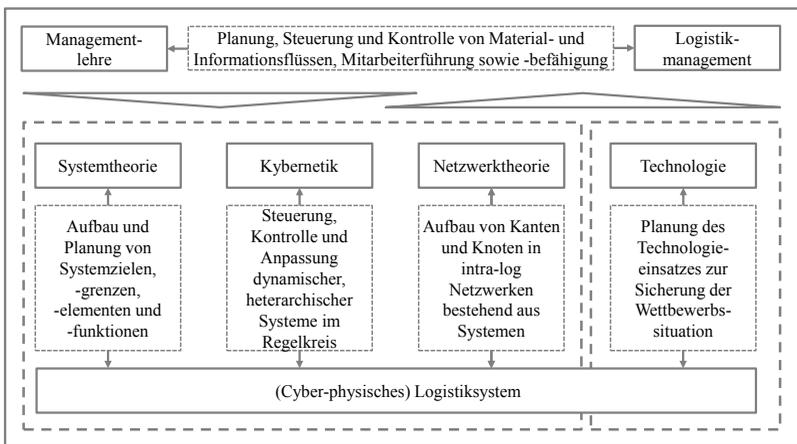


Abbildung 15: Zusammenfassung des theoretischen Bezugssystems²²⁹

Die erste sekundäre Forschungsfrage thematisiert die **Auswirkungen auf das Logistikmanagement** durch logistische/technologische Trends, Herausforderungen und Potenziale. Als **logistische Trends** konnten die steigenden Kundenerwartungen und Individualisierung der Kundenwünsche, die zunehmende Vernetzung der Wirtschaft sowie der Kostendruck und Zielkonflikte identifiziert werden. **Technologisch** sind die Virtualisierung und Digitalisierung, die Auflösung der Automatisierungspyramide und Dezentralisierung, die Vernetzung von Objekten und Subjekten via Internet sowie die zunehmende Integration von Daten, Diensten, Objekten und Subjekten durch Plattformen von Relevanz. Resultierende **Herausforderungen** für das Logistikmanagement sind die klassischen Zielkonflikte innerbetrieblicher Leistungskennzahlen, die Intransparenz und isolierte, zeitversetzte Planung, Steuerung und Kontrolle sowie die inadäquate Nutzung von Kundeninformationen. Die Entwicklungen in I4.0 erhöhen das

²²⁹ Eigene Darstellung.

Spannungsverhältnis zwischen System- und Silodenken, wenn zusätzliche technische Akteure zunehmend in gewohnte Einflussbereiche vordringen. Dadurch wird die Vorbereitung der Führungskräfte sowie des operativen Personals auf ein Arbeitsumfeld nötig, dessen Ausgestaltung noch gar nicht klar ist. Technologisch wird die Sicherstellung der Systemverfügbarkeit aufgrund der Datenzunahme und unter Berücksichtigung der Anforderungen unterschiedlicher Anspruchsgruppen zu einer Herausforderung. Aktuell sind die Leistungsfähigkeit, der wirtschaftliche Nutzen sowie rechtliche Fragestellungen durch eine intransparente Angebotskomplexität für Anwender hinderlich. Die bisherige Auseinandersetzung in Wissenschaft und Praxis spricht dem Konzept I4.0 das **Potenzial** zu, das industrielle Umfeld zu stärken. Neben monetären Markt- und Einsparpotenzialen bei klassischen Zielgrößen wird von Technologien im Kontext von I4.0 erwartet, mittels Virtualisierung die Synchronisation von Material- und Informationsflüssen zu unterstützen. Die Vernetzung und Integration von Akteuren soll eine flexible, echtzeitnahe Produktionsplanung und -steuerung ermöglichen und die Transparenz über die gesamte Wertschöpfung unterstützen. Der Individualisierung soll durch die Integration von Objekten (Behälter, Läger etc.), Subjekten (Personal) sowie Produkten (Kunden) in die Material- und Informationsflüsse zur Realisierung der Losgröße 1 Rechnung getragen werden, um kundenindividuelle Leistungen zu ermöglichen. Smart Data-Anwendungen und Assistenzsysteme ermöglichen Entscheidungsunterstützung bei logistischen Zielkonflikten und Aufgaben.

Für die Beantwortung der primären und sekundären Forschungsfragen hat das theoretische Bezugssystem in Kapitel 2 Sachverhalte und Beziehungen beschrieben und erklärt sowie Abgrenzungen für das Verständnis des Untersuchungsgegenstandes mittels fundamentaler Begriffe vorgenommen. Die Grundlagenlegung fließt in die folgenden Kapitel ein. Kapitel 3 thematisiert das konzeptionelle Bezugssystem, welches Konzepte im Kontext von I4.0 beschreibt und abgrenzt.

3 KONZEPTIONELLES BEZUGSSYSTEM

Ziel von Kapitel 3 ist die Erarbeitung des konzeptionellen Bezugssystems. Nach der Vorstellung des methodischen Vorgehens auf Basis der systematischen Literaturanalyse in Abschnitt 3.1 folgt in Abschnitt 3.2 die Beantwortung der zweiten sekundären Forschungsfrage mit der Beschreibung und Abgrenzung der Konzepte CPS, Internet of Everything²³⁰ (IoE), Smart Ecosystems, I4.0 sowie Smart Factory.

F.2 Welche Konzepte können im Kontext von Industrie 4.0 beschrieben und abgegrenzt werden?

In Abschnitt 3.3 werden Technologien im Kontext der Konzepte identifiziert, vorgestellt und den I4.0-Techniken zugeordnet. Abschnitt 3.4 dient der Identifikation von Eigenschaften und Anforderungen innerhalb der Konzepte.

F.3 Welche Technologien und Techniken können der Industrie 4.0 zugeordnet werden und welche Eigenschaften und Anforderungen existieren prinzipiell?

Die Erkenntnisse der dritten Forschungsfrage liefern Eingangsgrößen, die in der empirischen Analyse durch die Perspektive des Logistikmanagement erweitert werden. Das 3. Kapitel schließt mit einer Abgrenzung und Zusammenfassung in Abschnitt 3.5.

3.1 Systematische Literaturanalyse

Ziel der systematischen Literaturanalyse dieser Arbeit ist die Feststellung des Status quo der I4.0 und der angrenzenden Konzepte. Die Erfassung des gegenwärtigen Forschungsstandes dient der Beantwortung der ersten drei sekundären Forschungsfragen sowie der Vorbereitung der empirischen Analyse. In Anlehnung an *DURACH*²³¹ werden sechs Schritte der Literaturanalyse durchgeführt. Die **Ermittlung des Untersuchungsgegenstandes** erfolgte durch Diskussionen und den Austausch mit Wissenschaftlern im Rahmen von Forschungsprojekten und Veranstaltungen sowie der Durchführung von fünf Interviews auf der HM. Zusätzlich wurde die Forschungslücke (siehe Abschnitt 1.1) in Bezug zur Logistik festgestellt. Die **Definition von Inklusions- und Exklusionskriterien** bezieht sich auf die Qualität der Literatur, das Erscheinungsjahr sowie die verwendete Sprache. Die Begrenzung der Literatur ist notwendig, um wissenschaftlichen Ansprüchen zu genügen. In dem neuartigen Konzept der I4.0 werden aktuelle Veröffentlichungen wie Wikipedia- und Blogbeiträge sowie Kurzbeiträge in populärwissenschaftlichen Zeitungsartikeln aus der Betrachtung ausgenommen. Als relevant wird lediglich Literatur ab dem Jahr 2010 betrachtet, da die Konzepte vor diesem Zeitpunkt noch nicht existierten. Ausnahmen bilden CPS und das Internet der Dinge, Daten und Dienste, welche durch zusätzliche Literatur ergänzt werden. Die Literatur entstammt dem englischen und deutschen Sprachraum. Aufgrund der Aktualität und dem

²³⁰ „IoE“ wurde erstmalig durch das Unternehmen Cisco Systems Inc. im Jahr 2013 vorgestellt.

²³¹ Vgl. Durach (2016), S. 23 ff.

Fehlen einer breiten wissenschaftlichen Basis²³² sowie dem Ursprung von I4.0 in Deutschland wird das **Schneeballverfahren** mit drei deutschen Basiswerken aus den Jahren 2013 und 2014 sowie der Analyse derer Referenzen angewendet.

- **Kagermann; Wahlster; Helbig (2013): Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern – Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0.**
- **Spath (2013): Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0.**
- **Bauernhansl; ten Hompel; Vogel-Heuser (2014): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration.**

Die ersten beiden Werke gelten als die Grundlagenliteratur im Kontext der I4.0, auf die aktuelle Veröffentlichungen verweisen. Das Sammelwerk von *BAUERNHANSL et al.* ist auf Empfehlung von Wissenschaft und Praxis, der Aktualität, der Fülle an Beiträgen sowie der Bezugnahme zur Logistik ausgewählt. Der Selektionsprozess erfolgt iterativ dreistufig anhand der **Suchbegriffe**:

- (<Industrie 4.0> OR <Industry 4.0> OR <Smart Factory> OR <Intelligent Factory> OR <Internet of Things> OR <Cyber-Physical Systems>) AND
- (<Logistics> OR <Logistik> OR <Supply Chain> OR <Production> OR <Produktion> OR <Production Logistics> OR <Manufacturing>).

Nach der Definition von **Kriterien** und **Suchbegriffen** erfolgt deren Anwendung, wie es in Abbildung 16 dargestellt ist.

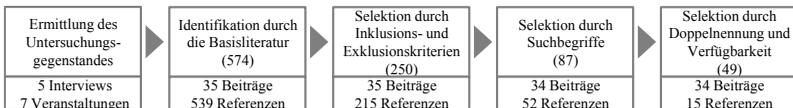


Abbildung 16: Selektionsprozess der systematischen Literaturanalyse²³³

Zunächst werden die Begriffe auf den Titel, dann auf die Zusammenfassung und letztlich auf den Text angewendet. Die 49 identifizierten Beiträge werden anschließend mittels **qualitativer Inhaltsanalyse** ausgewertet. Die Inhaltsanalyse nutzt im Besonderen die drei Gruppen:

- Gruppe 1: (<Grundlage> OR <Definition> OR <Begriffe>)
- Gruppe 2: (<Technologie> OR <Technik> OR <Element> OR <Objekt> OR <Paradigma> OR <Technologie-Paradigma> OR < Personal> OR < Mensch> OR <Plattform> OR <Intelligente*>)
- Gruppe 3: (<Eigenschaft> OR <Anforderung> OR <Fähigkeit>)

²³² Die datenbankbasierte Suche über *Ebsco Business Source Complete, Emeraldinsight* sowie *ieeexplore* führte zu keinem geeigneten Ergebnis in 2016.

²³³ Eigene Darstellung.

Gruppe 1 fokussiert die zweite sekundäre Forschungsfrage für die Beschreibung und Abgrenzung von Konzepten im Kontext von I4.0. In Anlehnung an Merkmale der Gestaltungsebenen der Logistiksysteme aus Kapitel 2 untersucht *Gruppe 2* Technologien und Techniken der I4.0, da diese für die Unterstützung des taktisch/operativen Logistikmanagements als maßgeblich erachtet werden. *Gruppe 3* dient zur abschließenden Beantwortung der dritten sekundären Forschungsfrage sowie als Vorbereitung für die Beantwortung der vierten sekundären Forschungsfrage der empirischen Analyse. Literaturbasiert werden die Leistungsfähigkeit (Eigenschaften) und die Bedürfnisse (Anforderungen) ermittelt und in Kapitel 4 mit der Perspektive des Logistikmanagements abgeglichen und ergänzt. Die **Auswertung** sowie die **Darstellung der Ergebnisse** wird in diesem Kapitel sukzessive vorgenommen.

In Summe wurden 86 Autoren/Institute in den 49 Veröffentlichungen identifiziert, die den wissenschaftlichen Erkenntnisfortschritt innerhalb der Literaturanalyse unterstützen. Eine deskriptive Analyse durch absolute Häufigkeiten der Autoren liefert Abbildung 17. Zu den Autoren konnten vier Forschungsgruppen und ein Unternehmen in Abhängigkeit von der Anzahl der Veröffentlichungen identifiziert werden.

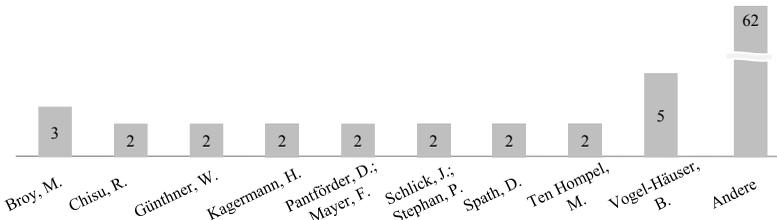


Abbildung 17: Ergebnisse der systematischen Literaturanalyse: Führende Autoren²³⁴

Die Autoren der Forschungsunion und acatech²³⁵ *KAGERMANN*, *WAHLSTER* und *HELBIG* erarbeiteten die Umsetzungsempfehlungen und zahlreiche Veröffentlichungen bzgl. der Grundlagen der I4.0. Die Forschungsgruppe des Fraunhofer IAO um *SPATH* (Schlund, Gerlach, Hämmerle, Krause) greift Grundlagen der I4.0 und in Bezug auf die Produktion auf. Die Technische Universität München (TUM) mit den Autoren *BROY* und *VOGEL-HEUSER* fokussiert CPS-Literatur bezogen auf die Grundlagen, Produktion und insbesondere die Automation. *GÜNTHNER* (TUM) legt seinen Schwerpunkt auf die Logistik im Rahmen von I4.0 und Internet der Dinge. Ebenfalls von der TUM sind *PANTFÖRDER* und *MAYER*, die die Produktion im Kontext von CPS und der Smart Factory erforschen. Die vierte Forschungsgruppe um *TEN HOMPEL* und *HENKE* (beide Fraunhofer IML) legt den Schwerpunkt auf die Logistik um die Konzepte des Internets der Dinge und I4.0. Die beiden Vertreter der Wittenstein AG *SCHLICK* und *STEPHAN* fokussieren innerhalb von I4.0 die Produktion. Neben den Forschungsgruppen wurden 75 weitere Autoren identifiziert, die eine Veröffentlichung tätigten und teils mit

²³⁴ Eigene Darstellung.

²³⁵ Acatech = Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.

den oben genannten zusammenarbeiten. Die I4.0-Literatur weist damit ein fragmentiertes Bild auf. Zur Identifikation von Gestaltungsebenen konnte daher nicht auf die Literatur explizit zurückgegriffen werden. Daher werden die Ebenen auf Basis des in der Arbeit entwickelten theoretischen Bezugssystems erarbeitet. Die Ausdetaillierung erfolgt innerhalb des konzeptionellen Bezugssystems und der empirischen Forschung.

3.2 Konzepte der Industrie 4.0

Die Entwicklungen in IKT, IDT und AT stellen die Basis der digitalen Transformation dar, die sich in dieser Arbeit in den Konzepten der CPS, des IoE, der Smart Ecosystems, der I4.0 sowie der Smart Factory widerspiegelt. Im industriellen Kontext bildet der Übergang von I3.0 (AT und IKT) zu I4.0 (Mechatronik, CPS und Virtualisierung) den Paradigmenwechsel vom Lean Management (Lean Production und Logistics) zur Smart Factory (Smart Production und Logistics)²³⁶ im IoE (Abbildung 18).

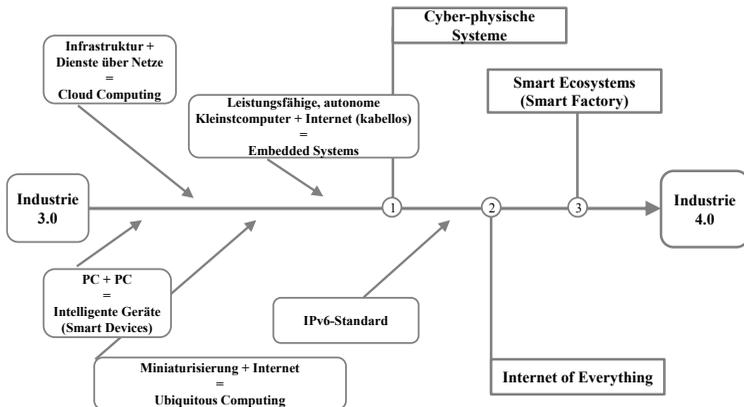


Abbildung 18: Entwicklungspfad im konzeptionellen Bezugssystem²³⁷

Auf Basis der systematischen Literaturanalyse konnten neun Beiträge zu CPS, vier zu IoE, fünf zur Smart Factory (hier zunächst Smart Ecosystems) und 31 zur I4.0 identifiziert werden. Aufgrund der fehlenden Beschreibung und Abgrenzung der Konzepte in der Literatur, dient Abschnitt 3.2 der Schließung dieser Forschungslücke.

3.2.1 Cyber-physische Systeme

Für CPS stellt die cloudbasierte Steuerung das Fundament für die Vernetzung und Bereitstellung von Infrastruktur und Rechenleistung für den zukünftigen Informationsaustausch.²³⁸ Abbildung 19 zeigt die Auflösung der Automatisierungspyramide über die cloudbasierte Steuerung hin zur CPS-basierten Automation. Innerhalb des Netzwerkes

²³⁶ In Anlehnung an Günthner et al. (2014), S. 297

²³⁷ Eigene Darstellung in Anlehnung an Kagermann et al. (2013), S. 17

²³⁸ Vgl. Verl und Lechler (2014), S. 239 f.

können Hardware, Daten, Dienste und verdichtete Informationen auf beliebige Knoten in funktionalen Modulen verteilt werden. Dadurch wird die Nutzung dezentraler Dienste insbesondere für die Mensch-Maschine Schnittstelle eine hohe Bedeutung einnehmen. Abläufe, Funktionen, Daten und Dienste müssen nicht mehr über die klassischen Automatisierungsebenen abgewickelt werden, sondern z.B. auf der operativen Ebene über Dienste in einer Cloud. In welchem Umfang Funktionen, Daten oder Dienste zentral in einer Cloud oder dezentral in einem Objekt zur Verfügung stehen, ist abhängig vom Anwendungsfall und weitestgehend ungeklärt.²³⁹

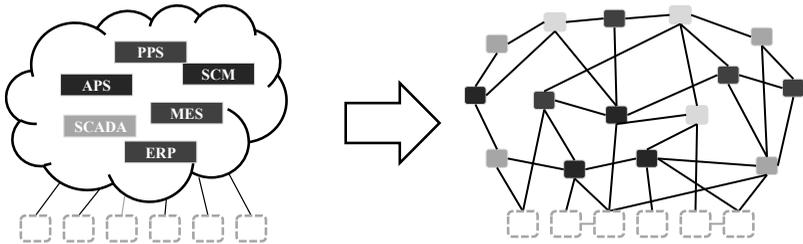


Abbildung 19: CPS-basierte Automation²⁴⁰

Integrierte Sensoren und Aktoren sollen in Computern kleine Netzwerke entstehen lassen, die als eingebettete *Systeme* Alltagsgegenstände wie Smart Phones über das Internet miteinander vernetzen. Im industriellen Umfeld sollen Echtzeitfähigkeit, dezentrale Prozesssteuerung und situationsgerechte Entscheidungsunterstützungen realisiert werden.²⁴¹ Eigenschaften wie Anpassungsfähigkeit oder Selbstorganisation werden Einfluss auf Logistik und Produktion nehmen und Prozessabläufe effizienter gestalten.²⁴² Durch den industriellen Einsatz wird die Entwicklung zu cyber-physischen Produktions- und Logistiksystemen (CPPS bzw. CPLS) angestrebt, wie dies geschehen soll, ist bisher aber noch unklar.²⁴³ Für CPS existiert keine einheitliche Definition.²⁴⁴ Auf Grundlage der systematischen Literaturanalyse wurden in Tabelle 4 Erklärungsansätze von CPS zusammengetragen.

²³⁹ Vgl. VDI und VDE (2013), S. 3 f.

²⁴⁰ Eigene Darstellung in Anlehnung an VDI und VDE (2013), S. 4

²⁴¹ Vgl. BMBF (2013), S. 6

²⁴² Vgl. VDI und VDE (2013), S. 3 f.

²⁴³ Vgl. Kagermann et al. (2013), S. 89 ff.

²⁴⁴ Vgl. VDI und VDE (2013), S. 2 f.

Autor	Cyber-physische Systeme ...
Lee (2008)	<i>„are integrations of computation with physical processes. Embedded computers and networks monitor and control the physical processes, usually with feedback loops where physical processes affect computations and vice versa.“</i>
Broy (2010)	<i>„adressieren die enge Verbindung eingebetteter Systeme zur Überwachung und Steuerung physikalischer Vorgänge mittels Sensoren und Aktuatoren über Kommunikationseinrichtungen mit den globalen digitalen Netzen.“</i>
Vogel- Heuser (2011)	<i>„sind die konsequente Weiterentwicklung eingebetteter Systeme aus Sicht der Informatik. Aus Sicht der Automatisierungstechnik sind CPS die Einbeziehung der unternehmensübergreifenden globalen Vernetzung und der sich selbst adaptierenden Supply-Chains.“</i>
Geis- berger und Broy (2012)	<i>„umfassen eingebettete Systeme, also Geräte, Gebäude, Verkehrsmittel und medizinische Geräte, aber auch Logistik-, Koordinations- und Managementprozesse sowie Internet-Dienste, die mittels Sensoren unmittelbar physikalische Daten erfassen und mittels Aktoren auf physikalische Vorgänge einwirken, Daten auswerten und speichern sowie auf dieser Grundlage aktiv oder reaktiv mit der physikalischen und der digitalen Welt interagieren, mittels digitaler Netze untereinander verbunden sind, und zwar sowohl drahtlos als auch drahtgebunden, sowohl lokal als auch global, weltweit verfügbare Daten und Dienste nutzen, über eine Reihe multimodaler Mensch-Maschine-Schnittstellen verfügen, [...].“</i>
Kager- mann et al. (2013)	<i>„Unternehmen werden zukünftig ihre Maschinen, Lagersysteme und Betriebsmittel als CPS weltweit vernetzen. Diese umfassen in der Produktion intelligente Maschinen, Lagersysteme und Betriebsmittel, die eigenständig Informationen austauschen, Aktionen auslösen und sich gegenseitig selbstständig steuern.“</i>
Spath (2013)	<i>„sind mit einer eigenen dezentralen Steuerung (engl. embedded systems) versehene intelligente Objekte, welche in einem Internet der Daten und Dienste miteinander vernetzt sind und sich selbstständig steuern.“</i>
Bau- ernhansl (2014)	<i>„sind Objekte, Geräte, Gebäude, Verkehrsmittel, aber auch Produktionsanlagen, Logistikkomponenten etc., die eingebettete Systeme enthalten, die kommunikationsfähig gemacht werden. Diese Systeme können über das Internet kommunizieren und Internetdienste nutzen. Cyber-physische Systeme können ihre Umwelt unmittelbar mit ihrer entsprechenden Sensorik erfassen, sie mit Hilfe weltweit verfügbarer Daten und Dienste auswerten, speichern und sie können mit Hilfe von Aktoren auf die physikalische Welt einwirken.“</i>

Tabelle 4: Terminologie cyber-physischer Systeme

Aus der Perspektive der einzelnen Autoren sowie der Vielzahl der Erklärungsansätze wird ersichtlich, wie wenig ein einheitliches Verständnis über den Begriff der CPS besteht. Aus den identifizierten Erklärungsansätzen und Definitionen können Elemente, Komponenten und Funktionen abgeleitet werden. Diese werden in Abbildung 20 durch die Entwicklung des prinzipiellen Aufbaus eines CPS dargestellt.

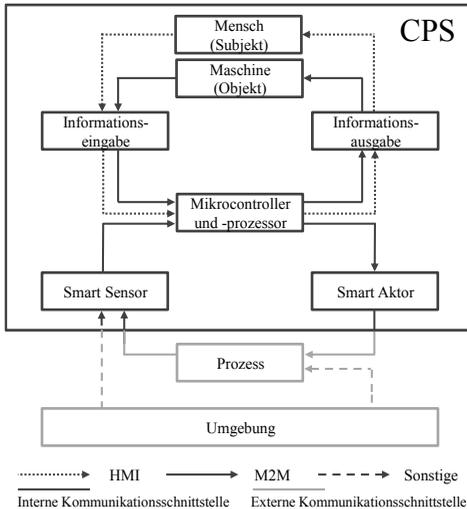


Abbildung 20: Aufbau eines cyber-physischen Systems²⁴⁵

steigern.²⁴⁶ Dadurch integrieren CPS die Informationseingabe sowie -ausgabe, d.h. die **Benutzer- bzw. Maschinenschnittstelle** ist inhärenter Bestandteil eines CPS bzw. kann z. B. in Form eines Smart Phones selbst ein CPS darstellen und liegt nicht außerhalb²⁴⁷, wie dies bei einem AS der Fall ist. Zusätzlich zu den Benutzer- und Prozessschnittstellen kann die externe Kommunikationsschnittstelle inhärenter Bestandteil eines CPS sein und erlaubt diesem funk- oder kabelbasiert mit anderen Netzwerken (andere CPS, Personal oder dem physischen Prozess) in Kontakt zu treten und dadurch die physische mit der virtuellen Welt zu verschmelzen.²⁴⁸ Diese räumliche Integration der CPS kann durch **smarte Sensoren und Aktoren** realisiert werden. Die Hauptaufgabe smarter Sensoren liegt in der Messung analoger physikalischer Größen (z. B. Druck), der Digitalisierung dieser Messwerte sowie der Übertragung der Signale an die Informationsverarbeitung (**Mikroprozessor bzw. -controller**). Die digitalen Signale von Prozessor und Controller steuern direkt die smarten Aktoren an. Die digitalen Signale werden in analoge rückverwandelt, verstärkt und in Aktionen (Kraft oder Bewegung) transformiert.²⁴⁹ Im Fokus von Hard- und Software-Komponenten für Mensch-Maschine-Interaktionen stehen vordergründig **Funktionen** wie *Identifizieren & Erfassen* sowie *Analysieren & Entscheiden*. Die Sonderrolle smarter Sensoren und Aktoren wird insbesondere durch Aktoren bestimmt, mit deren Hilfe das *Entscheiden & Reagieren* ermöglicht wird. Der Realisierungsgrad dieser ist vorangeschritten. Die technologischen Komponenten existieren

Die wesentlichen Unterschiede zum klassischen AS liegen in der Ausdehnung, den Schnittstellen sowie Komponenten. Die Verbreitung von CPS in zukünftigen Fabriken wird logistische Objekte und Subjekte über Schnittstellen miteinander interagieren lassen. Autonome Entscheidungsfindungen unterstützen durch Visualisierung das Personal, um mit der Komplexität der Datenzunahme umgehen zu können. Mensch-Maschine-Schnittstellen im industriellen Umfeld werden zusätzlich die Komplexität

²⁴⁵ Eigene Darstellung.

²⁴⁶ Vgl. Bauernhansl (2014), S. 15 ff.; Vogel-Heuser (2014), S. 37 f.

²⁴⁷ Wesentliches Charakteristikum der Kybernetik zweiter Ordnung.

²⁴⁸ Vgl. Bauer et al. (2014), S. 19

²⁴⁹ Vgl. VDI 2206 (2004), S. 15

tieren seit geraumer Zeit. Das Neue bei CPS ist die Vernetzung von Hard- und Software-Komponenten wie Sensoren, Aktoren über **offene und globale Kommunikationsnetzwerke** wie dem Internet.²⁵⁰ Neben Mikrocontrollern, die i. d. R. für die Steuerung verantwortlich sind, übernehmen Mikroprozessoren²⁵¹ die Verarbeitung der Daten. Mikrocontroller erzeugen die „Intelligenz“ eines CPS.²⁵² Mikrocontroller integrieren auf einem Speicherchip²⁵³ Mikroprozessor, Programm- und Datenspeicher, Ein- und Ausgabestellen sowie Hardware, die die Verbindung mit externen Komponenten wie z. B. Sensoren und Aktoren ermöglicht.²⁵⁴ Im Gegensatz zu AS ist der technische Prozess i. d. R. nicht Bestandteil eines CPS. CPS beginnen erst mit der Aufnahme diskreter, binärer Daten durch smarte Sensoren und Aktoren.²⁵⁵ Neben Material- und Informationsflüssen ist die Energieversorgung analog zum AS für ein CPS unentbehrlich. Der entwickelte Aufbau kann das Begriffsverständnis unterstützen. Für die Arbeit sollen CPS wie folgt definiert sein:

„CPS sind dezentrale, autonome eingebettete Systeme, die auf Basis von IKT, IDT und AT in physische Objekte integriert sind und via Internet direkt miteinander interagieren. Die Technologien gewährleisten die Kommunikations-, Netzwerk- und Internetfähigkeit, mit denen die physische mit der virtuellen Realität vernetzt wird. Materialisiert in technischen Komponenten besitzen CPS die Funktionen Daten zu identifizieren & zu erfassen (smarte Sensoren), zu speichern, zu analysieren & entscheiden (Mikrocontroller und -prozessor), zu reagieren (smarte Aktoren) sowie diese darzustellen (HMI).“

Die Diskussion, inwiefern ein CPS als intelligentes Objekt verstanden werden kann, ist in der Wissenschaft nicht eindeutig geklärt. Im Rahmen der Literaturanalyse wurde festgestellt, dass diverse Begriffe in englischer sowie in deutscher Sprache synonym Verwendung finden. Begriffe sind u. a. CPS, eingebettete Systeme oder intelligente Objekte. Auf Komponentenebene definieren Autoren die Intelligenz eines Objektes anhand dessen Fähigkeit, Daten und Informationen zu verarbeiten. Die Verarbeitungsfunktion stellt eine Grundvoraussetzung für autonomes und dezentrales Verhalten intelligenter Objekte dar. Der Prozess der Verarbeitung kann außerhalb des intelligenten Objektes im übergeordneten System, eingebettet in dem Objekt oder in kombinierter Weise²⁵⁶ erfolgen.²⁵⁷ Die Komponenten Mikrocontroller und -prozessor, smarte Sensoren und Aktoren sowie die Kommunikationssysteme können aus einem passiven Objekt ein intelligentes Objekt machen.²⁵⁸ D. h. CPS können als intelligente Objekte interpretiert wer-

²⁵⁰ Vgl. Geisberger und Broy (2012), S. 20

²⁵¹ Nach Kagermann (2014), S. 604 f. sind Prozessoren heute zu 98 % in intelligenten Objekten und Produkten integriert.

²⁵² Vgl. Bauer et al. (2014), S. 19

²⁵³ Speicher sind Read-Only Memory (ROM) und Random Access Memory (RAM).

²⁵⁴ Vgl. Isermann (2008), S. 536 ff.

²⁵⁵ Vgl. Vogel-Heuser (2014), S. 39

²⁵⁶ Im Mikrocontroller und -prozessor und/oder in der Cloud.

²⁵⁷ Vgl. Deindl (2013), S. 83

²⁵⁸ Vgl. Bauer et al. (2014), S. 19

den.²⁵⁹ Während ein intelligentes Objekt i. d. R. immer ein CPS ist, muss ein CPS nicht unbedingt ein intelligentes Objekt sein. In dieser Arbeit ist die „Intelligenz“ eines CPS durch den Ort der Informationsverarbeitung, seine Funktionen und Eigenschaften determiniert. Die alleinige Ausstattung eines CPS z. B. mit der Funktion „identifizieren“ erfüllt den Terminus nicht vollständig, da die Funktionen auch isoliert voneinander einen Zweck erfüllen. Erst deren integrierte Wechselwirkung in einem CPS befähigt Objekte u. a. dezentrale, autonome oder selbststeuernde Eigenschaften anzunehmen und somit „intelligent“ zu agieren. Die Auseinandersetzung mit Eigenschaften wird in Kapitel 4 vorgenommen.

3.2.2 Internet of Everything

Es existiert weder eine einheitliche Begriffsdefinition²⁶⁰, noch stellt das **Internet der Dinge** (IdD) eine geschlossene Technologie dar. IdD wird im Rahmen der Arbeit als Konzept verstanden. Im angelsächsischen Raum wird der Begriff häufig synonym mit den Konzepten „Ubiquitous Computing“ (UC) oder „Pervasive Computing“ (PC) verwendet. Nach *BRAND et al.* geht das IdD über UC und PC hinaus. Während UC und PC die „Ausstattung von Objekten mit technischer Logik und der (dezentralen) Verarbeitung akquirierter Umgebungsdaten“ inkludieren, fokussiert das IdD autonomes Handeln von Dingen/Objekten in einem Netzwerk.²⁶¹

Die Vision des IdD wurde erstmalig von *MARK WEISER* im Jahr 1991 formuliert, in der „specialised elements of hardware and software connected by wires, radio waves and infrared, will be so ubiquitous that no one will notice their presence“.²⁶² Der Begriff „Internet of Things“ (Internet der Dinge) wurde erstmals von *KEVIN ASHTON* im Jahr 1999 als ein „informationstechnisch vernetztes System autonom interagierender Gegenstände und Prozesse, die sich durch eine zunehmende Selbstorganisation charakterisieren und zu einer wachsenden Verschmelzung physischer Dinge mit der digitalen Welt des Internets führen“²⁶³ beschrieben. 2001 fasste sein Mitarbeiter *DAVID BROCK* in der Vision einer „Smart World“ den Begriff als „an intelligent infrastructure linking objects, information and people through the computer network. This new infrastructure will allow universal coordination of physical resources through remote monitoring and control by humans and machines. Our objective is to create open standards, protocols and languages to facilitate worldwide adoption of this network – forming the basis for a new “Internet of Things”²⁶⁴ zusammen.

Nach *SCHLICK et al.* existiert im IdD die *allgegenwärtige Vernetzung* über das Internet, mit dessen Unterstützung Alltagsgegenstände erfasst, gelesen, gefiltert und inter-

²⁵⁹ Vgl. Capgemini (2014), S. 6

²⁶⁰ Vgl. Brand et al. (2009), S. 14; Schlick et al. (2014), S. 57f.

²⁶¹ Vgl. Brand et al. (2009), S. 14

²⁶² Weiser (1991), S. 94

²⁶³ Brand et al. (2009), S. 13

²⁶⁴ Brock (2001), S. 5

pretiert werden können. Mit den Dingen und deren Funktionen wird eine *allgegenwärtige Assistenz* für den Menschen realisiert, der neben den Objekten interpretiert und reagiert. Zudem ermöglicht die *allgegenwärtige Intelligenz* die übergeordnete Steuerung und Regelung von Prozessen im technischen Regelkreis.²⁶⁵ Die Koordination, Steuerung und Kontrolle physischer Prozesse kann im IdD durch Mensch oder Maschine erfolgen. Grundlage ist ein intelligentes Netzwerk von Computern, gemeinsame Ontologien²⁶⁶ sowie Standards für eine weltweite Integration. Die Alltagsgegenstände haben kabelgebunden oder -los Netzwerkzugriff, sind via IPv6 adressiert und können mittels eigener Rechenleistung und Schnittstellen eindeutig identifiziert werden, Daten aus der Umwelt sammeln und diese manipulieren.²⁶⁷ Die durchgängige Vernetzung ermöglicht die Schließung von Medienbrüchen zwischen virtueller und physischer Welt und erweitert das Angebot von Mehrwertdiensten.²⁶⁸ Die über das Internet der Dinge vernetzten Gegenstände weisen damit gleiche Charakteristika wie CPS auf.

Das **Internet der Dienste und Daten** ist „*Teil des Internets, der Dienste und Funktionalitäten als granulare, web-basierte Software-Komponenten abbildet. [...] Über Internetdiensttechnologien sind die einzelnen Software-Bausteine beziehungsweise Dienstleistungen miteinander integrierbar. Unternehmen können die einzelnen Software-Komponenten zu komplexen und dennoch flexiblen Lösungen orchestrieren (dienstorientierte Architektur).*“²⁶⁹ Das Internet der Daten bezieht seine Eingangsgrößen aus dem IdD und entwickelt aus den verarbeiteten Informationen ein Internet der Dienste, die dem IdD zur Verfügung stehen. Das Internet der Dienste bezieht sich demnach auf Dienste, die den Objekten des Internets der Dinge zur Verfügung stehen und durch die Funktionen der CPS ermöglicht werden. Neben dem Internet der Dinge, Dienste und Daten dehnt sich das Konzept durch die Integration des Menschen sukzessive aus.

Die Veränderungen von Querschnittstechnologien und CPS haben durch Computer seit dem Ende der 1940er Jahre eine beschleunigte Entwicklung erfahren, in der Rechenleistung, Speichergrößen und Netzkapazitäten exponentielle Wachstumskurven mit reziproker Kostendegression die Folge waren. Gleichzeitig macht die technologische Konvergenz einen kostengünstigen und flächendeckenden Einsatz zuvor separierter Technologien möglich, die mit dem Internet der Dinge, Dienste, Daten und Menschen ein „*Internet of Everything*“ entstehen lassen, in dem (intelligente) Subjekte und Objekte im virtuellen und physischen Raum in Echtzeit in Austausch treten können.²⁷⁰ Subjekte und Objekte befinden sich in allen gesellschaftlichen Bereichen. Städte, Mobilität, Energie

²⁶⁵ Vgl. Schlick et al. (2014), S. 58

²⁶⁶ Nach Busse et al. (2014), S. 286 ist Ontologie eine „*formale Definition von Begriffen und deren Beziehungen als Grundlage für ein gemeinsames Verständnis*“.

²⁶⁷ Vgl. Schöning und Dorchain (2014), S. 544

²⁶⁸ Vgl. Schlick et al. (2014), S. 57

²⁶⁹ Kagermann et al. (2013), S. 85

²⁷⁰ Vgl. Kagermann (2014), S. 604

und Gebäude²⁷¹ werden ebenso vom IoE erfasst wie Unternehmen und Industrie.²⁷² Die Vielzahl an Konzepten und Erklärungsansätzen für das Internet der Dinge, Daten, Dienste und Menschen macht die Schwierigkeit der Begriffsbildung deutlich. Für die Arbeit ist das IoE wie folgt definiert:

„Das Internet of Everything ist die Vernetzung von Dingen, Diensten, Daten und Menschen via Internet. Basis bilden konvergierende IKT, IDT und AT in cyber-physischen Systemen, die Subjekte und Objekte mit einer IP-Adresse versehen und kurz-, mittel- oder langfristige virtuelle oder physische Netzwerke formen. In diesen Netzwerken tauschen Dinge und Menschen in Echtzeit Dienste und Daten domänenübergreifend aus, indem sie dezentral und autonom identifizieren, erfassen, speichern, analysieren, entscheiden, reagieren sowie darstellen.“

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Konzepte des Internets der Dinge, Dienste, Daten und Menschen unter dem IoE zusammengefasst. Die Anwendung des IoE im industriellen Umfeld beschreibt die Smart Ecosystems.

3.2.3 Smart Ecosystems

Das *OXFORD ADVANCED LEARNED DICTIONARY* übersetzt den Begriff „smart“ mit „clever, schlau, intelligent“ im technischen Kontext als „computer-controlled of a device, especially (...) to act in an intelligent way“.²⁷³ In Internet und Literatur existiert eine Vielzahl von Zusammenhängen, in denen der Begriff verwendet wird. Für „Intelligenz“ existiert ebenfalls keine einheitliche Definition. Beide Begriffe werden in der Arbeit synonym verwendet und folgen der im Abschnitt der CPS erarbeiteten Abgrenzung.

Begriffe wie „Internet der [...]“ und „Smart [...]“ werden i. d. R. synonym verwendet, wie z. B. beim „Internet der Energie“ und dem „Smart Grid“. In dieser Arbeit soll für intelligente Anwendungsfelder der Begriff der „Smart Ecosystems“ verwendet werden. Darunter werden **industrielle Ökosysteme** verstanden, die im Wettbewerb zueinander stehen oder sich gegenseitig ergänzen können. „Ökosystem“ beschreibt hier ein vernetztes System oder eine Gruppe, in der strategische Allianzen zwischen den Akteuren entstehen. Diese Ökosysteme beruhen auf Plattformen und Standards.²⁷⁴ Smart Ecosystems sind demnach die industrielle Anwendung des IoE. Unter einem Smart Ecosystem können auch nicht kommerzielle Anwendungen gemeinnütziger Organisationen subsumiert werden, was im Rahmen dieser Arbeit jedoch vernachlässigt wird. Weder für die einzelnen Ökosysteme noch als übergeordnetes Konzept existieren einheitliche Definitionen, daher werden Smart Ecosystems wie folgt definiert:

²⁷¹ Synonym wird in diesem Kontext z. B. vom Internet der Energie etc. gesprochen.

²⁷² Vgl. Kagermann et al. (2013), S. 43

²⁷³ Oxford Press (2005), S. 1442 f.

²⁷⁴ Vgl. Geisberger und Broy (2012), S. 183

„Smart Ecosystems bezeichnen industrielle Ökosysteme, deren Anwendungsdomänen symbiotisch oder kompetitiv auf Basis von IKT, IDT und AT sowie den daraus resultierenden cyber-physischen Systemen interagieren. Die Domänen können sich analog zum Internet of Everything auf alle Lebensbereiche (z.B. Smart Home, Smart Grid, Smart Factory) erstrecken. Die Domänen können dezentral und autonom in sich geschlossen wirken oder in anderen Domänen integriert sein.“

Die Vernetzung unterschiedlichster Domänen wird seit einigen Jahren propagiert. Der technologische Reifegrad von IKT, IDT und AT soll die Vernetzung von u. a. Fahrzeugen (Smart Mobility), von Energieerzeugern und -verbrauchern (Smart Grid) sowie Häusern (Smart Home) oder des Verkehrs (Smart Transportation) möglich machen. CPS als technologische Grundlage des IoE und deren Anwendung in der Industrie lassen Smart Ecosystems entstehen, in denen Systeme mit Systemen in Kontakt treten.²⁷⁵ Für die Vernetzung von Wertschöpfungssystemen innerhalb und außerhalb der Fabrik wird in Deutschland der Begriff Industrie 4.0 verwendet.²⁷⁶

3.2.4 Industrie 4.0

Ob es sich um eine Revolution oder Evolution bereits vorhandener Technologien handelt, ist bisher ungeklärt.²⁷⁷ „Eine eindeutige, allgemein akzeptierte Darstellung von Industrie 4.0 existiert derzeit noch nicht.“²⁷⁸ Auf Grundlage der systematischen Literaturanalyse wurden in Tabelle 5 die Definitionen der meist zitierten Organisationen bzw. Autoren zusammengetragen.

Autor	Industrie 4.0 ...
Spath (2013)	<i>[ist] „die beginnende vierte industrielle Revolution nach Mechanisierung, Industrialisierung und Automatisierung [..]. Zentrales Element sind vernetzte Cyber-Physische Systeme (CPS).“</i>
Forschungsunion/acatech (2013)	<i>„meint im Kern die technische Integration von CPS 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.“</i>
Plattform Industrie 4.0 (2014)	<i>„steht für die vierte industrielle Revolution, einer neuen Stufe der Organisation und Steuerung der gesamten Wertschöpfungskette über den Lebenszyklus von Produkten. Dieser Zyklus orientiert sich an den zunehmend individualisierten Kundenwünschen und erstreckt sich von der Idee, dem Auftrag über die Entwicklung und Fertigung, die Auslieferung eines Produkts an den Endkunden bis hin zum Recycling, einschließlich der damit verbundenen Dienstleistungen. Ba-</i>

²⁷⁵ Vgl. Bauernhansl (2014), S. 15 ff.

²⁷⁶ Vgl. Dais (2014), S. 628

²⁷⁷ Vgl. Dais (2014), S. 625; VDE und DIN (2013), S. 8

²⁷⁸ Bauer et al. (2014), S. 18

	<p><i>sis ist die Verfügbarkeit aller relevanten Informationen in Echtzeit durch Vernetzung aller an der Wertschöpfung beteiligten Instanzen sowie die Fähigkeit, aus den Daten den zu jedem Zeitpunkt optimalen Wertschöpfungsfluss abzuleiten. Durch die Verbindung von Menschen, Objekten und Systemen entstehen dynamische, echtzeitoptimierte und selbstorganisierende, unternehmensübergreifende Wertschöpfungsnetzwerke, die sich nach unterschiedlichen Kriterien wie beispielsweise Kosten, Verfügbarkeit und Ressourcenverbrauch optimieren lassen.“</i></p>
Kagermann (2014)	<p><i>„ist durch eine noch nie da gewesene Vernetzung über das Internet und durch die Verschmelzung der physischen mit der virtuellen Welt, dem Cyberspace, zu so genannten Cyber-Physical Systems (CPS) gekennzeichnet.“</i></p> <p><i>[sind] „Entwicklungen hin zu einem Produktionsumfeld [...], das aus intelligenten, sich selbst steuernden Objekten besteht, die sich zur Erfüllung von Aufgaben zielgerichtet temporär vernetzen. In diesem Zusammenhang wird auch von Cyber-Physischen Produktionssystemen (CPPS) gesprochen.“</i></p>
Bauer et al. (2014)	<p><i>„Im Mittelpunkt von Industrie 4.0 steht die echtzeitfähige, intelligente, horizontale und vertikale Vernetzung von Menschen, Maschinen, Objekten und IKT-Systemen zum dynamischen Management von komplexen Systemen.“</i></p>

Tabelle 5: Terminologie Industrie 4.0

Die Beschreibungen und Erklärungsansätze liefern keine einheitliche Definition. Übereinstimmend werden die Begriffe **CPS**, **Internet der Dinge bzw. Dienste**, **Big Data**, **Cloud Computing** und die **Smart Factory** verwendet. HERMANN *et al.* definieren CPS, Internet der Dinge bzw. Dienste und die Smart Factory als Basiskomponenten von I4.0, deren Design-Prinzipien die Interoperabilität, Virtualisierung, Dezentralisierung, Echtzeitfähigkeit, Service-Orientierung und Modularität darstellen.²⁷⁹ Zu Komponenten von I4.0 zählt KAGERMANN die Smart Factory, Smart Products, Big/Smart Data-Anwendungen, Visualisierung und Interaktion, Optimierung von Produkten und Prozessen sowie die Vernetzung der Komponenten durch vertrauenswürdige Cloud-Infrastrukturen.²⁸⁰ Auf Grundlage von Beschreibungen, Komponenten und Erklärungsansätzen soll für die vorliegende Arbeit I4.0 wie folgt definiert werden:

„Industrie 4.0 ist die industrielle Anwendung des Internet of Everything, materialisiert in einer oder einem Netzwerk aus Smart Factories. Ziel ist die digitale Durchgängigkeit vertikal und horizontal integrierter Wertschöpfungssysteme zur Reduzierung von Medienbrüchen. Subjekte (assistierte Entscheider), intelligente Objekte (Betriebsmittel, Ladungsträger, ...) und Produkte (Kunden) werden auf Basis von CPS mit Funktionen und Eigenschaften ausgestattet, die sie befähigen, dezentral und autonom zu planen, zu steuern, zu kontrollieren, zu organisieren und zu lernen. Über Integrationsplattformen (Cloud Computing) werden sie via Inter- oder Intranet zu cyber-physischen Logistik-

²⁷⁹ Vgl. Hermann et al. (2015), S. 8 ff.

²⁸⁰ Vgl. Kagermann (2014), S. 609

und Produktionssystemen vernetzt und in den gesamten Produktlebenszyklus integriert, so dass aus Daten (Big Data) Informationen (Smart Data) werden.“

Die bisherige Analyse zeigt, dass CPS für I4.0 die Basistechnologie darstellt. Bereits seit dem Jahr 2014 sind Prozessoren zu 98 % in Objekten verbaut und nicht in Computern, so dass Objekte zu intelligenten Objekten werden und diese intelligente Umgebungen aufbauen.²⁸¹ Intelligente Objekte und Produkte (Smart Products) sollen eindeutig identifizierbar und jederzeit lokalisierbar sein und jederzeit ihren Produktionsstatus kennen. Dadurch sollen sie in die Lage versetzt werden, selbstständig ihren Produktionsablauf zu steuern sowie relevante Daten über den gesamten Produktionslebenszyklus zu sammeln. Intelligente Produkte greifen dadurch nicht nur aktiv in den Produktionsprozess ein, sondern werden zu Plattformen neuer Dienstleistungen und Geschäftsmodelle. In I4.0 bedeutet dies eine übergreifende Vernetzung der industriellen Produktion (Fabriken, Lieferanten und Kunden) über das Internet, realisiert durch eine engere Verflechtung von ERP, MES und Datenbanken in Echtzeit. CPS schaffen hier die technologische Voraussetzung auf der operativen Ebene. Entscheidend für diese Entwicklung sind Big Data und Cloud Computing.²⁸² Die entstehenden Informationen werden für die „Optimierung der Smart Factory hinsichtlich der Logistik, des Einsatzes und der Wartung sowie für die Integration in die betriebswirtschaftlichen IT-Anwendungen genutzt werden.“²⁸³

3.2.5 Smart Factory

Die Smart Factory wird im Kontext von I4.0 als wesentliches Konzept thematisiert, besitzt allerdings weder eine einheitliche Begriffsdefinition noch einen führenden Autor. Die wesentliche Neuerung der Smart Factory im Vergleich zu anderen Fabrikansätzen, wie der digitalen oder der fraktalen Fabrik, ist die Integration von externen Kunden durch intelligente Produkte und Materialien in innerbetriebliche Prozesse, so dass interne und externe Prozesse zu durchgängigen Wertschöpfungsnetzwerken vernetzt werden. Diese umfassende Vernetzung kann die taktgetriebene Logistik innerhalb und außerhalb der Fabrik hin zu einer nicht-deterministischen Logistik verändern.

Basis der Smart Factory bilden CPS, die die Selbststeuerung der Produktion und deren Vernetzung ermöglichen sollen.²⁸⁴ Eingebettet in intelligente Objekte sollen dezentrale und autonome Entscheidungsfindungsprozesse ermöglicht werden, die z.B. die Störanfälligkeit von Ad hoc-Netzwerken zur Befriedigung kurzfristiger entstehender Kundenwünsche reduzieren. Die Objekte besitzen ähnliche Eigenschaften wie die Fraktale von *WARNECKE*, weshalb *BAUERNHANSL* von einer „*Fraktalisierung im Wertschöpfungsnetz*“ spricht, die „*die Antwort auf die steigende Komplexität [bietet, damit] stei-*

²⁸¹ Vgl. Kagermann (2014), S. 604 f.

²⁸² Vgl. Kleinemeier (2014), S. 572

²⁸³ Kagermann et al. (2013), S. 25

²⁸⁴ Vgl. Heisterhagen (2014), S. 2 f.

gender Komplexität der Grad der Autonomie und der Dezentralisierung“²⁸⁵ zunimmt. Dadurch wird die Steuerung von Entscheidungsprozessen in einem vordefinierten Handlungsrahmen notwendig, so dass die autarke Entscheidungsfindung nicht mehr auf der höchsten Ebene der Automatisierungspyramide realisiert wird, sondern auf der operativen Feldebene.²⁸⁶ Diese Entwicklung deckt sich mit den Entwicklungen der CPS-basierten Automation der vorangegangenen Kapitel. KAGERMANN *et al.* postuliert in diesem Zusammenhang eine gänzlich neue Produktionslogik: *„Die intelligenten Produkte sind eindeutig identifizierbar, jederzeit lokalisierbar und kennen ihre Historie, ihren aktuellen Zustand sowie alternative Wege zum Zielzustand. Die eingebetteten Produktionssysteme sind vertikal mit betriebswirtschaftlichen Prozessen innerhalb von Fabriken und Unternehmen vernetzt und horizontal zu verteilen, in Echtzeit steuerbaren Wertschöpfungsnetzwerken verknüpft – von der Bestellung bis zur Ausgangslogistik.“*²⁸⁷ Dadurch wird ein durchgängiges Engineering über alle internen und externen Prozessabläufe ermöglicht,²⁸⁸ welches der Individualisierung der Kundenwünsche aufgrund kurzfristiger Auftragsänderungen durch die Losgröße 1 Rechnung trägt. Ermöglicht wird dies durch die ubiquitäre Vernetzung intelligenter Objekte und Systeme, Ressourcen sowie Menschen, die miteinander Daten und Informationen austauschen.²⁸⁹ Der Akzeptanz durch den Menschen wird in der Smart Factory durch die Stärkung der Mensch-Maschine-Schnittstelle Rechnung getragen. Beispielweise unterstützt die Übertragung der Logik sozialer Netzwerke im Ablauf durch einen Dialog zwischen Mensch und Maschine oder zwischen Maschine und Maschine die Erhöhung der Transparenz, indem kontextbezogen und objektübergreifend Informationen über Zustände und Aufträge ausgetauscht werden.²⁹⁰ Die Smart Factory wird in der Arbeit wie folgt definiert:

„Die Smart Factory ist das industrielle Ökosystem für Produktion und Logistik, in der via Inter- oder Intranet kurz-, mittel- oder langfristige unternehmensinterne oder -externe Netzwerke aus intelligenten Objekten und Subjekten cyber-physische Logistik- und Produktionssysteme formen. Basis bilden CPS, die Objekte, Subjekte und Systeme befähigen, dezentral und autonom zu planen, zu steuern, zu kontrollieren, zu organisieren und zu lernen.“

Die Arbeit konzentriert sich auf unternehmensinterne Netzwerke intelligenter Objekte und Subjekte in einer Smart Factory aus der Perspektive des Logistikmanagements.

3.3 Technologien und Techniken der Industrie 4.0

Die Basisliteratur weist ein fragmentiertes Bild aus Konzepten und Technologien auf. KAGERMANN *et al.* weisen auf den Zusammenhang von I4.0, CPS und dem Internet

²⁸⁵ Bauernhansl (2014), S. 15

²⁸⁶ Vgl. Dais (2014), S. 629 f.

²⁸⁷ Kagermann *et al.* (2013), S. 5

²⁸⁸ Vgl. Kagermann *et al.* (2013), S. 5 und S. 24 f.

²⁸⁹ Vgl. Heisterhagen (2014), S. 2 f.

²⁹⁰ Vgl. Bauer *et al.* (2014), S. 20

der Dinge hin.²⁹¹ SPATH et al. betonen die Wichtigkeit von IKT und IDT, Sensoren und Aktoren und CPS.²⁹² BAUER et al. thematisieren die fünf Technologiefelder Embedded Systems CPS, IT-Security, Cloud Computing, robuste Netze und die Smart Factory.²⁹³ Deutlich wird, dass die Begriffe von Technologien, Techniken oder Konzepten in der Basisliteratur eine gänzlich unterschiedliche Anwendung finden. Es existieren weder konkrete CPS-, noch I4.0-Technologien in Praxis und Wissenschaft. Die bisher erwähnten Technologien sind Ergebnisse der Literaturanalyse. Aufgrund von CPS und der Konzepte von IoE, Smart Ecosystems oder der I4.0 wird der nächste „Evolutionsschritt“ in z. T. neue oder veränderte Funktionen, Eigenschaften oder Anforderungen münden. Zur Anwendung kommende Begriffe, wie *smarte Technologien* oder digitale Technologien basieren ebenfalls auf IKT bzw. IDT sowie AT und sind generischer Natur, d. h. sie kommen auch außerhalb der industriellen Anwendung zum Einsatz. Das Konzept I4.0 bezieht sich per Definition auf die Anwendung in Produktion und Logistik in der Smart Factory, daher wird für die vorliegende Arbeit der Begriff „*Industrie 4.0-Technologien*“ verwendet.

„I4.0-Technologien sind Technologien, die durch IKT, IDT und AT über das Internet miteinander vernetzt und über CPS in intelligenten Objekten und Subjekten integriert sind. Im Fokus stehen industrielle Anwendungen in cyber-physischen Produktions- und Logistiksystemen in einer oder einem Netzwerk aus Smart Factories.“

Das Ziel von Anwendungen in I4.0 liegt in der Ausschöpfung vorhandener Potenziale in Produktion und Logistik. Die Vernetzung von bisher informatorisch getrennten Kanten und Knoten eines innerbetrieblichen Logistiksystems wird die Optimierung von organisatorischen und technischen Prozessen unterstützen. In diesem Rahmen sind Technologien Mittel zum Zweck, um die Ziele zu erreichen.²⁹⁴ Die in dieser Arbeit genutzte Terminologie der „Industrie 4.0-Techniken“ wird in der Literatur synonym unter den Begriffen „Systeme“ oder „Technologieparadigmen“ verwendet. Auf Grundlage der in Kapitel 2 entwickelten Definition von Technologie und Technik soll in dieser Arbeit der Begriff „*Industrie 4.0-Technik*“ Verwendung finden.

„Industrie 4.0-Techniken sind die Materialisierung von Industrie 4.0-Technologien. Sie materialisieren sich in produktionslogistischen Objekten, Subjekten und Plattformen, die in Abhängigkeit der Anwendung durch spezifische Funktionen und Eigenschaften determiniert sind und vernetzt Objekt- und Subjektsysteme bilden.“

Auf Basis der Literaturanalyse (Abbildung 21) konnte eine Häufung der Beiträge zu I4.0-Techniken bei Personal, Plattformen sowie (intelligenten) Maschinen und Robotern festgestellt werden. Diese werden in der aktuellen Diskussion im Kontext von I4.0 zu-

²⁹¹ Vgl. Kagermann et al. (2013), S. 18

²⁹² Vgl. Spath (2013), S. 22

²⁹³ Vgl. Bauer et al. (2014), S. 18

²⁹⁴ Vgl. Schlick et al. (2014), S. 59

nehmend in den Mittelpunkt gerückt. Die Auseinandersetzung mit logistischen Objekten findet weniger statt.

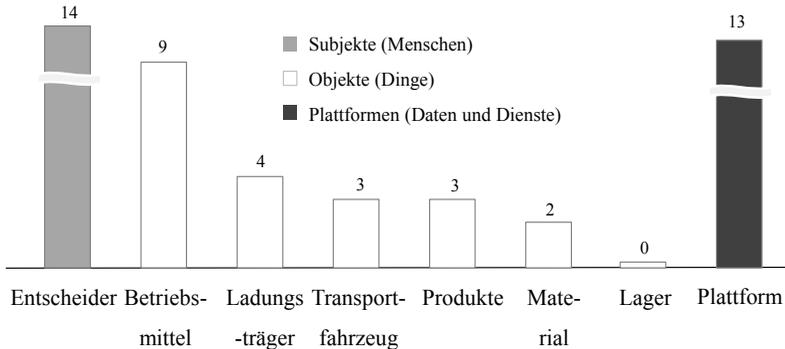


Abbildung 21: Ergebnis systematische Literaturanalyse: Industrie 4.0-Techniken²⁹⁵

Die identifizierten I4.0-Techniken wurden in Anlehnung an das übergeordnete Konzept des IoE in die drei Kategorien Menschen, Dinge sowie Daten & Dienste differenziert.

3.3.1 Menschen: Assistierte Entscheider

Die Relevanz des Menschen im (logistischen) Netzwerk konnte durch die Literaturanalyse bestätigt werden. Autoren im Umfeld von I4.0 sehen dessen Rolle als „*kreativen Problemlöser*“²⁹⁶, „*informierten Entscheider*“²⁹⁷, „*strategischen Entscheider*“, „*flexiblen Problemlöser*“²⁹⁸, „*augmented operator*“²⁹⁹ oder als „*assistierten Bediener*“³⁰⁰ als unverzichtbar für I4.0. Die Betonung des Menschen im Zentrum der I4.0 liegt z. T. in der Erfahrung des CIM-Konzeptes und der „*menschenleeren Fabrik*“ begründet. In dieser Arbeit wird der Begriff „*assistierter Entscheider*“ verwendet.

An den Mitarbeiter in I4.0 werden neue Anforderungen gestellt. Kreativität, kognitive und problemlösende Fähigkeiten sowie die Zunahme an Technologien konfrontieren das Personal mit neuen Anwendungsmöglichkeiten. Logistikplaner werden in der Rolle des Systemgestalters und -optimierers als zentrale Entscheidungsinstanz zunehmend gefordert werden, um in übergreifenden, komplexen Prozessen und Systemen interdisziplinär abstrahieren zu können. Operatives Logistikpersonal wird intensiver in kooperativen und koordinierenden Austausch mit Objekten für sich ändernde, kurzfristige und unvorhersehbare Ereignisse treten und hier steuernd eingreifen, während Objekte Routinetä-

²⁹⁵ Eigene Darstellung. Die vollständige Liste der Autoren befindet sich im Anhang.

²⁹⁶ Gorecky et al. (2014), S. 525 f.

²⁹⁷ Schlick et al. (2014), S. 78 f.

²⁹⁸ Gorecky et al. (2014), S. 541

²⁹⁹ Bauernhansl (2014), S. 21 f.

³⁰⁰ Schlick et al. (2014), S. 62

tigkeiten übernehmen.³⁰¹ Mensch-Maschine-Schnittstellen wurden im Rahmen von Hard- und Software-Komponenten der CPS bereits diskutiert und sind für den assistierten Entscheider von Relevanz. Insbesondere mobile Anwendungen werden durch die „iPhonisierung“³⁰² zur mobilen Datenerfassung sowie zur Mitarbeiterintegration nachhaltig beeinflusst und besitzen Potenzial für den Einsatz im betrieblichen Umfeld. Die Berührungspunkte mit mobilen Geräten aus dem privaten Umfeld kann die Akzeptanz des Personals positiv beeinflussen. Diese mobilen Geräte und Anwendungen können durch ihre Unterstützung in der Mensch-Maschine-Kooperation als Assistenzsysteme beschrieben werden. In Form der Assistenzsysteme sollen sie den assistierten Entscheider bei Störungen mit geringer Frequenz oder bei unbekanntenen Situationen unterstützen. Abhängig vom Kontext sollen sie Informationen bereitstellen und sich an die menschlichen Bewegungen und Aktionen dynamisch anpassen. Die Unterstützung kann direkt am Arbeitsplatz z.B. mittels Objekt-, Gesten- oder Spracherkennung, die bspw. in den CPS integriert sind, erfolgen.³⁰³ Beispiele von Assistenzsystemen für den assistierten Entscheider liefert Tabelle 6.

Menschen: Assistierte Entscheider

Augmented Reality

- Computerunterstützte Erweiterung der wahrgenommenen Realität mit Verknüpfung realer und virtueller Objekte und/oder Informationen
- Benutzung von Handykamera oder Datenbrillen

Virtual Reality

- Nachbildung und gleichzeitige Wahrnehmung der Realität mit Hilfe einer computer-generierten 3D-Welt in Echtzeit
- 3D-Abbildung von Anlagen und Verknüpfung mit realen Steuerungssystemen. Anzeige von Auswirkungen der Steuerungsbefehle im 3D-Modell für Produktentwicklung/Qualifizierung

Gamification and Avatare

- Übertragung spielerischer Erfahrungen auf das Arbeitsumfeld
- Mitarbeiter lernen z.B. Selbststeuerung und Entscheidungsautonomie
- Virtuelles Abbild, z.B. des Kommissioniers, mit Ausprägungen, wie Kraft, Genauigkeit und Geschwindigkeit. Spielfortschritt als Punktesystem für Gut-/Schlechtleistung hat direkten Einfluss auf die tatsächlich ausgeführte Arbeit

Mobile Computing

- Portable Rechner (Smart Phone, Tablet, etc.)
 - Oft in Verbindung mit Smart Devices (aktiver Gegenstand, vernetzt sowie für Benutzer konfigurierbar und in Teilen autonom)
 - Über individualisierte Zugänge können via Apps einzelne Aufgaben mit den jeweiligen Zugangsrechten ausgeführt werden
-

³⁰¹ Vgl. Günthner et al. (2014), S. 309 f.

³⁰² Bienzeisler et al. (2014), S. 12 ff.; Gorecky et al. (2014), S. 530 f.

³⁰³ Vgl. Gorecky et al. (2014), S. 535 f.

Sprach- und Gestenerkennung

- Automatisierte Umwandlung in Text und umgekehrt mittels Orientierung an der natürlichen, zwischenmenschlichen Kommunikation
 - Bedienkomfort und Vereinfachung des Informationsaustausches
 - Erkennung mit Übersetzung ermöglicht Echtzeitinteraktion in unterschiedlicher Sprache
-

Objekt- und Mustererkennung

- Kamerabasierte Verfahren für Objekterkennung und Bildverarbeitung
 - Objekt- und Mustererkennung häufig in Zusammenhang mit Augmented/Virtual Reality
 - Im Qualitätsmanagement zur Fehleranalyse von Oberflächen eingesetzt
-

Tabelle 6: Industrie 4.0-Technik: Assistierte Entscheider (Assistenzsysteme)³⁰⁴

Anforderungen der Assistenzsysteme werden u. a. sein, die individuellen Fähigkeiten des Personals oder des Kunden durch die Konzeption cyber-physischer Logistiksysteme und gezielter Qualifizierungsmaßnahmen soweit zu unterstützen, dass weder eine Über- noch Unterforderung durch die erhöhte Prozess- und Informationskomplexität eintritt.³⁰⁵ Unterstützt wird dies z. B. durch mehr Transparenz, indem mobile Geräte so viele Informationen wie nötig zur Entscheidungsunterstützung für den Bediener zur Verfügung stellen. Neben der Entscheidungsunterstützung erwartet das BMBF die Abmilderung der Auswirkungen des demografischen Faktors durch die unterstützende Arbeit von Robotern mit älteren Mitarbeitern.³⁰⁶ In welcher Form die Rolle des Menschen im Kontext von I4.0 ausgefüllt wird, ist noch nicht abschließend geklärt. Eindeutig erscheint die Zunahme der Mitarbeiterintegration durch Subjekt-Objekt-Interaktionen, sei es durch die Nutzung von Tablets oder Smart Phones oder durch die direkte Zusammenarbeit mit intelligenten Objekten. Der assistierte Entscheider folgt somit der Logik der Kybernetik, in der der Beobachter Teil des zu betrachtenden Systems wird und auf dieses einwirkt.

Intelligente Objekte werden durch die Entwicklungen der I4.0-Technologien sukzessive „menschlicher“ und dringen in Einflussbereiche von operativem und strategischem Personal ein. Selbstständige Entscheidungen für Routinetätigkeiten wie z. B. die Nachbestellung von Materialien werden die Disposition in Techniksysteme verlagern. Die Zunahme von künstlicher Intelligenz wird weitere Ziele und Aufgaben in diese Systeme verlagern und die „Menschwerdung“ von Objekten beschleunigen.

3.3.2 Dinge: Intelligente Objekte und Produkte

Ein „Objekt“ definiert sich nach dem Duden als „[...] Erscheinung der materiellen Welt, auf die sich das Erkennen, die Wahrnehmung richtet“. Im Informatikkontext kann es „[...] Daten enthalten und verarbeiten sowie Nachrichten mit anderen Objekten aus-

³⁰⁴ In Anlehnung an Bienzeisler et al. (2014), S. 12 ff.; Gorecky et al. (2014), S. 530 f.; Günthner et al. (2014), S. 319 f.

³⁰⁵ Vgl. Günthner et al. (2014), S. 309 f.

³⁰⁶ Vgl. BMBF (2013), S. 28

tauschen“.³⁰⁷ Aktuell werden in Wissenschaft und Praxis Objekte im digitalen Kontext als selbststeuernde oder intelligente Objekte thematisiert. Ein selbststeuerndes Objekt zeichnet sich nach WINDT durch die Fähigkeit aus, in nicht-deterministischen Systemen mit heterarchischen Strukturen autonom Entscheidungen treffen zu können, um Anforderungen an die Logistik durch eine höhere Leistungsfähigkeit begegnen zu können.³⁰⁸ Ein intelligentes Objekt geht über ein selbststeuerndes hinaus. Wie in Abschnitt 3.2.1 thematisiert, definiert sich nach DEINDL die Intelligenz eines Objektes nach dem Ort der Informationsverarbeitung.³⁰⁹ Für einen Praxispartner definiert sich die Intelligenz nach der Anzahl der Sensoren und Aktoren, also der Interaktionsfähigkeit des Objektes.³¹⁰ In dieser Arbeit wird der Interpretation von DEINDL gefolgt, ergänzt um Funktionen und Eigenschaften, die durch I4.0 zur Verfügung stehen. Im logistischen Kontext der Arbeit können intelligente Objekte Betriebsmittel, Ladungsträger, Transportfahrzeuge und Produkte sein. Ergänzt werden sie durch Lager, da diese für Praxispartner von Relevanz sind. Tabelle 7 gibt eine Übersicht der I4.0-Techniken auf der Ebene des Internets der Dinge.

Dinge: Intelligente Objekte

(Intelligente) Betriebsmittel

- Unter „*intelligenten Betriebsmitteln*“ werden Maschinen und Anlagen wie Werkzeugmaschinen oder Förderanlagen verstanden. Zusätzlich halb- oder vollautomatische Roboter, die isoliert oder mit dem Menschen interagieren
- Im innerbetrieblichen logistischen Netzwerk stellen sie Knoten und/oder Kanten mit den Aufgaben Bearbeiten, Fördern, Puffern, Sammeln und Verteilen dar

(Intelligente) Ladungsträger

- Unter „*intelligenten Ladungsträgern*“ werden Behälter, Paletten etc. subsumiert
- Stellen vordergründig Knoten innerhalb eines innerbetrieblichen logistischen Netzwerkes mit den Aufgaben Lagern, Puffern und Sammeln dar

(Intelligente) Transportfahrzeuge

- Unter „*intelligenten Transportfahrzeugen*“ werden fahrerlose Stapler etc. subsumiert
- Stellen vordergründig Kanten innerhalb eines innerbetrieblichen logistischen Netzwerkes mit den Aufgaben Fördern und Verteilen dar

(Intelligente) Lager

- Unter „*intelligenten Lagern*“ werden Hochregallager, Kleinteilelager, etc. subsumiert
 - Stellen vordergründig Knoten innerhalb eines innerbetrieblichen logistischen Netzwerkes mit den Aufgaben Lagern, Puffern, Sammeln und Verteilen dar
-

³⁰⁷ Vgl. Duden (2015), Zugriff 10.12.2015

³⁰⁸ Vgl. Windt (2006), S. 283 f.

³⁰⁹ Vgl. Deindl (2013), S. 105 f.

³¹⁰ Interviewpartner im Rahmen der Fallstudie B

(Intelligente) Produkte und Materialien

- Unter „*intelligenten Produkten*“ werden Halbfertig- und Fertigerzeugnisse verstanden
 - Unter „*intelligenten Materialien*“ werden Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe verstanden
-

Tabelle 7: Industrie 4.0-Technik: Intelligente Objekte³¹¹

Bereits heute sind intelligente Betriebsmittel in Geschäfts- und Produktionsprozesse über Aufträge aus dem MES eingebunden. In I4.0 sollen sie in die Lage versetzt werden, mit anderen intelligenten Objekten und unter sich autonom zu kommunizieren und die zuvor fixen Produktions- und Logistikpläne an kundenindividuelle Produktveränderungen kontinuierlich anzupassen. Die Eigenschaften der I4.0 Techniken werden Intelligenz und Kommunikationsfähigkeit der Objekte erhöhen. Die damit verbundenen Kommunikations- und Koordinationsprozesse resultieren in einem vermehrten Datenvolumen, wenn um die 100 Sensoren pro Objekt bei einer Vielzahl von Prozessschritten Daten erfassen, speichern und verarbeiten. Das Datenaufkommen wird mit Anwendungspotenzialen der Prozessoptimierung einhergehen, in dem z. B. Störungen früher erkannt werden.³¹² Von der Datenanalyse bzw. der Ableitung von Maßnahmen sollen zusätzlich andere I4.0-Techniken wie intelligente Ladungsträger und Transportfahrzeuge profitieren. *BAUERNHANSL* stellt diese Techniken mit den CPS gleich, die über die Cloud verbunden sind.³¹³ Intelligente Lager wurden in der zugrunde liegenden Literatur nicht thematisiert. In ihrer Funktion als Lager-, Puffer-, Sammel- und Verteilplatz in Hochregal- oder Kleinteilelagern haben sie das Potenzial, Suchzeiten, Flächenverbrauch sowie Bestände zu reduzieren.

Im Rahmen dieser Arbeit werden logistische Objekte betrachtet, daher nehmen intelligente Produkte und Materialien in innerbetrieblichen logistischen Netzwerken der I4.0 als direkte Verbindung zum Kunden eine Sonderrolle ein. Diese Rolle beschreiben *PORTER und HEPPELMANN*, die eine Veränderung des Wettbewerbs durch intelligente Produkte erwarten. Diese Veränderung wird durch eine Evolution des Produktes zu einem intelligenten Produkt (mit den inhärenten Funktionen Überwachen, Steuern, Optimieren und Automatisieren), zu einem intelligenten, vernetzten Produkt (mit z. B. Smart Phones), zu einem Produktsystem (weitere Produkte) und zu einem System von Systemen (andere Branchen Anwendungen) erfolgen.³¹⁴ In der Smart Factory sollen intelligente Produkte befähigt werden, sich selbst ubiquitär zu identifizieren, zu lokalisieren, aktuelle und historische Zustände zu erkennen und den angestrebten Zielzustand in Echtzeit selbst zu bewerten. Die horizontale und vertikale digitale Durchgängigkeit schafft die Vernetzung des intelligenten Produktes mit dem gesamten Wertschöpfungs-system als virtuelle Abbildung des Endkunden. Das Wissen über den eigenen Herstellungsprozess unterstützt die selbststeuernde Bestimmung einzelner Arbeitsstationen

³¹¹ In Anlehnung an Arnold et al. (2008), S. 19

³¹² Vgl. Kleinemeier (2014), S. 575 f.

³¹³ Vgl. Bauernhansl (2014), S. 21 f.

³¹⁴ Vgl. Porter und Heppelmann (2014), S. 8 ff.

(intern und extern) sowie den optimalen Ressourceneinsatz für den Leistungserstellungsprozess über den gesamten Lebenszyklus.³¹⁵ Für *VOGEL-HEUSER* sind „intelligente“ Produkte diejenigen, die „*alle ihre Eigenschaften kennen und beispielsweise wissen, wie sie gefertigt werden wollen oder mit welchen anderen Produkten (Teilen einer Maschine, Anlage) sie wie verbunden werden können.*“³¹⁶ Die inhärenten Kundendaten in intelligenten Produkten können als Abbild der Kundenanforderungen im Herstellungsprozess dienen, das die Kundenintegration unterstützt.

Nach *HOFMANN* nimmt die Komplexität der Interaktionen zwischen Objekten und Subjekten mit der Anzahl der Akteure zu. Die Komplexität resultiert u. a. aus der Zunahme der Schnittstellen und der damit nötigen standardisierten Interoperabilität sowie dem Datenaustausch der diversen Softwaresysteme.³¹⁷ *BAUER et al.* thematisieren die Entwicklung hin zu sozialen Netzwerken, die aus Objekten bestehen,³¹⁸ die mit Menschen vernetzt werden können. Abhängig vom Dezentralisierungsgrad wird die Vernetzung direkt zwischen den Akteuren oder mittels Plattform realisiert werden.

3.3.3 Daten und Dienste: Integrationsplattformen

Eine direkte Vernetzung von sechs intelligenten Objekten oder Subjekten in einem Netzwerk resultiert in 30 Verbindungen (fünf Verbindungen je Teilnehmer). Die Nutzung einer (Integrations-) Plattform resultiert in nur einer Verbindung je Teilnehmer. Durch diese Lösung wird die Komplexität in Austausch und Nutzung von Daten und Diensten reduziert.³¹⁹ Das Ergebnis der Literaturanalyse betont die Relevanz von Plattformen als präferierte Lösung zur Vernetzung von Objekten und Subjekten. Dieser Umstand steht allerdings der Forderung von 100%iger Dezentralität in I4.0 entgegen.

Integrationsplattformen³²⁰ werden für die Realisierung der digitalen Durchgängigkeit und den Austausch von Daten und Diensten innerhalb der Smart Factory als wichtiger Bestandteil erachtet. Im industriellen Umfeld ist es das Ziel, neben der allgemeinen Prozesskomplexität einzelne Prozesse, Objekte und Subjekte zu Systemen zu vernetzen sowie Leistungsverluste von Insellösungen durch einen Systemansatz zu reduzieren. Diese Entwicklung hin zu Integrationsplattformen schließt mehrere Systemfamilien ein und erweitert die Funktionen um (de-)zentrale Dienste, die von dezentral vernetzten Objekten für übergreifende Lösungen in der Fabrik abgerufen werden können.³²¹ Plattformen des Internets der Dienste und Daten verknüpfen Dienstleistungen für intelligente Objekte in bedarfsgerechten Lösungen für kooperative Aktivitäten der Akteure. Über das Internet bereitgestellte IKT-Anwendungen, Infrastrukturen und Dienste werden

³¹⁵ Vgl. Kagermann et al. (2013), S. 5 ff.

³¹⁶ Vogel-Heuser (2014), S. 42 f.

³¹⁷ Preisträger des Industrie 4.0-Awards 2013 mit der Maschinenfabrik Reinhausen.

³¹⁸ Vgl. Bauer et al. (2014), S. 20

³¹⁹ Vgl. Hofmann (2015), S. 9 ff.

³²⁰ Synonym zu CPS-, Digital Enterprise- oder Cloud-Plattformen.

³²¹ Vgl. Westkämper (2013), S. 137 ff.

dadurch integraler Bestandteil modularer Angebote in der Smart Factory.³²² Die Integration soll für I4.0 über den gesamten Produktionslebenszyklus erfolgen. *WESTKÄMPER* empfiehlt einerseits Plattformen, die sich auf den gesamten Lebenszyklus beziehen und andererseits solche, die explizit in einer Smart Factory zum Einsatz kommen. Für die Realisierung werden Anforderungen an Plattformen gestellt. Zusammengefasst sind das u. a. eine offene, flexibel konfigurierte Systemarchitektur mit standardisierten Schnittstellen und eine sichere, zuverlässige IKT, um unterschiedliche Produktlebensdauern, Prozesse sowie Logistik- und Produktionssysteme wirtschaftlich zu gestalten.³²³ Herausforderungen in diesem Kontext sind insbesondere die Gewährleistung von Datenschutz, -sicherheit und -qualität als kritische Infrastruktur in I4.0.³²⁴ Die Vernetzungsaufgabe sowie der Austausch von Daten und Diensten erfordert Anwendungen wie die *Big & Smart Data*, *Cloud Computing*, *Marktplätze* und *Agentensysteme* (Tabelle 8).

Daten und Dienste: Integrationsplattformen

Big und Smart Data (Advanced Data Analytics)³²⁵

- Big Data beschreibt die Zusammenführung und effiziente Analyse von Daten zur Optimierung von Ressourceneinsatz und Geschäftsprozessen
- Durch Korrelations-, Prognose- und Wahrscheinlichkeitsanalysen (Predictive Computing) sowie der Auswertung von un-/strukturierten Daten (Bilder, Dokumente, Blogs,...) werden aus Big Data (Daten) Smart Data (Informationen)
- Operative Daten werden zur Steuerung und Überwachung von z. B. Produktionsabläufen eingesetzt. Die Verknüpfung von Qualitäts- mit Auslastungsdaten einzelner Objekte (Condition Monitoring) mit der Auftragslage generiert Entscheidungsgrundlagen

Cloud Computing³²⁶

- IT-Infrastruktur zur globalen, zentralen Sammlung, Speicherung, dezentralen, lokalen Verarbeitung und Bereitstellung von Daten, Programmen und Diensten
- Gilt mit Skalierbarkeit, Verfügbarkeit, Echtzeit-, Netzwerk- und Vernetzungsfähigkeit als Basis für I4.0. Unterstützt dadurch neue Dienstleistungen (Smart Services) und die automatisierte Orchestrierung intelligenter Objekte und Subjekte
- Nutzung von Daten und Informationen von unterschiedlichen Ebenen der Automatisierungspyramide über eine einheitliche Software-Plattform
- Zusammenführung von Objektdaten in der „Cloud“ zur Bereitstellung von z. B. Überwachungsfunktionen für die Echtzeitüberwachung, Fehlersuche und Simulation

³²² Vgl. Kagermann et al. (2013), S. 85

³²³ Vgl. Westkämper (2013), S. 139 f.

³²⁴ Vgl. Fallenbeck und Eckert (2014), S. 401 ff.; Kagermann (2014), S. 605 f.

³²⁵ Vgl. Kaufmann (2014), S. 364 ff.; Kagermann (2014), S. 605 f.

³²⁶ Vgl. Fallenbeck und Eckert (2014), S. 401 ff.; Kagermann (2014), S. 605 f.

(Online-) Marktplatz³²⁷

- Verfügbarkeit von Daten, Diensten und Anwendungen über offene Plattform via Cloud
- Über die Sammlung von Daten über Sensoren und der Reaktion auf die Umwelt über Aktoren können netzbasierte Dienstleistungen angeboten werden
- Die kollaborative und serviceorientierte Struktur von Marktplätzen ermöglicht intelligenten Objekten bzw. CPS über die gesamte Wertschöpfungskette z. B. als Anbieter und Kunden von Kapazitätsbedarfen virtuell in Austausch zu treten

(Multi-) Agentensysteme³²⁸

- Für den Austausch von Systemen, wie auf einem Marktplatz, kommen Agenten zum Einsatz
 - Hard- oder Software-Agenten gehören zu den problemlösenden AS, besitzen definierte Ziele, können autonom handeln und selbstständig auf äußere Ereignisse reagieren
 - Agentensysteme können aus einer Vielzahl von Agenten bestehen, die in Austausch bzw. in „Verhandlungen“ mit anderen Agenten und Systemen treten können
 - Software-Agenten verwalten auftragspezifische Informationen direkt auf dem intelligenten Objekt, um Abläufe dezentral zu steuern und zu überwachen
-

Tabelle 8: Industrie 4.0-Technik: Integrationsplattformen (Anwendungen)

In der Smart Factory kann die Steuerung und Überwachung des Materialflusses in Echtzeit durch Sensoren und Aktoren realisiert werden, während Agenten die Kommunikation und Interaktion mit weiteren Entitäten³²⁹ realisieren. Der dezentrale hierarchielose Einsatz von Agenten, Marktplätzen oder der Cloud für ein verteiltes Netzwerk zur Nutzung von Daten und Diensten für einen breiten Teilnehmerkreis basiert auf dem Ansatz eines übergeordneten Problemlösungsprozesses. Dieser besteht nach *ROIDL* aus den drei Phasen: Zerlegung des Problems in Teilprobleme, Lösung dieser Teilprobleme sowie die anschließende Zusammenführung der Teilprobleme zur Lösung des Gesamtproblems. Die Steuerung von Materialflusssystemen besitzt die analoge Charakteristik für die Zerlegung in Teilprobleme.³³⁰ Dafür ist eine gemeinsame Plattform nötig, die dem Prinzip der funktionsorientierten Modularisierung nach dem Baukastenprinzip folgt.³³¹ D.h. Teilprobleme können als einzelne Dienste interpretiert werden, die die Reduzierung bzw. Auflösung der Steuerungshierarchien zur Folge haben können.³³² Dieser modulare Baukasten erweitert die Wechselwirkung von auf der Plattform angebotenen Daten und Diensten mit intelligenten Objekten des IdD. Für die Smart Factory können die modularisierten Anwendungen eines ERP, wie z. B. die Termin- oder Mengenplanung, einzeln bei Bedarf von dem jeweiligen Objekt nachgefragt werden, ohne Lizenzen für alle Objekte oder Subjekte zu benötigen. Dadurch wird der Datenaus-

³²⁷ Vgl. Geisberger und Broy (2012), S. 183; Kagermann (2014), S. 609 f.

³²⁸ Vgl. Günthner et al. (2014), S. 302 f.; Roidl (2010), S. 65 f.; Spath (2013), S. 98; VDI/VDE 2653 (2010), S. 3; Weller (2008), S. 153 und 165 f.

³²⁹ Nach VDI und VDE (2014), S. 4 sind Entitäten „Gegenstände, die in der Informationswelt eigene Objekte zu ihrer Verwaltung und Nutzung besitzen“.

³³⁰ Vgl. Roidl (2010), S. 65 f.

³³¹ Vgl. Günthner et al. (2014), S. 302 f.

³³² Vgl. Kuzmany et al. (2010), S. 53 f.

tausch z. B. mittels Smart Phones und Tablets über die IT- und Unternehmensgrenzen hinweg möglich. „In Verbindung mit den Daten aus Sensoren von cyber-physischen Systemen in Produktion und Logistik können so alle Beteiligten auf die für sie relevanten Daten entlang des Produktlebenszyklus jederzeit von überall in nahezu Echtzeit zugreifen.“³³³

14.0 soll mit den vorhandenen Technologien und Techniken im industriellen Umfeld die zukünftigen Trends aufnehmen, Herausforderungen mildern und die Potenziale generieren. Dazu werden im industriellen Umfeld Eigenschaften zur Verfügung gestellt, um die Produktion und Logistik zu unterstützen. Dies geht einher mit Anforderungen, die an die neuen Möglichkeiten der Konzepte gestellt werden.

3.4 Eigenschaften und Anforderungen der Industrie 4.0

Wie in Abschnitt 3.1 bereits thematisiert, werden in diesem Kapitel mittels qualitativer Inhaltsanalyse der 49 identifizierten Beiträge Eigenschaften und Anforderungen auf Basis des konzeptionellen Bezugssystems erfasst, dem jeweiligen Konzept zugeordnet und im Kontext von Logistik (und Produktion) ausgearbeitet.

3.4.1 Eigenschaften

In Summe liefert die Literaturanalyse 52 Eigenschaften, von denen 50 dem konzeptionellen Bezugssystem zugeordnet werden konnten. Das Konzept der CPS liefert mit 23 die meisten Eigenschaften, gefolgt von 14.0 mit 11 und dem IoE mit 9. Für die Smart Factory konnten 7 Eigenschaften ermittelt werden. Tabelle 9 liefert einen Überblick.

Eigenschaften nach Konzepten	
Cyber-physische Systeme nach Broy (2010); Geisberger und Broy (2012); Hoppe (2014a); VDI und VDE (2013); Vogel-Heuser et al. (2013); Vogel-Heuser (2014)	
▪ Adaptivität	▪ Kontexterfassung und -verarbeitung
▪ (Technische) Integration	▪ Konflikterkennung und -auflösung
▪ Entscheidungsfähigkeit	▪ Selbstanalyse, -diagnose, -reflexion,
▪ Autonomie (Verhandeln, Handeln, Steuern)	-dokumentation und -heilung
	▪ Kognitive Fähigkeiten und Lernfähigkeit
Internet of Everything nach Günthner (2010); Nettsträter und Kuzmany (2010)	
▪ Dezentrale Eigenschaften	▪ Spontane Vernetzungsfähigkeit
▪ Selbstkoordination	▪ Reaktionsfähigkeit
Industrie 4.0 nach Bürger und Tragl (2014); Hoppe (2014a); Schlick et al. (2014); Spath (2013); ten Hompel und Henke (2014); VDE und DIN (2013); Wegener (2014)	
▪ Vollständige Autonomie	▪ Integration technische und Mgt.-prozesse
▪ Selbstoptimierung und -organisation	▪ Künstliche Intelligenz

³³³ Vgl. Bildstein und Seidelmann (2014), S. 586 f.

- Verhandlungsfähigkeit in Echtzeit
 - Reaktion bei geänderten Kundenwünschen
-

Tabelle 9: Ergebnis literaturbasierte Eigenschaftsanalyse

Auf Grundlage des konzeptionellen Bezugssystems baut I4.0 und die Smart Factory auf den anderen beiden Konzepten auf, d.h. Eigenschaften von **CPS** und **IoE** können Eigenschaften der Smart Factory und I4.0 sein, wodurch die dargestellte Anzahl in der Tabelle reduziert wurde. **Konzeptübergreifend** wurden Adaptivität, die technische Integration, Entscheidungsfähigkeit, Autonomie, Kognition sowie Formen der Selbststeuerung oder -organisation identifiziert. „*Dezentral*“ wird in der Literatur häufig nicht separat, sondern in Kombination mit Funktionen und Eigenschaften wie Steuerung oder Autonomie benutzt. **I4.0** erweitert die Autonomie zu einer vollständigen Autonomie und mit ihr die Selbstoptimierung und -organisation.³³⁴ Zusätzlich zur technischen Integration der CPS werden in I4.0 die Geschäftsprozesse integriert.³³⁵ Zudem wird die künstliche Intelligenz für intelligente Maschinen in der Produktion erwartet.³³⁶ Logistikspezifische Eigenschaften in I4.0 konnten nicht identifiziert werden, Existieren im IoE hingegen als spontane Vernetzung.³³⁷ Die **Smart Factory** erweitert die Eigenschaften um die echtzeitfähige Verhandlungsfähigkeit sowie die kundenzentrierte Reaktion bei Änderungen in den Kundenwünschen.³³⁸

Die Diskussion in Wissenschaft und Praxis zeigt ein breites fragmentiertes Bild über Eigenschaften innerhalb der Konzepte und kaum Auseinandersetzung mit der Logistik. Die empirische Analyse wird in Kapitel 4 diese Lücke schließen.

3.4.2 Anforderungen

An die Konzepte werden in der Wissenschaft Anforderungen gestellt. Das Ergebnis der Literaturanalyse liefert ein ähnlich fragmentiertes Bild wie bei den Eigenschaften. Die Anforderungen werden im Rahmen der empirischen Analyse um die konkrete Perspektive des Logistikmanagements erweitert werden. In Summe liefert die Literaturanalyse 133 Anforderungen, von denen 108 dem konzeptionellen Bezugssystem zugeordnet werden konnten. Das Konzept der CPS liefert mit 49 identifizierten die meisten Anforderungen, gefolgt von der Smart Factory (22) und dem IoE (20). Für I4.0 liegen mit 17 am wenigsten Anforderungen vor. Tabelle 10 liefert einen Überblick.

³³⁴ Vgl. Bürger und Tragl (2014), S. 561; Hoppe (2014a), S. 251

³³⁵ Vgl. VDE und DIN (2013), S. 7

³³⁶ Vgl. Schlick et al. (2014), S. 61

³³⁷ Vgl. Günthner (2010), S. 349f.

³³⁸ Vgl. Pantförder et al. (2014), S. 147ff.

Anforderungen nach Konzepten

Cyber-*physische Systeme* nach Broy (2010); Geisberger und Broy (2012); Hoppe (2014a); VDI und VDE (2013); Schuh et al. (2014); Vogel-Heuser et al. (2013); Vogel-Heuser (2014)

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Flexibilität und Wandlungsfähigkeit ▪ Echtzeitfähigkeit ▪ Komm.- u. Interaktionsfähigkeit ▪ Vernetzungs- und Netzwerkfähigkeit ▪ Interaktionsfähigkeit ▪ Datendurchgängigkeit, Standards | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verarbeitungs- und Kommunikationsgeschwindigkeit ▪ Mensch-Maschine-Interaktion und -Kooperation ▪ Datenschutz und Zugriffssicherheit ▪ Zuverlässigkeit |
|---|---|
-

Internet of Everything nach Günthner (2010); Hahn-Woernle (2010); Nettsträter und Kuzmany (2010); Schuh et al. (2014)

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Datenverfügbarkeit | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Modularität |
|--|---|
-

Industrie 4.0 nach Fallenbeck und Eckert (2014); Hoppe (2014a); Spath (2013)

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Geräteunabhängigkeit ▪ Semantische Erweiterbarkeit ▪ Skalierbarkeit | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Robustheit gegenüber Schwankungen ▪ Transparenz in Echtzeit ▪ Ressourceneffizienz und Produktivität |
|---|---|
-

Smart Factory nach Westkämper (2013a); Westkämper (2013b); Kaufmann (2014)

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Eindeutige Identifikation und Lokalisation von Objekten jederzeit ▪ Stabilität | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Individualität von Prozessen, Produkten etc. ▪ Horizontale und vertikale Vernetzung ▪ Komplexitätsbeherrschung |
|---|--|
-

Tabelle 10: Ergebnis literaturbasierte Anforderungsanalyse

Technische Anforderungen überwiegen in der Analyse. Wie bei den Eigenschaften baut I4.0 und die Smart Factory auch hier auf den anderen beiden Konzepten auf, d. h. Anforderungen an **CPS** und **IoE** können indirekt Anforderungen an die Smart Factory und I4.0 sein, wodurch wiederum die dargestellte Anzahl in der Tabelle reduziert wurde. **Übergreifend** werden die Anforderungen Flexibilität & Wandlungsfähigkeit, Echtzeit-, Kommunikations-, Vernetzungs- und Netzwerkfähigkeit an die Konzepte gestellt. Hinzu kommen die Standardisierung, die Mensch-Maschine-Interaktion sowie Datenschutz und Zugriffssicherheit. Explizite Anforderungen an **I4.0** konnten auf der technischen Seite bei **HOPPE** identifiziert werden. Darunter befinden sich (Hersteller-) Unabhängigkeit, Compliance von Standards, Sicherheit der Datenübertragung, (Daten-) Transport über Standards, Modellierbarkeit von realen zu virtuellen Objekten, Discovery zur Beschreibung der Zugangsdaten und der angebotenen Funktion (Dienste), zudem semantische Erweiterbarkeit und Skalierbarkeit, die die horizontale und vertikale Kommunikation für alle Ebenen durch Hinzufügen bzw. Wegnahme von Hard- und Software-Komponenten gewährleisten soll.³³⁹ Anwenderseitig konnten Transparenz in Echtzeit³⁴⁰ sowie die klassischen Ziele von **Produktion und Logistik**, Ressourceneffizienz und Produktivität in Form von hoher Lieferfähigkeit mit kurzen Lieferzeiten bei

³³⁹ Vgl. Hoppe (2014b), S. 338 ff.

³⁴⁰ Vgl. Spath (2013), S. 113

geringen Beständen³⁴¹ identifiziert werden. Die gleichen Anforderungen in Ergänzung mit geringen Kosten nennt *SCHUH et al.* für die Logistik im Kontext von CPS.³⁴² Und *GÜNTNER* nennt im Kontext des IoE zusätzlich die Verfügbarkeit von Informationen und Gütern zur richtigen Zeit am richtigen Ort.³⁴³ Für die **Smart Factory** betont *WESTKÄMPER* den Aspekt der eindeutigen Identifikation und Lokalisation von Objekten, die Individualität von Objekten, Prozessen, Produkten und Systemen sowie die Anforderung, Komplexität beherrschbar zu machen.³⁴⁴

Literaturbasierte Anforderungen konnten in der Mehrheit für Ausrüster ermittelt werden. Im Kontext von Logistik stellen die klassischen Zielgrößen die Anforderungen dar. Die logistische Auseinandersetzung mit I4.0 ist unterrepräsentiert. Gemeinsam mit der empirischen Analyse werden Eigenschaften und Anforderungen an I4.0-Lösungen für das Logistikmanagement untersucht und beschrieben.

3.5 Abgrenzung und Zusammenfassung

Die **zweite sekundäre Forschungsfrage** adressiert die begriffliche Beschreibung und Abgrenzung von I4.0 und angrenzender Konzepte. Keines der Konzepte verfügt in Praxis und Wissenschaft über eine einheitliche Definition. Die Digitalisierung hat die domänenübergreifende Verschmelzung von realer und virtueller Welt durch Schließung von Medienbrüchen zum Ziel. Die technologische Basis besteht in **cyber-physischen Systemen**, die als dezentrale, autonom eingebettete Systeme, in physische Objekte integriert, die physische mit der virtuellen Realität vernetzen. CPS besitzen Funktionen, um Daten zu identifizieren, zu erfassen, zu speichern und zu analysieren sowie zu entscheiden, zu reagieren und diese darzustellen. Werden CPS via Internet miteinander vernetzt, können sie das Internet der Dinge, Daten, Dienste und Menschen durch kurz-, mittel- oder langfristige virtuelle oder physische Netzwerke formen. Diese vier Internets wurden in der vorliegenden Arbeit als **Internet of Everything** definiert, welches den Rahmen des konzeptionellen Bezugssystems dieser Arbeit darstellt. Somit gelten die Charakteristika des IoE ebenfalls für die Smart Ecosystems. Die **Smart Ecosystems** stellen industrielle Ökosysteme des IoE dar, deren Anwendungsdomänen symbiotisch oder kompetitiv interagieren. Die **Smart Factory** ist das industrielle Ökosystem für Produktion und Logistik, in dem via Inter- oder Intranet kurz-, mittel- oder langfristige unternehmensinterne oder -externe Netzwerke aus intelligenten Objekten und Subjekten cyber-physische Logistik- und Produktionssysteme formen. CPS befähigen Subjekte, Objekte und Systeme dezentral und autonom zu planen, zu steuern, zu kontrollieren, zu organisieren und zu lernen.

³⁴¹ Vgl. Spath (2013), S. 67

³⁴² Vgl. Schuh et al. (2014), S. 277

³⁴³ Vgl. Günthner (2010), S. 349f.

³⁴⁴ Westkämper (2013a), S. 137ff.; Westkämper (2013b), S. 309f.

Die Smart Factory oder ein Netzwerk aus diesen beschreibt **Industrie 4.0**. I4.0 besitzt weder eine einheitliche Definition noch eine klare Abgrenzung. Der Begriff der „Revolution“ ist irreführend, handelt es sich doch um die Weiterentwicklung und Kombination vorhandener Technologien. I4.0 ist die industrielle Anwendung des IoE mit dem Ziel, durch vertikal und horizontal integrierte Wertschöpfungssysteme eine digitale Durchgängigkeit zur Reduzierung von Medienbrüchen zu erreichen. In I4.0 werden Subjekte (assistierte Entscheider), intelligente Objekte (Betriebsmittel, Ladungsträger, ...) und Produkte (Kunden) auf Basis von CPS mit Funktionen und Eigenschaften ausgestattet, die sie befähigen, dezentral und autonom zu planen, zu steuern, zu kontrollieren, zu organisieren und zu lernen. Über Integrationsplattformen (Cloud Computing) werden sie via Inter- oder Intranet zu cyber-physischen Logistik- und Produktionssystemen vernetzt und in den gesamten Produktlebenszyklus integriert, so dass aus Daten (Big Data) Informationen (Smart Data) werden. Abbildung 22 stellt den Zusammenhang der Konzepte dar.

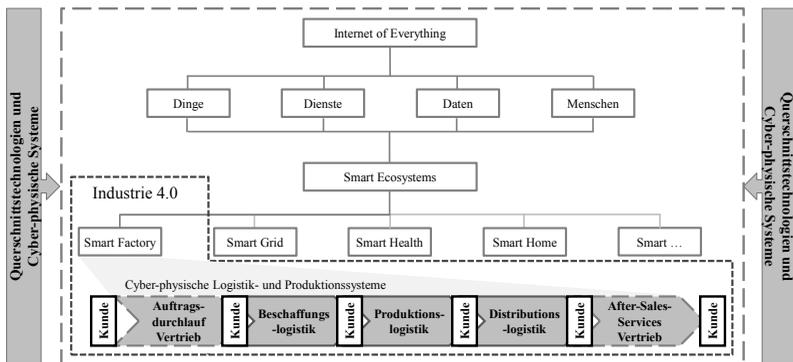


Abbildung 22: Abgrenzung von Konzepten im konzeptionellen Bezugssystem³⁴⁵

Die Arbeit fokussiert cyber-physische Logistiksysteme unternehmensinterner Netzwerke, die aus intelligenten Objekten, Produkten sowie Subjekten bestehen. Die innerbetriebliche Betrachtung bezieht sich vordergründig auf die Produktionslogistik, thematisiert zur Gewährleistung des ganzheitlichen Anspruchs der Logistik zusätzlich interne sowie externe Schnittstellen.

Die **dritte sekundäre Forschungsfrage** untersucht Technologien und Techniken. Im Rahmen der Arbeit wurden **Industrie 4.0-Techniken** als Materialisierung von **Industrie 4.0-Technologien** definiert, die als **Funktions-** und **Eigenschaftsträger** in der Smart Factory für Produktion und Logistik zum Einsatz kommen. I4.0-Techniken sind intelligente Objekte, Subjekte und Integrationsplattformen. **Intelligente Objekte** sind intelligente Ladungsträger, Betriebsmittel etc. sowie intelligente Produkte, welche in Zukunft den gesamten Produktionslebenszyklus abbilden sollen und die Integration des

³⁴⁵ Eigene Darstellung.

Kunden realisieren. Die Intelligenz determiniert sich durch Funktionen, Eigenschaften sowie den Ort der Informationsverarbeitung. Als Subjekt wird die Rolle des Menschen betont, der als **assistierter Entscheider** durch Assistenzsysteme in die Smart Factory integriert wird. Assistenzsysteme sind u. a. Augmented und Virtual Reality sowie das Mobile Computing. Die Vernetzung von Objekten und Subjekten leisten **Integrationsplattformen**, die in Form von Cloud Computing Diensten wie Smart Data-Anwendungen zur Verfügung stehen.

Aus der Literatur wurden 50 **Eigenschaften** ermittelt. Konzeptübergreifend wurden die Adaptivität, technische Integration, Entscheidungsfähigkeit, Autonomie, Kognition sowie unterschiedlichste Formen der Selbststeuerung oder -organisation als Merkmale identifiziert. I4.0 konnte u. a. die vollständige Autonomie, Selbstoptimierung und -organisation oder die künstliche Intelligenz zugeordnet werden. Logistikspezifische Eigenschaften wurden mit der spontanen Vernetzung benannt. Die Smart Factory erweitert die Eigenschaften um die echtzeitfähige Verhandlungsfähigkeit sowie die kundenzentrierte Reaktion bei veränderten Kundenwünschen. Die „Dezentralität“ kann sich auf alle Eigenschaften beziehen und wurde daher nicht spezifiziert. 108 überwiegend technologische **Anforderungen** wurden aus der Literatur ermittelt. Konzeptübergreifend konnten Flexibilität & Wandlungsfähigkeit, Echtzeit-, Kommunikations-, Vernetzungs- und Netzwerkfähigkeit identifiziert werden. Hinzu kommen die Standardisierung, Mensch-Maschine-Interaktion sowie Datenschutz und Zugriffssicherheit. Für Produktion und Logistik konnten Echtzeittransparenz sowie die klassischen Ziele Ressourceneffizienz und Produktivität in Form von hoher Lieferfähigkeit mit kurzen Lieferzeiten bei geringen Beständen identifiziert werden. Die gleichen Anforderungen in Ergänzung mit geringen Kosten und der Verfügbarkeit von Informationen und Gütern zur richtigen Zeit am richtigen Ort wurden für die Logistik in Bezug auf CPS und IoE festgestellt. Festzuhalten ist, dass in der Bestandsliteratur Eigenschaften sowie Anforderungen bisher kaum aus der Perspektive des Logistikmanagement erforscht wurden.

Die im zweiten Kapitel vorgenommene Ausarbeitung von Trends, Potenzialen und Herausforderungen sowie die Beschreibungen und Abgrenzungen von Konzepten, Technologien, Techniken, Eigenschaften und Anforderungen des dritten Kapitels dienen als Eingangsgrößen für die Empirie. In Anlehnung an den Forschungsprozess nach *UL-RICH* werden die bisherigen literaturbasierten Erkenntnisse im Rahmen der empirischen Analyse durch den Austausch mit der Praxis abgeglichen und erweitert.

4 EMPIRISCHE ANALYSE

Die literaturbasierte Analyse auf Basis der vorgestellten Konzepte konnte die fragmentiert vorliegenden Eigenschaften und Anforderungen systematisieren und die Ergebnisse für die Vorbereitung der empirischen Analyse aufbereiten. Die empirische Analyse erweitert die literaturbasierten Erkenntnisse um die Perspektive des Logistikmanagements. Im ersten Schritt – der Gruppenbefragung – wird in Abschnitt 4.1 aus Sicht von Logistik Anwendern die Aufnahme und Priorisierung von Anforderungen an I4.0-Lösungen durchgeführt. Anschließend erfolgt die Untersuchung des Anwendungspotenzials von Eigenschaften der I4.0-Techniken. Im zweiten Teil der empirischen Analyse – der Fallstudienforschung – wird in vier Maschinenbauunternehmen die Anwendung von I4.0-Lösungen aus der innerbetrieblichen Logistikperspektive untersucht (Abschnitt 4.2). Diese Sichtweise wird von Ausrüstern und Anwendern in einer Smart Factory eingenommen, um dem integrativen systemischen Charakter von Logistik und I4.0 Rechnung zu tragen. Die Erkenntnisse sollen der Erklärung und Analyse der Merkmalsunterschiede der empirischen Forschung dienen³⁴⁶ und dadurch zur Beantwortung der vierten sekundären Forschungsfrage beitragen:

F.4 Warum und wie wird Industrie 4.0 in der industriellen Logistik eingesetzt und welche Anforderungen und Eigenschaften präferiert das Logistikmanagement?

Das „Warum“ für I4.0-Aktivitäten wird anhand von Motivation, erwarteten Potenzialen und Herausforderungen in der industriellen Logistik betrachtet. Das „Wie“ erforscht logistische Aufgaben, Prozesse, eingesetzte Technologien und Techniken sowie die an diese gestellten Anforderungen und Eigenschaften. Die Zusammenführung der Ergebnisse der Eigenschafts- und Anforderungsanalyse aus Wissenschaft und Praxis wird in Abschnitt 4.3 dargestellt. Das 4. Kapitel schließt mit der Ableitung von Gestaltungsanforderungen an cyber-physische Logistiksysteme.

4.1 Gruppenbefragung

Ziel der Gruppenbefragung ist die Aufnahme und Priorisierung von Anforderungen sowie die Bewertung des Anwendungspotenzials von Eigenschaften in Bezug zu I4.0-Techniken aus der Perspektive des Logistikmanagements.

4.1.1 Design

Die Befragung wurde in einem eintägigen Arbeitskreis mit 24 Teilnehmern aus der industriellen Logistik durchgeführt. Die Teilnehmer sind mehrheitlich Führungskräfte aus unterschiedlichen Funktionen des KAP.

Die Erhebung wird dreistufig durchgeführt. Als erster Schritt erfolgt die **Erläuterung des Vorgehens** sowie der **verwendeten Begriffe**. Die Fragen werden abschließend ge-

³⁴⁶ Vgl. Bortz und Döring (2006), S. 2

klärt und zusätzlich Handzettel mit Begriffsdefinitionen an die Teilnehmer verteilt, um die Abgrenzung der Begrifflichkeiten konsequent gewährleisten zu können. Der erste empirische Teil dient der **Aufnahme und Priorisierung von Anforderungen** an I4.0-Lösungen im Logistikkontext. Die Anforderungen werden mittels der Kreativitätstechnik Brainstorming anonym auf Moderationskarten festgehalten. Neben der Anforderung wird auf den Karten die Priorisierung durch eine Likert-Skala festgehalten. Die Teilnehmer priorisieren die Anforderungen nach der „Höhe der Kundenzufriedenheit“ (1: völlig unzufrieden bis 5: sehr zufrieden) und nach dem „Grad der Industrie 4.0-Leistungserfüllung“ (A: gering bis E: hoch). Die Ergebnisse werden mit Hilfe des *KANO-Modells*³⁴⁷ visualisiert, vorgestellt und diskutiert. Der dritte und letzte empirische Part der Gruppenbefragung hat die **Bewertung des Anwendungspotenzials** von I4.0-Techniken und Eigenschaften zum Ziel. Aufgrund der heterogenen technischen Ausrichtung sowie der I4.0-Expertise werden Techniken und Eigenschaften literaturbasiert vorgegeben und zur Disposition gestellt. Die Untersuchung erfolgt im Rahmen von Diskussionen in sechs Kleingruppen³⁴⁸. Nach der Diskussion verteilt jeder Teilnehmer separat für seine Gruppe in einer anonymen Punktbewertung das Anwendungspotenzial (jeder Teilnehmer erhält acht Punkte) auf die Eigenschaften für die jeweilige I4.0-Technik.

4.1.2 Auswertung

Die literaturbasierten Anforderungen und Eigenschaften werden im empirischen Teil durch die Experten aus der Praxis angereichert, priorisiert und diskutiert.

4.1.2.1 Anforderungsanalyse

Das KANO-Modell kommt aus dem Qualitätsmanagement und wird zur Analyse und Bewertung von Kunden- bzw. Produktanforderungen benutzt. Die Ordinate stellt das Maß der Kundenzufriedenheit, die Abszisse den Grad der Leistungserfüllung dar. Die Kundenanforderungen³⁴⁹ sind dreistufig in Basis-, Leistungs- und Begeisterungsanforderung unterteilt.³⁵⁰ Abbildung 23 zeigt die aufgenommenen und priorisierten Anforderungen im Kontext von I4.0 für das Logistikmanagement.

³⁴⁷ In Anlehnung an Kano et al. (1984), S. 147 ff.

³⁴⁸ Jede Kleingruppe entspricht einer der identifizierten I4.0-Techniken: Betriebsmittel, Ladungsträger, Transportfahrzeuge, Lager, Produkt und Entscheider.

³⁴⁹ Nach DIN EN ISO 9000 (2014), S. 25 ist eine Kundenanforderung ein/e „*Erfordernis oder Erwartung, das oder die festgelegt, üblicherweise vorausgesetzt oder verpflichtend ist*“ und „*zum Erreichen hoher Kundenzufriedenheit [...] erforderlich sein*“.

³⁵⁰ Vgl. Benz (2008), S. 35 ff.; Kano et al. (1984), S. 147 ff.

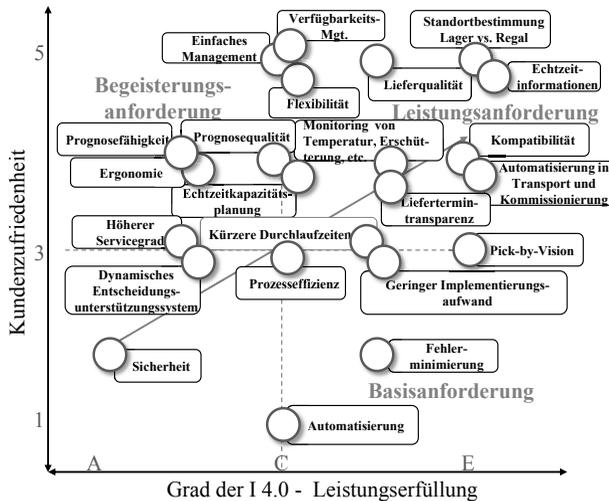


Abbildung 23: Auswertung Anforderungsanalyse³⁵¹

Die Mehrzahl der Anforderungen haben das Potenzial, die Kundenzufriedenheit zu erhöhen (≥ 3 Punkte). **Begeisterungsanforderungen**, die die Kundenzufriedenheit überdurchschnittlich erhöhen können, konnten zwei festgestellt werden: Die Ergonomie und die Prognosefähigkeit, wobei beide nicht zwangsläufig mit I4.0 in Verbindung gebracht wurden. Im Übergang zu **Leistungsanforderungen** sowie einem mittleren I4.0-Leistungserfüllungsgrad konnten Flexibilität, Vereinfachung der Managementaufgaben, Verfügbarkeitsmanagement und Echtzeitkapazitätsplanung identifiziert werden. Der Quadrant mit hoher Kundenzufriedenheit sowie hoher I4.0-Leistungserfüllung beinhaltet die Mehrzahl der Anforderungen. Zu diesen Anforderungen zählen Lokalisation, Echtzeitfähigkeit, Kompatibilität, die Automatisierung in Transport und Kommissionierung, die selbstständige Steuerung und Überwachung von Produktparametern beim Transport sowie die Liefertermintransparenz. **Basisanforderungen** (vierter Quadrant und somit ohne Potenzial) die Kundenzufriedenheit zu erhöhen, sind u. a. die Automatisierung sowie die Fehlerminimierung. Zielgrößen wie Servicegrad, Prozesseffizienz und Durchlaufzeiten sowie ein dynamisches Entscheidungsunterstützungssystem und die (Daten-) Sicherheit besitzen ein mittleres Potenzial für Kundenzufriedenheit, werden aber kaum mit I4.0 in Verbindung gebracht.

Die identifizierten Anforderungen liegen wie die Ergebnisse der systematischen Literaturanalyse fragmentiert vor. Im Rahmen dieser Arbeit stellen die Eigenschaften Begeisterungsanforderungen dar, da die technischen Möglichkeiten durch I4.0 dem Logistikmanagement kaum bekannt sind. Daher werden die Eigenschaften im zweiten Teil der Gruppenbefragung separiert im Detail untersucht.

³⁵¹ Eigene Darstellung.

4.1.2.2 Eigenschaftsanalyse

Für die Gruppenbefragung wird vor der Durchführung des Arbeitskreises eine Auswahl literaturbasierter Eigenschaften mit Begriffsbeschreibungen verteilt, diskutiert, angepasst und selektiert. Anschließend wird das Anwendungspotenzial in Kleingruppen auf I4.0-Techniken verteilt. Abbildung 24 zeigt zusammengefasst das Anwendungspotenzial einzelner Eigenschaften aus Systemsicht.

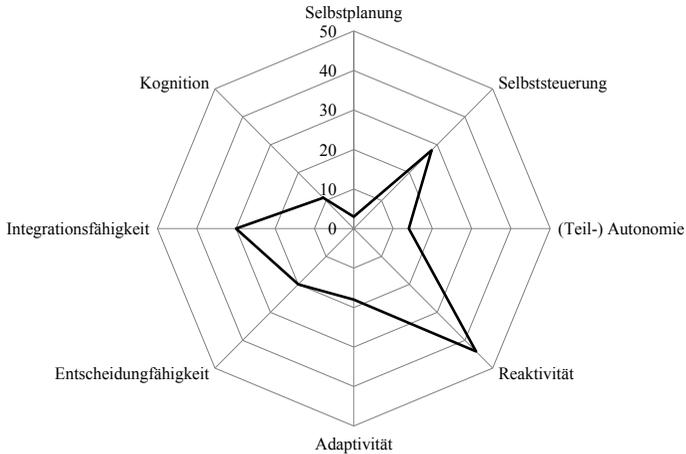


Abbildung 24: Anwendungspotenzial Eigenschaften³⁵²

Für I4.0-Techniken in Summe besitzt die Reaktivität das größte Anwendungspotenzial. Diese Eigenschaft wurde bei der Zuordnung zu den I4.0-Techniken immer unter den ersten drei Rängen priorisiert. Die Integrationsfähigkeit sowie die Selbststeuerung wurden ähnlich bewertet, erhielten allerdings wesentlich weniger Punkte als die Reaktivität. Während die Integrationsfähigkeit bei den Transportfahrzeugen und bei den Produkten keine Rolle zu spielen scheint, erhielt die Selbststeuerung bei allen Techniken Relevanz, insbesondere bei Betriebsmitteln, Transportfahrzeugen, Lager und den Produkten. Systemisch betrachtet sind diese drei Eigenschaften für die Arbeitskreisteilnehmer aus dem Logistikmanagement die relevantesten, gefolgt von der Entscheidungsfähigkeit und der Adaptivität. Die Entscheidungsfähigkeit ist bei Produkten mit dem größten Potenzial bewertet worden, gefolgt von Transportfahrzeugen, Lager sowie den assistierten Entscheidern. Die Adaptivität besitzt beim Lager und den Produkten keine Relevanz, bei Ladungsträgern und den Entscheidern hingegen die größte. Analog verhält es sich mit der (Teil-) Autonomie, die für Ladungsträger und Entscheider ebenfalls die relevanteste Eigenschaft darstellt. Die Kognition wurde für Transportfahrzeuge, Lager und Betriebsmittel ähnlich bewertet. Für alle anderen I4.0-Techniken ist sie nicht relevant. Die Eigenschaft der dezentralen Selbstplanung wurde durch die Teilnehmer als weniger

³⁵² Eigene Darstellung.

relevant beurteilt. Möglicherweise sind Vorbehalte durch Verluste der Planungskompetenz oder wenig Erfahrung in diesem Kontext aus Sicht der Logistik eine Erklärung. Die Selbstplanung erhielt lediglich bei den Ladungsträgern eine geringe Punktbewertung.

Die Zuteilung von Eigenschaften zu den I4.0-Techniken intelligente Betriebsmittel, Ladungsträger, Transportfahrzeuge, Lager, Produkte sowie assistierten Entscheidern aus Sicht des Logistikmanagements stellt die Detailanalyse der Eigenschaften dar. Die Bewertung der Gruppe Betriebsmittel ergab die Betonung der Eigenschaften Reaktivität und Integrationsfähigkeit mit fast identischer Bewertung. An dritter Stelle mit größerem Abstand zu den ersten beiden wurden die Selbststeuerung, die (Teil-) Autonomie sowie die Kognition bewertet. Selbstplanung und Entscheidungsfähigkeit von Betriebsmitteln wurde keine Relevanz beigemessen. Die Integrationsfähigkeit wurde bei intelligenten Ladungsträgern als die wichtigste Eigenschaft bewertet, was u. a. an ihrem Einsatz in unterschiedlichen Prozessbereichen intern und extern als Netzwerkknoten liegt. Mit Abstand wurde die Adaptivität an zweiter Stelle bewertet. (Teil-) Autonomie sowie die Reaktivität besitzen fast die gleiche Relevanz wie die Adaptivität. Entscheidungsfähigkeit und Kognition werden bei Ladungsträgern als nicht relevant erachtet. Für Transportfahrzeuge stellen Reaktivität und Selbststeuerung die beiden relevantesten Eigenschaften dar. Adaptivität, Entscheidungsfähigkeit und Kognition spielen eine untergeordnete Rolle. Selbstplanung, (Teil-) Autonomie sowie Integrationsfähigkeit besitzen keine Relevanz. Die vierte Gruppe adressiert Lager, deren relevanteste Eigenschaften zum einen die Integrationsfähigkeit und zum anderen die Selbststeuerung sind. Gleichauf, aber weniger relevant wurden dem Lager die Eigenschaften Reaktivität, Entscheidungsfähigkeit sowie Kognition zugeordnet. Selbstplanung, (Teil-) Autonomie und Adaptivität spielen nach Aussage der Logistikmanager keine Rolle. Für die Gruppe der intelligenten Produkte sind Reaktivität und Entscheidungsfähigkeit die relevantesten Eigenschaften, gefolgt von der Selbststeuerung. Alle anderen Eigenschaften besitzen für intelligente Produkte keine Relevanz. Die Konzentration auf die drei Eigenschaften ist insbesondere auf die Verbindung zu den Kundenbedürfnissen zurück zu führen. Die letzte Gruppe rückt das Personal als assistierten Entscheider in den Mittelpunkt. Dieser wird mit Reaktivität, Adaptivität sowie der (Teil-) Autonomie in Verbindung gebracht. Mit geringerer Punktzahl wurde die Entscheidungsfähigkeit bewertet. Die übrigen Eigenschaften, wie die Kognition oder die Selbstplanung wurden beim Personal direkt antizipiert.

4.1.3 Zusammenfassung

Die Gruppenbefragung konnte **Anforderungen** sammeln und diese in drei Gruppen systematisieren. Auf Seiten der **Basisanforderungen** und im Übergang zu den anderen Gruppen konnten Automatisierung, Fehlerminimierung, die klassischen Zielgrößen wie Servicegrad, Prozesseffizienz und Durchlaufzeiten sowie ein dynamisches Entscheidungsunterstützungssystem und die (Daten-) Sicherheit identifiziert werden. Die zweite

Gruppe, mit Potenzial die Kundenzufriedenheit zu steigern, bilden die **Leistungsanforderungen**, zu denen technische Anforderungen, wie die Lokalisation, Echtzeitfähigkeit, Kompatibilität und die Automatisierung von Transport und Kommissionierung zählen. Zusätzlich wurden in dieser Gruppe Logistikaufgaben wie selbstständige Steuerung und Überwachung von Produktparametern beim Transport und die Liefertermintransparenz identifiziert. Weitere Logistikaufgaben, wie die Vereinfachung der Managementaufgaben, Verfügbarkeitsmanagement und die Echtzeitkapazitätsplanung, wurden im Übergang zu den Begeisterungsanforderungen identifiziert. **Begeisterungsanforderungen** besitzen ein hohes Potenzial die Kundenzufriedenheit zu erhöhen und wurden von den Teilnehmern in der Ergonomie und Prognosefähigkeit gesichtet. Die klassischen Logistikziele wie die Verbesserung der Durchlaufzeiten sind Teil des Logistikmanagements und daher in der Auswahl von Anforderungen und Eigenschaften indirekt inkludiert.

Die Analyse der **Eigenschaften** aller intelligenten Objekte und Subjekte ergab, dass die Reaktivität das größte Anwendungspotenzial im innerbetrieblichen Netzwerk besitzt. Ihrer Priorisierung im System folgend, wurde die Integrationsfähigkeit, die Selbststeuerung, die Entscheidungsfähigkeit, Adaptivität sowie die (Teil-) Autonomie bewertet. Selbstplanung und Kognition spielen eine untergeordnete Rolle. Bezogen auf die I4.0-Techniken ist für intelligente **Betriebsmittel** die Reaktivität und die Integrationsfähigkeit, für **Ladungsträger** die Integrationsfähigkeit und Adaptivität, für **Transportfahrzeuge** die Reaktivität und Selbststeuerung, für **Lager** die Integrationsfähigkeit und Selbststeuerung, für intelligente **Produkte** die Reaktivität, Entscheidungsfähigkeit sowie die Selbststeuerung und für **assistierte Entscheider** die Reaktivität, Adaptivität sowie (Teil-) Autonomie mit den größten Anwendungspotenzialen bewertet worden.

Auf Basis von Literatur und Praxis konnten für I4.0 Anforderungen und Eigenschaften ausgearbeitet werden, die im zweiten Teil der empirischen Analyse in Form des „Wie“ weiter ausgebaut werden. Zunächst wird in Abschnitt 4.2 das Design der Erhebung sowie das „Warum“ erforscht.

4.2 Fallstudienforschung

Ziel der Fallstudienforschung der vorliegenden Arbeit ist die Erforschung des „Warum“ und des „Wie“ des I4.0-Einsatzes. Den primären Fokus bildet die innerbetriebliche industrielle Logistik produzierender Maschinenbauunternehmen in der Smart Factory.

4.2.1 Design

Abgeleitet aus der Forschungsfrage wird das Vorgehen der explorativen Fallstudie in Anlehnung an *KITTEL-WEGNER* und *MEYER*³⁵³ vorgenommen. Nach der Fallauswahl und der Entwicklung des Fallstudienrasters folgt die Auswahl geeigneter Methoden. Die **Auswahl der Fallstudie** ist ein wesentlicher Bestandteil des Forschungsprozesses und

³⁵³ Vgl. Kittel-Wegner und Meyer (2002), S. 22

sollte theoriegeleitet sein. Die geeignete Wahl wirkt sich direkt auf die Qualität der Ergebnisse aus, die im Erkenntnisgehalt begründet liegt. Es wird die Mehrfachfallstudie genutzt, da die Variation von geeigneten Fallstudien die Generalisierbarkeit unterstützen kann.³⁵⁴ Für die Auswahl von Unternehmen/Vertretern werden zunächst Selektionskriterien definiert: Die Marktposition (An: Anwender, Au: Ausrüster) für Anwendungsbreite und Erfahrungswerte. Vorträge, Veröffentlichungen und Messeauftritte (V), die Beteiligung an Initiativen (I) sowie Preisträgerschaft (P) für die Bewertung von I4.0-Aktivitäten. Für die Expertise werden Führungskräfte mit I4.0-Bezug aus Produktion und Logistik (PL) ausgewählt. Die Fallstudienforschung dieser Arbeit fokussiert das interne Logistiknetzwerk produzierender Maschinenbauunternehmen mit Skizzierung der Schnittstellen. In Summe wurden vier Fallstudien durchgeführt (Tabelle 11).

	Marktposition		I4.0-Aktivitäten			Expertise	
	An	Au	V	I	P	I4.0	PL
Unternehmen A	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Unternehmen B	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Unternehmen C	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Unternehmen D	✓	✓	✓	✓		✓	✓

Tabelle 11: Fallstudienauswahl

Das **Fallstudienraster** orientiert sich an dem „*Warum*“ in Form von Motivation, (erwarteten) Potenzialen und Herausforderungen sowie dem „*Wie*“. Das „*Wie*“ beschreibt in einem ersten Schritt das jeweilige Anwendungsbeispiel mit seinen Logistikprozessen. Anschließend werden die Anforderungen der Unternehmen aufgenommen, um das „*Wie*“ anhand der Gestaltungsebenen System, Netzwerk und Technologie zu kompletieren. Als **Erhebungsmethode** wird die Mehrfachfallstudie mittels ca. 1,5-stündigen Interviews mit mindestens einem Unternehmensvertreter durchgeführt. Zudem wird nicht-/öffentlich zugängliches Unternehmensmaterial in die Betrachtung mit einbezogen. Gemeinsam fließen die verschiedenen Quellen in die **Beschreibung** der Fallstudien ein. Die Berichte werden mit den Interviewten besprochen, auf Richtigkeit hin untersucht, und anschließend werden **fallübergreifende Schlüsse** gezogen, die in den Gestaltungsansatz einfließen.

4.2.2 Beschreibung Unternehmen A

Unternehmen A ist mit einem hohen dreistelligen € Mio. Umsatz und mehreren Tausend Mitarbeitern ein global agierendes Unternehmen. Das Produktportfolio bietet Lösungen zur Informationsaufbereitung für Produktivitätssteigerungen und in der Hochspannungstechnik. Im Rahmen der Digitalisierung besitzt das Unternehmen eine ca. 30 jährige Erfahrung. Unternehmen A ist u.a. Preisträger in der Mitarbeiterzufriedenheit, der „Operational Excellence“ sowie mit seiner Fertigungslösung in I4.0.

³⁵⁴ Vgl. Eisenhardt (1989), S. 536 f.

4.2.2.1 Motivation, Potenziale und Herausforderungen

Motiviert wurden Aktivitäten aus dem operativen Bereich (bottom-up) auf Initiative der Produktionsprogrammierer. Haupttreiber war die fehlende Transparenz über betriebliche sowie technische Abläufe mit papierbasierten Prozessunterlagen, deren Aussagekraft nicht genügte. Die vorhandenen Lösungen resultierten in hohen Bearbeitungsaufwänden durch Erklärungsbedarf und der Bindung von Abteilungsressourcen. Das Ziel bestand darin, den Virtualisierungs- und Automatisierungsgrad sämtlicher Prozessunterlagen zu erhöhen, um zur Schließung von Medienbrüchen und zur Beschleunigung der Entscheidungsfindung beizutragen. Ergebnisse konnten in der Senkung nicht wertschöpfender Tätigkeiten sowie der Reduzierung von Prozesszeiten festgestellt werden. Die verschiedenen Digitalisierungsaktivitäten wurden in den letzten Jahren unter dem Begriff I4.0 gebündelt, welchen Unternehmen A als Integration aller partizipierenden Produzenten, Lieferanten, Kunden etc. einer Wertschöpfungskette beschreibt. Diese Entwicklung ist erst am Beginn und wird als Prozess, nicht als Revolution angesehen. Subsumiert werden in diesem Kontext Begriffe wie „*Interdisziplinarität, Social Media, Mobile Computing, Virtualisierung, Smarte Objekte, Big Data, Analyse, Optimierung und Vorhersage (Data Mining), Internet der Dinge und Dienste, Assistenzsysteme, CPS sowie die Smart Factory*“.

Die Erfolge im Fertigungsbereich führten mit der Unterstützung der Geschäftsführung zu konkreten Zielformulierungen: Wirtschaftliche Realisierung der kleinstmöglichen Losgröße, Beherrschung der Variantenkomplexität sowie Reduzierung der Lieferzeit. Übergeordnetes Ziel im Kontext der industriellen Logistik ist die „Hochleistungsfertigung“. Erreicht werden soll dies mittels der kontinuierlichen Verbesserung von Prozessen, um erstens mehr Kundenbedarfe zu geringeren Stückkosten zu bedienen und zweitens durch digitale Geschäftsmodelle Software- und Beratungsleistungen anbieten zu können.

Treiber für einen erfolgreichen I4.0-Einsatz wurden von Unternehmen A in standardisierten, transparenten Prozessen unter Lean Management-Gesichtspunkten skizziert. Auf der technologischen Seite ist die Stammdatenqualität, der Aufbau von Datenbanken über das nötige Inventar³⁵⁵, ein sicheres (Maschinen-) Netzwerk mit eigenen IPs sowie ein stabiles und sicheres WLAN innerhalb der Fabrik notwendig. Zudem sollten etwaige Lösungen von der strategischen IT-Abteilung mitgetragen werden. Das größte Hemmnis liegt in der Zunahme der Schnittstellenbandbreite bei einer 1:1-Verbindung aller Objekte. Ein vollständiger dezentraler Ansatz wird abgelehnt und die Nutzung einer Integrationsplattform präferiert. Die gesamte Lösung sollte demnach aus einer Mischung de- und zentraler Elemente bestehen, um die Bandbreite des Netzwerkes zu reduzieren. Zudem muss der Mitarbeiter in den Entwicklungs- und Veränderungsprozess integriert werden, um Ablehnung im Vorfeld abzubauen.

³⁵⁵ Verzicht auf Excel-Listen.

4.2.2.2 Anwendungsbeispiel und Logistikprozesse

Das Anwendungsbeispiel fußt auf der digitalen Durchgängigkeit der Produktion und Logistik, d. h. der Virtualisierung aller Abläufe sowie der Bereitstellung der generierten Daten über die (logistischen) Abläufe für die operativen Bediener mit Hilfe von Assistenzsystemen. Das Assistenzsystem mit Plattforminfrastruktur stellt die I4.0-Lösung von Unternehmen A für eine Smart Factory dar. Die Plattform wird zusätzlich als MES genutzt. Dieses verbindet das ERP-System direkt mit dem operativen Bereich (vertikale Integration) und gewährleistet zugleich die Vernetzung einzelner Prozessschritte (horizontale Integration). Das Assistenzsystem läuft direkt auf der Browser-Oberfläche der Maschinensteuerung und kann vollautomatisierte Aufgaben erledigen (z. B. die Datenanreicherung) sowie Entscheidungsgrundlagen liefern, die der Mitarbeiter anfordert. Im *Intranet der Dienste* existiert für jede Dienstleistung ein Dialog, wie z. B. „*Wenn der Behälter voll ist, bestellt die Maschine sich einen Gabelstapler zur Entleerung.*“ Analog existieren Dialoge für die Rohteilebelieferung oder z. B. für die Bestellung von Fachpersonal bei Störungen. Ursprünglich wurden Behältertransporte durch Zuruf organisiert. Heute kontrolliert der Mitarbeiter den Behälterstatus und löst den Bestellvorgang aus. Der Staplerfahrer erhält ein visuelles Signal auf sein Tablet und startet den Abholprozess. Dadurch wurde eine Lieferzeitreduzierung erzielt.

Herausforderungen liegen in der Stammdatenqualität, explizit in der Vollständigkeit der Daten, da fehlende Daten nicht mehr durch Annahmen bzw. Erfahrungswerte ausgeglichen werden. Des Weiteren ist es anspruchsvoll, intuitiv ablaufende, nicht ausgesprochene Denkleistungen und Tätigkeiten (d. h. kognitive Denkprozesse) in die Sprache der IT zu übersetzen und damit zu digitalisieren und papierlos zu machen. Zur Realisierung wurde zunächst die Virtualisierung des gesamten Fertigungsprozesses mittels der Digitalisierung der statischen Systeme (Maschinen z. B.) angestrebt. Der zweite Schritt liegt in der Virtualisierung von dynamischen Systemen. Dies wird durch das Aus- und Einbuchten von z. B. Transporten realisiert.

Die Unterstützung von Zielen, der Planung, Steuerung und Kontrolle wird durch den webbasierten Zugriff auf Echtzeitdaten zur Kommunikation z. B. browserfähiger Maschinen ohne zusätzliche Hardware, ergonomische, einfache Benutzeroberflächen und Bedienbarkeit ohne manuelle Dateneingabe, standardisiertes Schnittstellenmanagement, Datenanalysewerkzeuge mittels statistischen Verfahren sowie die Skalierbarkeit bei der Erweiterung des Maschinenparks realisiert. Mittels Auslösung des Fertigungsauftrages im PPS wird der gesamte Kreislauf aller Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe (RHB) wie Werkzeuge mit allen dazugehörigen Daten papierlos im operativen Bereich gesteuert und überwacht. Der Ablauf wird transparent über den gesamten Informationsfluss innerhalb der Fabrik gewährleistet und unterschiedliche Prozesszustände werden abrufbar. Rohdaten werden gesammelt, mit weiteren Daten angereichert und ermöglichen die Offenlegung von Abweichungen des tatsächlichen Status zur kontinuierlichen Verbes-

serung. Die Informationen werden für das Personal als Entscheidungsgrundlage aufbereitet. Mittels Vernetzung von mehreren Maschinen mit individuellen RHB-Kreisläufen wird ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt. Mit dem System konnte eine bessere Produktivität sowie Prozess- und Produktqualität erzielt werden, indem z. B. fehlerhafte Eingaben durch das Personal eliminiert wurden.

Die I4.0-Lösung im Kontext der Logistik von Unternehmen A erstreckt sich über Beschaffung, Produktion und Distribution. Ausgangspunkt bildet die Produktion, die bisher den größten Fortschritt in Bezug zu Digitalisierungsaktivitäten aufweist. Die Produktion erzeugt dadurch eine Sogwirkung auf die anderen Bereiche, die sich ebenfalls sukzessive virtualisieren. Dies wird bis auf externe Kunden ausgeweitet. Die bisher integrierten bzw. abgebildeten Logistikprozesse sind das Transportieren, Lagern und Disponieren von Werkzeugen, Rohteilen und Vorrichtungen. Der Transport soll in Zukunft durch organisierte Routenzüge von Gabelstaplern erfolgen, die im Schwarm Fertigungssegmente an Bushaltestellen liefern.

4.2.2.3 Anforderungen

Die abgeleitete Anforderung an Logistiksysteme der Smart Factory besteht in der Verortung sowie der Lokalisation aller un-/bewegten Objekten (Transportmittel, RHB etc.). Zweitens ist die Steuerung aller Abläufe in Echtzeit zu gewährleisten, muss eine Abkehr von sequentieller Datenverarbeitung (sogenannter Batchverarbeitung) erfolgen, in der die Berechnung in der Nacht erfolgt und damit einer statischen Steuerung entspricht. Für ein leistungsfähiges Logistikmanagement wurde zunächst die Standardisierung der Prozesse mit Lean-Methoden notwendig. Weitere Standardisierung erzielte der Virtualisierungsprozess. Um die Sicherheit und Stabilität zu gewährleisten, werden Angriffe mit externen Partnern durchgeführt.

4.2.2.4 System- und Netzwerkebene

Die Logistikziele bestehen in der Kontrolle aller Bewegungsdaten, um Leerzeiten und -fahrten zu reduzieren, die Auslastung von Behältern, Staplern etc. zu erhöhen sowie unnötige Transporte gänzlich zu vermeiden. Zusammenfassend wurde die Reduzierung nicht-wertschöpfender Tätigkeiten gemäß dem Lean Management erzielt. Ausgangspunkt ist die auftragspezifische Fertigung zur Losgrößenreduzierung. Zusätzlich konnte das System durch digitale Auftragsdaten in der Rüstablaufplanung mittels verschlankter Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung aller Maschinen den Rüstaufwand reduzieren und dadurch Bestände abbauen. Die sparsamere Bewegung im Lager reduzierte die Transporte für Werkzeug- und Hilfsmittelkreisläufe. Der positive Effekt der verkürzten Durchlaufzeiten für Rüst- und Transportprozesse sowie die Bestandsabnahme überwog somit häufigeres Rüsten infolge von kleineren Losgrößen.

In das aktuelle System sind Betriebsmittel (Maschinen), Transportfahrzeuge (Routenzug) und das Personal integriert. Die Anbindung eines Hochregallagers sowie die In-

tegration von Ladungsträgern befinden sich in der Planung. Die logistische Anwendung besteht aus einem internen Kunden (Maschine)-Lieferanten Netzwerk, das durch ein Intranet der Dinge realisiert wurde. Hierzu wurde mittels eigener IP je Maschine ein Netzwerk etabliert. Das Assistenzsystem vernetzt mit Hilfe einer Plattform alle beteiligten Objekte und Subjekte der Fertigungsprozesse miteinander. Die Vernetzung bezieht direkte und indirekte Bereiche mit ein. Die entwickelte Lösung folgt der diskutierten Logik aus Abschnitt 3.3.3, in der eine oder mehrere zentrale Plattformen für die Vernetzung unterschiedlicher Akteure präferiert wird.

4.2.2.5 Technologieebene

Die Ausstattung von Objekten mit IDT ist aktuell in Planung, da z. B. Stati über den Ort von Materialien während des Transportes unbekannt sind. Die Ausstattung von Transportmitteln wird im Zuge eines neuen Logistikzentrums erfolgen. Zur Integration der Mitarbeiter werden Assistenzsysteme zur Entscheidungsunterstützung und Steigerung der Entscheidungsqualität verwendet. Weitere Technologien im Bereich der Assistenzsysteme sind eine digitale Werkermappe sowie Tablets für den Routenverkehr. Smart Phones können in der neuesten Version der Lösung integriert werden. Das Ziel von Assistenzsystemen liegt in der Entlastung des operativen Personals von Routinetätigkeiten. Im vorliegenden Anwendungsfall wurde das manuelle Einpflegen der Daten durch Barcode-Scanner sowie Planungsberechnungen teil- bis vollständig automatisiert. Dadurch wurde die Parallelisierung von Tätigkeiten schneller, sicherer, bequemer und einfacher. Über einen Entwicklungszeitraum von 30 Jahren konnten die Mitarbeiter sukzessive integriert werden. Beim Vertrieb der Lösung werden externe Mitarbeiter durch die Mitarbeit an der bereits bestehenden Lösung in Lernfabriken geschult, um Vorbehalte abzubauen.

4.2.2.6 Zusammenfassung

Unternehmen A entwickelte über einen längeren Zeitraum eine zentrale Integrationsplattform zur horizontalen und vertikalen Integration von Unternehmensleitenebene und operativem Bereich als ganzheitliches Assistenzsystem zur Planung und Steuerung des Milkrun, in dem die 1:1-Vernetzung zu Gunsten einer Integrationsplattform aufgelöst wurde. Somit konnte die Virtualisierung der Fabrik vorangetrieben werden, eine Lösung, die von anderen Unternehmen nachgefragt wird und bei Unternehmen A als Grundlage für neue Geschäftsmodelle sowie kontinuierliche Verbesserungsprozesse zusätzlicher Bereiche dient.

4.2.3 Beschreibung Unternehmen B

Als Ausrüster und Anwender von technologischen Lösungen ist Unternehmen B in den Segmenten Kraftfahrzeugtechnik, Gebrauchsgüter, Industrietechnik sowie Energie- und Gebäudetechnik aktiv. Mit einem weltweiten zweistelligen € Mrd. Umsatz sowie mehre-

ren hunderttausenden Mitarbeitern gilt das Unternehmen als weltweit führend im Bereich der Sensorik und Aktorik. Das Unternehmen ist u. a. Preisträger in I4.0- und Logistikdisziplinen sowie Mitinitiator der „Connected Industry e.V.“ sowie Mitglied des nordamerikanischen „Industrial Internet Consortium“.

4.2.3.1 Motivation, Potenziale und Herausforderungen

Unternehmen B führt zahlreiche Aktivitäten im Kontext von I4.0 durch. I4.0 ist die Virtualisierung industrieller Prozesse für die Erstellung eines digitalen Abbildes. Die Virtualisierung der Fabrik geht mit einer Vernetzung der gesamten Abläufe einher, um eine flexible, wandlungsfähige Produktion bis zur Losgröße 1 zu realisieren. Im Jahr 2008 startete Unternehmen B mit Auto-ID-Initiativen für die Materialversorgung auf Werks-ebene. Aus den RFID-Aktivitäten und der damit einhergehenden Prozessvirtualisierung wurden sukzessive weitere Projekte angestoßen, die in den letzten Jahren unter dem Konzept I4.0 auf der strategischen Entscheidungsebene formuliert und erweitert wurden. Für Unternehmen B liegen die Ziele der Smart Factory in der automatisierten Datenerfassung innerhalb von Prozessen, d. h. manuelle Buchungspunkte zu reduzieren und durch Auto-ID-Technologien zu ersetzen. Die Daten dienen der Realisierung selbststeuernder Algorithmen zum Aufbau von Assistenzsystemen, um das Personal mit Entscheidungsgrundlagen in der Prozesssteuerung und -optimierung zu unterstützen. Dies soll durch geringe Rüstzeiten sowie die schnelle Reaktion auf sich verändernde Marktbedingungen (Kundenbedürfnisse) realisiert werden, die Produktivität und Qualität erhöhen sowie eine Ressourcenschonung ermöglichen.

Treiber und Hemmnisse für einen erfolgreichen I4.0-Einsatz werden in bereichsübergreifender Denkweise, einem Prozess-, IT- und Gesamtsystemverständnis und der Stammdaten-, Infrastruktur-, sowie Prozessqualität gesehen. Zu beachten ist zudem vorab die Entwicklung einer detaillierten Strategie mit anwendungsgetriebenen Lösungen (bottom-up) sowie das schrittweise nicht „effekthaschende“ Vorgehen in Pilotprojekten. Hier liegt auf Anwenderseite das Risiko einer überzogenen Erwartungshaltung. Des Weiteren bietet I4.0 Vorteile in der Steigerung der Produktivität, der Transparenz sowie der Offenlegung von Schwächen im Ablauf, die durch Technologien gezielt unterstützt werden können, um eine ganzheitliche, übergreifende Optimierung zu ermöglichen. Der Technologieeinsatz für die Schwachstellenanalyse sowie die frühzeitige Mitarbeitereinbindung können den I4.0-Einsatz fördern. Dabei wird es zu einer Beschränkung der Freiheitsgrade für den Menschen in Bezug auf intuitive Entscheidungen kommen, die standardisierten Zieldefinitionen entgegenstehen.

4.2.3.2 Anwendungsbeispiel und Logistikprozesse

Im betrachteten Werk wird der gesamte innerbetriebliche Transport für die Rohmaterialversorgung mittels RFID gesteuert und überwacht. Für die Realisierung wird die Materialentnahme in der Fertigung direkt am Anlieferregal (Supermarkt), d. h. am Ver-

brauchsort, mittels RFID-Scannung automatisch erfasst. Nach Erfassung der Entnahme wird automatisch ein Transportauftrag erzeugt, der eine Nachlieferung im Logistikzentrum auslöst. Hier wird nach der Auslagerung das Material routengerecht für die Versorgung im Fertigungsbereich auf den Milkrun mittels RFID kommissioniert. Die Zustellung auf den Milkrun wird ebenfalls durch RFID eventbasiert dokumentiert. Im internen Transport wird die Ware durch RFID-Gates an definierten Umschlagsorten erfasst und wiederum als Event dokumentiert. Dadurch werden kontinuierlich Daten über den Status der Ware gesammelt. Unternehmen B deckt mit Hilfe von Auto-ID-Lösungen Nachbestellungsprozesse von Verpackungen, Werkzeugen und RHB ab.

Die Herausforderung besteht in der Integration und virtuellen Abbildung der gesamten Fabrik über alle Ebenen. Angestrebt ist eine flächendeckende, durchgängige Lösung, für die erstens physische Prozesse analysiert, zweitens die fragmentierte IT-Infrastruktur integriert und drittens die Managementebenen involviert werden müssen. Für den Gesamtprozess spielen unterschiedliche Abteilungen, Kulturen und Zielsetzungen eine Rolle; so präferiert z. B. der Einkauf großzahlige Volumina, ein Lean Manager dagegen kleine. Bzgl. der automatisierten Planung und Steuerung sind heterogene IT-Systemlandschaften und Datenquellen zu berücksichtigen sowie die Komplexität der Vernetzung und Verkettung in verschiedenen Systemen und Ebenen sowie die Integration dieser unterschiedlichen Planungsebenen. Grundlage hierfür sind echtzeitnahe Daten, die die Basis für eine nachhaltige Planung darstellen. Die heutige Bedarfsplanung z. B. ist mit einer hohen Unschärfe bzgl. der Daten konfrontiert. Die Planung basiert aktuell nicht auf Lean-Prozessen, d. h. die tatsächlichen Bestände sind nicht bekannt. Die aufgenommenen Daten aus der Feldebene sind nicht synchron mit den Daten des ERP (z. B. aufgrund des Zeitverzugs). Dieser Umstand reduziert die Planungsqualität und führt u. a. zu Bullwhip-Effekten, so dass die Prozesse auf die Spitzen der Schwankungen ausgelegt werden müssen.

Das Anwendungsbeispiel erstreckt sich über die Beschaffungs-, Produktions- und Distributionslogistik. Die Integration der Lieferanten ist über das Logistikzentrum erfolgt. Die Integration der Kunden wird nur fallweise durchgeführt. Wie im Anwendungsfall skizziert, sind im Kontext der Lösung bisher die logistischen Kernprozesse von Transportieren, Kommissionieren und Lagern abgebildet. Aktuell werden weitere logistische Prozesse als Bausteine der Prozessintegration sukzessive ausgebaut. „Verpacken“ folgt der einfachen Logik *„Wie bringe ich physische Dinge zusammen?“*. Der Prozess der Funktionalität „Verpacken“ wird aktuell in der technischen Sprache erfasst und übersetzt. Dafür sind die Setzung der Datenpunkte sowie die Entscheidung über notwendige Daten erforderlich. I. d. R. wird die Planung über etwaige prognostizierte Verbräuche geregelt. Der Ansatz von Unternehmen B ist durch eine Max-Min-Steuerung durch Implementierung technischer Regelkreise realisiert. Die Kombination eines analogen Kanban-Systems mit den Eigenschaften der I4.0 zu eKanbans mit technischen Regelkreisen etablierte die Selbststeuerung. Dadurch wurden die Planungsebenen auf die tiefst mög-

liche (operative) Ebene an den Ort des Verbrauchs und der Entscheidung verlagert. Ergebnis ist eine automatisierte Ad hoc-Planung im operativen Bereich. Da die Prozesse den Lieferanten einbeziehen (durchgängige Verbrauchssteuerung durch eKanbans über Materialverbräuche), existiert im Anwendungsfall von Unternehmen B keine operative/taktische Planung mehr. Hier wird eine Ad hoc-Planung mittels reiner Signalweitergabe etabliert. Die durchgängige Verbrauchssteuerung generierte neue Planungsalgorithmen.

4.2.3.3 Anforderungen

Die Anforderungen an die Logistik der Smart Factory liegen in der Schaffung der maximalen Transparenz der Abläufe durch Lokalisation aller physischen (logistischen) Objekte mittels automatisierter Generierung von Daten in Echtzeit. Das Ergebnis ist die Automatisierung der Datenerfassung, automatisierte Transportsysteme sowie die Steigerung der Flexibilität im Fluss befindlicher Objekte und Subjekte. In der Vergangenheit sind autonome Transportsysteme im Unternehmen aufgrund der zu hohen Flexibilitätsanforderungen gescheitert. Das lag insbesondere an der fehlenden Datenbasis. Für die Abbildung einer geforderten Granularität von Prozessen existierte nicht die nötige Stammdatenqualität. Die Qualität und der Erfassungsaufwand der Daten wurden unterschätzt. Neben der Datenaufnahme wurden für die Erhöhung der Automatisierung die Etablierung von Standards und stabile „Lean-Prozesse“ zwingend notwendig. Die Automatisierung ist in diesem Zusammenhang kein Selbstzweck, sondern das Ergebnis von stabilen Prozessen mit hoher Datenqualität.

4.2.3.4 System- und Netzwerkebene

Logistikziele sind u. a. die Effizienzsteigerung in den Materialversorgungsprozessen in den Werken von Wareneingang bis Warenausgang sowie die Prozessverbesserung in den Nachbestell- und Nachschubprozessen. Durch nach Lean-Prinzipien gestaltete Prozesse konnten Standards sowie die Prozessstabilität gewährleistet werden, die für die Einführung von RFID-Lösungen als elementar angesehen wird. Die Implementierung von Technologien führte ihrerseits zu einer weiteren Prozessstandardisierung. In Unternehmen B konnten die Bestände (um 30 %), die Wiederbeschaffungszeiten (um 50 %) sowie die Buchungsdauer nahezu vollständig reduziert werden. Dem gegenüber steht eine Erhöhung der absoluten Buchungen pro Monat in der Produktion um ca. 1.000 % und in der Materialversorgung um 200 %. Diese Informationen fließen in Analysen über die Auslastung von Transportfahrzeugen sowie über Transportzeiten einzelner Materialien ein. Zusätzlich können Falschliefereien vor der Erreichung eines falschen Zielortes erfasst und proaktiv verhindert werden. Durch die Implementierung von Auto-ID-Lösungen im Nachschubprozess sind sämtliche manuelle Buchungsvorgänge entfallen. Das operative Personal wurde von manuellen Tätigkeiten entlastet und der wertschöpfende Anteil erhöht. Dadurch wurde es Unternehmen B möglich, die Transparenz über

den Fertigungsfortschritt informatorisch zu erhöhen. Die Synchronisation von Material- und Informationsfluss wurde dadurch weiter vorangetrieben. Darüber hinaus konnte bei Störungen frühzeitig Einfluss genommen und somit Konsequenzen für die Gesamtkette verhindert werden. Geplant sind weitere Datenerfassungspunkte ohne Zusatzaufwand mittels RFID zu erzeugen, um so die Virtualisierung aller Kanten und Knoten in der Fabrik weiter voranzutreiben.

Auf der Ebene des innerbetrieblichen Netzwerkes nutzt Unternehmen B Behälter über Kanbans, Transportmittel über den Milkrun selbst (Behälter oder Transportfahrzeug), Förderbänder sowie die Mitarbeiter an den Schnittstellen. Objektdaten werden nach Einschätzung des Experten benötigt, um die Virtualisierung voranzutreiben. Personendaten werden nur in Abhängigkeit von spezifischen Anwendungsfällen aufgenommen. Die Integration externer Kunden ist individuell und hat für den hier betrachteten Fall keine Relevanz. Bei anderen werden z. B. ausgelieferte Produkte mit eigenen IPs ausgeliefert, um sie zu individualisieren und internetfähig zu machen.

Individualisierte Ziele (Steuerungssysteme) für die logistischen Objekte existieren in Form von Soll-Ist-Abgleichen über den definierten Zielort, die definierte Zielzeit oder bei der Entnahme am Supermarkt über die korrekte Nachschubversorgung und einen etwaigen Eskalationsprozess. Die Definition individueller operativer Ziele (individuell erkennbar, verfolgbar und steuerbar) ist erforderlich, die Abgrenzung allerdings Zielkonflikten unterworfen. Das individuelle Ziel eines Behälters, z. B. der monatlichen Reinigung, kann dem Unternehmensziel einer geringen Monatsmiete des Behälters entgegenstehen. Unternehmen B forciert die Stärkung individueller Ziele operativer Objekte. Auf höheren Hierarchieebenen werden ganzheitliche Zielrestriktionen angestrebt und die Auflösung von Bereichszielen anvisiert. Intendiert werden übergreifende ganzheitliche Systemziele. Organisatorische Hürden, Bereichsdenken und die Einschränkung von Freiheitsgraden der Mitarbeiter gelten als größte Herausforderungen in der Ermöglichung des Systemansatzes. Die individuelle Belegung von Objekten mit Logistikaufgaben schwankt in Abhängigkeit vom Anwendungsfall. Die Selbststeuerung wird angestrebt und ist für die Anforderungen des Unternehmens in Projekten umgesetzt. Die Frage „*Wie viel Intelligenz will ich mir leisten und wie viel Intelligenz braucht die Einheit?*“ schwankt und reicht von einfacher Lokalisation über Entscheidungsgrundlagen bis zu selbstständigem Umsetzen von Aktionen.

Regeln und Restriktionen beziehen sich u. a. auf die Auflösung der angesprochenen Bereichsziele sowie den damit einhergehenden Einschränkungen der Freiheitsgrade für das Personal, um Entscheidungen zu verhindern, die das Gesamtziel gefährden. Die notwendigen, in IT gegossenen Algorithmen stellen letztendlich eine Norm, einen Standard dar. Ziel ist die Steigerung von Verbindlichkeit, Nachhaltigkeit und Transparenz über Abläufe. Positive Wechselwirkungen zwischen (intelligenten) Objekten konnten durch die ganzheitliche Prozessoptimierung in Bezug auf Auslastungen und Transporte festgestellt werden. Negativ sind die Steigerung von Datenmengen, die nicht mehr mit der

bestehenden Infrastruktur verarbeitet werden können sowie die Zunahme von Abhängigkeiten der Objekte bei Störungen.

4.2.3.5 Technologieebene

Eigenschaften im Sinne von I4.0 werden erprobt und befinden sich in unterschiedlichen Arbeitsständen. Weiter sind die Erfahrungen bei Technologien, die den Austausch mit dem Personal bedingen. Es existieren simple Lösungen, wie „Wenn-Dann-Vergleiche“, Eskalationsprozesse/-emails, visuelle Systeme wie Lampen oder automatisch ausgelöste Bestellvorgänge. Vollautomatisierte Systeme sind nur z. T. im Einsatz. Die Nutzung von Tablet und Smart Phone nimmt zu, wohingegen Augmented und Virtual Reality-Lösungen weniger Potenzial beigemessen wird, da sie z. B. das Sichtfeld einschränken. Smart Glasses verursachen Kopfschmerzen und die kurze Akkuleistung verursacht Rüstaufwand. Die Komplexitätszunahme von Systemen sollte schrittweise erfolgen. Speziallösungen bzw. Lösungen aus „Technikverliebtheit“ sollten vermieden werden und an der Kosten-Nutzen-Betrachtung für den Bediener ausgerichtet sein.

4.2.3.6 Zusammenfassung

Unternehmen B legt die Basis der Anwendungen durch Automatisierung mittels Auto-ID-Technologien, vornehmlich RFID. Der hier betrachtete Fall zeichnet sich durch den Systemansatz sowie die digitale Durchgängigkeit der Materialversorgung von Wareneingang bis -ausgang innerbetrieblicher Leistungsprozesse zur Planung und Steuerung der Materialverbräuche aus. Dadurch konnte die Planung auf die operative Ebene verschoben und zu einer Ad hoc-Planung transformiert werden. Logistikziele sind Teil operativer Objekte und in technischen Regelkreisen realisiert. Auftretende Zielkonflikte sind erkannt und werden adressiert, wie z. B. die Auflösung von Abteilungszielen durch die direkte Vernetzung von strategischen mit operativen Zielen.

4.2.4 Beschreibung Unternehmen C

Unternehmen C ist als Ausrüster und Anwender mit mechatronischen und elektromechanischen Lösungen am Markt vertreten. Zu den Produkten zählen u. a. Getriebe und Antriebssysteme, die in Robotern, Werkzeugmaschinen oder in der Luft- und Raumfahrttechnik zum Einsatz kommen. Mit einem weltweiten dreistelligen € Mio. Umsatz, mehreren tausenden Mitarbeitern sowie global operierenden Tochtergesellschaften und Vertretungen, verfügt das Unternehmen über ein weltweites Netzwerk. Im Rahmen der Digitalisierung fokussiert das Unternehmen Lösungen in I4.0 und dem Internet der Dinge. Neben Veröffentlichungen und Messeauftritten forcieren die Partizipation an national geförderten Verbundforschungsprojekten sowie dem „Industrial Internet Consortium“ wissenschaftliche und praxisrelevante Entwicklungen.

4.2.4.1 Motivation, Potenziale und Herausforderungen

Vor ca. 15 Jahren begann das Unternehmen, seine Produktstrategie an den digitalen Trends Miniaturisierung, Integration, Netzwerkfähigkeit und Intelligenz zu orientieren. I4.0 wurde erstmals durch ein Forschungsprojekt über cyber-physische Produktionssysteme im Jahr 2012/2013 konkretisiert. Während einzelne Projekte durch den operativen Bereich im Rahmen von Operational Excellence-Initiativen (bottom-up) gestartet wurden, sind I4.0-Aktivitäten durch Vorstand und Inhaber motiviert. Das Internet der Dinge wird einen effektiveren Zugriff auf Informationen sowie eine effiziente Auswertung dieser mit auf dem Internet basierenden Technologien ermöglichen. Charakterisiert ist es durch allgegenwärtige Vernetzung (Digitalisierung von Alltagsgegenständen), Intelligenz (proaktive autonome Steuerung oder Regelung) sowie Assistenz (Entscheidungsgrundlagen). I4.0 bildet die Anwendung des Zugriffs auf Informationen im produzierenden Unternehmen mittels vertikaler (Vernetzung von Produktions- und IT-Systemen) und horizontaler (Informationsaustausch im Wertschöpfungsnetzwerk) Integration sowie der digitalen Durchgängigkeit (Zugriff auf Informationen über den Produktlebenszyklus) aus.

I4.0 wird als strategisches Zukunftsfeld und wesentlicher Effizienztreiber für die eigene Produktion betrachtet. Erwartete Potenziale sind die Reduzierung organisatorischer Verluste und eine damit einher gehende Effizienzsteigerung insbesondere in der Fertigung. Um diese Potenziale zu heben, strebt Unternehmen C die Digitalisierung von betrieblichen Abläufen sowie eine bessere Planung und Steuerung dieser Abläufe an. Unternehmen C erwartet tendenziell höhere Potenziale in indirekten Bereichen, da die direkten Bereiche bereits eine Vielzahl an Optimierungsprojekten durchlaufen haben.

Herausforderungen für den erfolgreichen I4.0-Einsatz liegen in der Formulierung strategischer Zielsetzungen, die die Unternehmensaktivitäten in Verbindung bringen, der Anpassung des Verhaltens und der Einstellung der Führungskräfte sowie prozessseitig einer notwendigen Standardisierung und Prozessbeherrschung gemäß Lean Management. Zu vermeiden ist die Motivation allein aus der Technologiesicht heraus. Entwicklungen und Projekte sollten anwendungsgetrieben und mit den Mitarbeitern erstellt werden. In diesem Kontext ist ein Treiber für I4.0-Aktivitäten die Komplexität durch mehr Variantenreichtum im Bereich der Produkte. Unternehmen sind damit konfrontiert mehr (individuelle) Produkte herzustellen. Die Komplexitätsbeherrschung ist daher für das Unternehmen das zentrale Thema. Variantenvielfalt und Komplexität werden nur mit substantiellen Investitionen in den Infrastrukturaufbau (z. B. Auto-ID), der Realbildfassung mittels Scans und Buchungen sowie der Gewährleistung der Stammdatenqualität beherrschbar werden. Bevor die Digitalisierung erfolgt, sind zunächst Prozessanalysen (Ist-Prozesse erfassen und Überführung in ein Lastenheft für Soll-Prozesse) für Logistik, Produktion und unternehmenseigener IT sowie die Zusammenarbeit mit externen Dienstleistern nötig.

4.2.4.2 Anwendungsbeispiel und Logistikprozesse

Der Anwendungsfall hat die bedarfsorientierte Steuerung der Materialversorgung durch eine intelligente Vernetzung von logistischen Einheiten sowie die Steigerung der Transparenz über interne Logistikprozesse zum Ziel. Dies soll zur Ablösung gängiger stündlicher Fahrpläne führen, die nicht flexibel am tatsächlichen Bedarf ausgerichtet sind. Das bisherige Problem bestand in der Steuerung des Materialflusses zwischen Anliefer- und Abholflächen zwischen den einzelnen Prozessschritten. Das stündliche Intervall erschwerte die Anforderungen an die Materialversorgung, wie z. B. Echtzeitfähigkeit, da der Zustand zu abholender Fertigungsaufträge während des Milkruns unbekannt ist. Die Bedarfsorientierung soll die Optimierung von Auslastungen, Ressourceneinsatz, Wegstrecken sowie die Flexibilisierung des Systems adressieren. Im Anwendungsfall wurden physische Objekte (Fertigungsaufträge, An- und Ablieferungsflächen etc.) mit 2D-Barcodes ausgestattet. Die Datengenerierung erfolgt durch die Erfassung über Scanner und Tablets. Diese Daten werden mit den Systemen der Produktionsplanung und -steuerung vernetzt, durch einen externen Dienstleister aufbereitet und zu einer optimierten Routenplanung interpretiert. Durch die Datenerfassung konnte ein virtuelles Abbild des Materialflusses erstellt werden. Dazu speisen die Logistikmitarbeiter via Scanner und Tablet die Daten der Fertigungsaufträge in das Planungssystem ein. Ein analoges Verfahren wird bei den Anliefer- und Abholflächen angewendet, um zusätzliche Daten für das digitale Abbild der Materialflüsse zu ermöglichen. Routen, Orte sowie Anliefer- und Abholzeiten werden dem Logistiker via Tablet angezeigt. Transport, Lagerung und Disposition sind bisher in das System integriert. Die Prognosen der Fahrpläne umzusetzen, dauerte länger als ursprünglich geplant.

Die Herausforderung besteht in der informationstechnischen Transparenz der Abläufe, um einen umfassenden Zugriff auf aktuelle und hochauflösende Informationen für die Assistenz des Personals zu ermöglichen und die Planung und Steuerung zu optimieren. Als größte Herausforderung stellte sich die nötige und tatsächliche Stammdatenqualität heraus. Gründe konnten in den vielen manuellen Buchungspunkten und den dadurch verursachten Ungenauigkeiten in der Entstehung eines virtuellen Abbildes identifiziert werden. Die Toleranz des Planungsalgorithmus für die Handhabung dieser Unschärfen ist anspruchsvoll und in stetiger Entwicklung. Zudem ist die Integration in operative Prozesse mit hohem Migrationsaufwand eingebettet. Die notwendige Systemreife sowie der hohe Testaufwand sollte eingeplant werden. Für einen gelingenden Migrationsprozess ist weiterhin die Integration der Mitarbeiter von Bedeutung. Hier gilt es Vertrauen in die Funktionsfähigkeit des neuen Systems nachhaltig aufzubauen.

4.2.4.3 Anforderungen

Die Anforderungen an Logistiksysteme einer Smart Factory liegen in der informatischen Grundlagenlegung, um Prozesse und Abläufe virtuell zu erfassen und den Men-

schen als Entscheider in den Mittelpunkt der Smart Factory zu rücken. Mit der Reduzierung von Medienbrüchen (viele Informationen werden auf Papier weiter gegeben) sollen informationstechnische Defizite gelöst und die Entscheidungsqualität gesteigert werden. Die Transparenz über logistische Prozesse soll mittels Datennutzung die Assistenz für eine optimierte Planung und Steuerung ermöglichen. Ausgangspunkt bildet die Virtualisierung, um Entscheidungsgrundlagen für den Menschen in einer komplexer werdenden Welt zu schaffen. Die Informationen können zudem genutzt werden, um logistische Prozesse flexibel zu planen, wie im beschriebenen Anwendungsfall des Milkrun, der mit ganzheitlicher digitaler Erfassung die Anzahl der Fahrten mit neuen Planungsalgorithmen perspektivisch reduziert.

4.2.4.4 System- und Netzwerkebene

Logistikziele sind die Verbesserung von Auslastungen, Ressourceneinsatz, Wegstrecken sowie die Flexibilisierung des Systems. Zusätzlich werden die Erhöhung des wertschöpfenden Anteils und die Einflussnahme virtueller Prozesse auf weitere nachgelagerte analoge Prozesse angestrebt. Die Virtualisierung organisatorischer Prozesse für die Produktionsplanung und -steuerung hat das Ziel, Material- und Informationsflüsse zu synchronisieren. Ergebnis ist die Schließung von Medienbrüchen in der Planungssystemlandschaft zwischen Metaplantafeln mit Steckkarten und der vorhandenen Planungs-Software. Damit wurde ein beschleunigter Zugriff auf auftrags-, maschinen- und linien-spezifische Feinplanungsinformationen möglich.

Die Unterstützung der Planung, Steuerung und Kontrolle kann durch Transparenz von Material- und Informationsfluss in beschleunigten Zeitintervallen durchgeführt werden. Zusätzlich nehmen eine geeignete Teamzusammensetzung, das Involvieren der Prozesseigner sowie die Unterstützung durch die IT positiven Einfluss. Durch die Vernetzung von digitaler Plantafel, Planungs-Software und mobiler Geräte der Werker wurde die vollständige Erfassung der Aufträge ermöglicht sowie eine identische Informations- und somit Entscheidungsgrundlage geschaffen. Daraus folgten verkürzte Durchlaufzeiten, eine verbesserte Arbeitsplanung und -einteilung sowie Materialdisposition. Bisherige berechnete Optimierungen lieferten Einsparpotenziale hinsichtlich Transportzyklen und Wegstrecken in Höhe von 30–50%. Störungs- und Schwachstellenanalysen können dem Logistikmanagement schneller zur Verfügung stehen, dokumentiert werden und an die jeweiligen Verantwortlichen übergeben werden. Diese digitale Infrastruktur dient neben dem Milkrun weiteren Abteilungen.

Die datentechnische Anbindung von Kanten und Knoten ist bisher auf Transportfahrzeuge und interne Anliefer- und Ablieferflächen an den Anlagen begrenzt. Nächste Aktivitäten sind in der Instandhaltung, dem Werkzeugmanagement sowie in der Einbindung der Extralogistik für die Erfassung der Anlieferzeiten von externen Fahrzeugen angedacht. Die Transportfahrzeuge der Milkruns selbst besitzen keine dezentralen Ziele. Ziele werden nach wie vor zentral festgelegt und durch den Logistiker bestätigt bzw.

abgelehnt. Die Ladungsträger bei Unternehmen C sind keine informationstechnische Einheit, die informationstechnische Einheit ist der Auftrag (kann ein oder mehr Ladungsträger beinhalten). Die Wechselwirkungen durch die diversen Buchungspunkte üben einen hohen Einfluss auf die Produktionsplanung aus, da die einzelnen auf die Maschinen verplanten Aufträge Transporte entstehen lassen. Die Integration des Netzwerkes über eine „digitale Plantafel“ bildet die Basis an digitaler Infrastruktur.³⁵⁶ Da unterschiedliche Objekte wie Werkzeuge und RHB transportiert werden, konnten positive Effekte auf andere Bereiche durch sukzessive Digitalisierung übertragen werden.

4.2.4.5 Technologieebene

Aktuell werden 2D-Barcodes, Tablets und Handscanner eingesetzt, um die Identifikation von Aufträgen und Stellflächen zu realisieren. Vor dem Anwendungsfall wurde die notwendige Granularität der Transparenz analysiert. In diesem Zusammenhang wurden andere Lösungen wie RFID betrachtet, im Rahmen der Kosten-Nutzen-Betrachtung aber verworfen. Ein höherer Level an dezentraler Intelligenz durch I4.0-Eigenschaften wird für den aktuell notwendigen Umsetzungsstand als informationstechnisch nicht erforderlich betrachtet.

4.2.4.6 Zusammenfassung

Der Anwendungsfall von Unternehmen C zeichnet sich durch die zweistufige Lösung der Virtualisierung von Planungstafeln sowie der Nutzung dieser zur operativen Steuerung aus. Die virtuelle Planungs- und Steuerungstafel zur Planung und Steuerung des Milkrun im operativen Bereich konnte durch den Aufbau einer digitalen Buchungsinfrastruktur realisiert werden. Mittels Barcode-Ausstattung von u. a. An- und Ablieferungsflächen konnte die Virtualisierung der Fabrik und die Schließung von Medienbrüchen forciert werden. Beide Lösungen zusammen senken den Planungs- und Steuerungsaufwand sowie perspektivisch Transportzyklen und Wegstrecken.

4.2.5 Beschreibung Unternehmen D

Unternehmen D bietet als Anwender und Ausrüster von pneumatischen und elektromechanischen Antrieben sowie Motoren, Controller, Steuerungstechnik, Sensoren und Bildverarbeitungssystemen ein breites Portfolio. Mit einem € Mrd. Umsatz und 17.800 Mitarbeitern besitzt das Unternehmen zusätzlich einen eigenen Geschäftsbereich für die industrielle Aus- und Weiterbildung. Im Rahmen von I4.0 unterstreichen Veröffentlichungen, Messeauftritte und Forschungsprojekte die Aktivitäten. Als Mitglied der Plattform I4.0 wird sich insbesondere in der Erstellung von Referenzarchitekturen engagiert. Der vorgestellte Anwendungsfall nimmt als kürzlich fertig gestellte „Grüne-Wiese-Fabrik“ eine Sonderrolle für die digitale Produktion und Logistik ein.

³⁵⁶ Interpretiert kann diese als Integrationsplattform.

4.2.5.1 Motivation, Potenziale und Herausforderungen

Projekte im Virtualisierungsumfeld existieren in Unternehmen D seit Jahrzehnten. Aktivitäten zu I4.0 begannen im Jahre 2011 auf der Hannover Messe und wurden durch den Vorstand initiiert und motiviert. 2013 wurde die Produktentwicklung getrieben aus der Produktsicht im I4.0-Kontext konkretisiert. In 2015 wurde begonnen, unternehmensübergreifende (Virtualisierungs-) Aktivitäten weltweit und interdisziplinär unter einem gemeinsamen Dach zu bündeln. Das Potenzial von I4.0 wird in der Differenzierung durch die Exploration neuer Geschäftsfelder gesehen sowie als Werkzeug zur klassischen Zielgrößenreichung bzgl. Kosten, Qualität und Zeit betrachtet.

I4.0 stellt für das Unternehmen einen ganzheitlichen Ansatz aus Technologie, Mensch und Bildung dar. Technologisch werden intelligente Komponenten, Modularität, vernetzte Gesamtsysteme sowie Integrations- und Miniaturisierungslösungen fokussiert. Der Bereich Mensch ist insbesondere durch die Mensch-Maschine-Interaktion, adaptive und intelligente Technik, eine einfache und intuitive Bedienung sowie die Anpassung an sich wandelnde Arbeitswelten gekennzeichnet. Bildung adressiert die Ausbildung, die Qualifizierung der Mitarbeiter sowie die Nutzung von Lernfabriken. Die Lehrinhalte beziehen alle Bereiche des Unternehmens sowie neueste technologische Entwicklungen bzgl. Netzwerkkommunikation, Energie Management, Zustandsüberwachung oder Prozessoptimierung mit ein.

Die Herausforderungen für I4.0 werden in der ganzheitlichen Systembetrachtung sowie einem notwendigen Grad an Standardisierung durch Lean Management und Transparenz gesehen. Erfolgreiche Projekte sollten schrittweise erfolgen und nicht zu sehr parallelisiert werden. Neben der Verbindlichkeit der Führungskräfte ist es notwendig, die übrigen Mitarbeiter einzubinden. Treiber zum vorigen System ist der Produktivitätszuwachs durch eine durchgängige Prozesssicht eines übergreifenden, ganzheitlichen Planungsteams für die gesamte Fabrik. Lean Management sowie eine sich flexibel anpassende Logistik gilt als Basis. Hemmnisse liegen im Datenaustausch, insbesondere über Unternehmensgrenzen hinweg. Cloud-Infrastrukturen und -Dienste werden als wichtig erachtet, viele Sicherheitsfragen sind aber noch ungeklärt. Als letztes Hemmnis wurde die Wirtschaftlichkeit genannt, da die Ableitung tragender Geschäftsmodelle im Entstehen ist und einzelne Projekte keine direkte Rendite liefern.

4.2.5.2 Anwendungsbeispiel und Logistikprozesse

Die Logistikprozesse transportieren, umschlagen, kommissionieren, lagern und disponieren sind von der Anlieferung bis zur Arbeitsstation voll automatisiert. Definierte Kanban-Behälter werden vom Lieferanten mit einer definierten Ware und in einer definierten Menge angeliefert, so wie es in der Montage benötigt wird. In diesem Status werden die Kanban-Behälter ohne weiteren Bearbeitungsaufwand in das Hochregallager eingelagert. Sobald die Fertigung einen Abruf tätigt, wird die definierte Losgröße voll-

automatisch kommissioniert, in sogenannte „Racks“ einsortiert und zu definierten Montagehaltstellen transportiert. Der erste manuelle Prozess beginnt erst mit dem Montagemitarbeiter. Die hochautomatisierte durchgehende Lagerung, Kommissionierung und Ablieferung unterschiedlicher Behältertypen konnte nach Aussage des Unternehmens durch eine flexible, dezentrale und echtzeitfähige „Logistik 4.0“ realisiert werden. Ziel der Logistikplanung war eine technische und organisatorische Logistikköslung zur flexiblen Produktionsversorgung als langfristige Lösung. Realisiert wird dies durch einen hohen Automatisierungsgrad mit flexibler Materialflussversorgung, der z. B. Volumenschwankungen ausgleichen kann. Ein Beispiel ist die Anwendung unterschiedlicher Logistikstrategien (make-to-order oder -stock) in unterschiedlichen Bereichen der Fabrik für unterschiedliche Volumina und Versorgungszeiten (z. B. durch automatische Anpassung der Logistikflächen).

In Anlehnung an den KAP sind Vertrieb, Beschaffung, Produktion, Distribution und After-Sales integriert. Die Lieferantenintegration ist im Beschaffungsprozess wie oben beschrieben durchgehend standardisiert. Die Kundenintegration ist via Vertrieb und After-Sales im KAP realisiert. Die B2C-Lösung³⁵⁷ wurde für Kunden entwickelt, die via Web-Shop Produkte mittels eines Konfigurators individualisieren und Ad hoc-Bestellungen in verhältnismäßig kleinen Mengen tätigen können. Für B2B-Kunden³⁵⁸ sind die Abläufe standardisiert und automatisiert, in dem die externen Aufträge mit den internen vernetzt sind. Kein Vertrieb oder Konfigurator ist aktiv.

4.2.5.3 Anforderungen

Die Anforderungen beziehen sich vordergründig auf die technischen Anlagen, wie z. B. das Verhältnis von manuellen zu automatisierten Prozessschritten, eine dynamische Kapazitätsauslastung oder Liefervorschriften. Die Logistik ist nicht gestalterisch tätig, d. h. die gesamte Organisation ist nach Wertströmen ausgerichtet, die Logistik hat allein die Funktion der Auftragsabarbeitung. Die neu erstellte Smart Factory soll flexibel, wandlungsfähig und agil sein, d. h. sich auf organisatorisch und technologisch unterschiedlichen Ebenen an Kundenbedürfnisse anpassen können. Diese Anpassungsfähigkeit soll die ansteigende interne und externe Komplexität beherrschbar machen.

4.2.5.4 System- und Netzwerkebene

Für das Logistikmanagement ist die Komplexitätsbeherrschung das wichtigste Ziel in der industriellen Logistik in I4.0. Hauptkriterien sind die Termintreue (innerhalb von zwei Stunden) bzgl. interner Kunden sowie eine schnelle Reaktionszeit für Aufträge. Das Logistiksystem ist in der Lage, sich schnell an sich verändernde Kundenbedürfnisse anzupassen. Realisiert wurde dies u. a. durch die Behälter der Beschaffungslogistik, die ihr transportiertes Produkt, die Menge, den dazugehörigen Lieferant, den Qualitäts- und

³⁵⁷ B2C (Business to Consumer): Privatkundengeschäft.

³⁵⁸ B2B (Business to Business): Industrielle Großkunden.

Bearbeitungsstatus kennen. Diese Informationen können in Echtzeit abgerufen und visualisiert werden. Die Mitarbeiter sind mit Smart Phones ausgestattet, mit denen Informationen für ein Störungsmanagement genutzt werden oder mittels integrierter Produktabbildungen aktuelle Arbeitsanweisungen mit Fotos etc. über ein bestimmtes Werkstück eingesehen werden. Motoren von Anlagen werden auslastungsgetrieben gesteuert. Sobald die Auslastung geringer wird, fährt der Motor mit geringerer Drehzahl, um Energie zu sparen.

Das Hochregallager mit seiner vollautomatischen Kommissionierung und Anlieferung konnte bereits realisiert werden. Die Behälter kennen ihr Ziel und werden an definierten Punkten gesteuert. Aktuell wird der Mensch zunehmend adressiert. In Kombination mit sogenannten „Wearables“ (hier Handschuh) sollen die Logistikmitarbeiter bei den Routenzügen, der Kommissionierung sowie der Einlagerungsstation unterstützt werden. Bei Routenzügen werden Informationen und Aufträge direkt an den Handschuh zur Einsicht gesendet. Zusätzlich ist in dem Handschuh ein Barcode-Scanner integriert. Der Logistikmitarbeiter hat durch den Handschuh die Hände für Entnahme, Transport und Kommissionieren frei. Die Lösungen sollen ergonomischer und effizienter sein als die bisherigen Lösungen.

4.2.5.5 Technologieebene

Smart Glasses u. a. befinden sich aktuell in der Testphase, die Vorteile sind aktuell nicht klar erkennbar und aufgrund des relativ hohen Automatisierungsgrades im Unternehmen eventuell nicht nötig. Die Einarbeitungszeit durch Smart Glasses hat sich bei dem Pilottest als sehr hoch erwiesen, daher werden akustische Anweisungen präferiert. Für die Datenerfassung werden 2D-Barcode-Scanner-Label präferiert. RFID-Lösungen haben sich aufgrund der benötigten Lesegeschwindigkeiten von Behältern in Höhe von 2 m/s als nicht relevant erwiesen.

4.2.5.6 Zusammenfassung

Unternehmen D liefert eine Reihe ausgereifter Anwendungsfälle. Im Vergleich zu den anderen Fallstudien liegt dies im „Grüne Wiese“-Charakter des Werkes begründet. Das logistische Anwendungsbeispiel hat die vollautomatische Einlagerung, Kommissionierung und Auslagerung von Wareneingang bis zur Montage zum Gegenstand. Die Besonderheit liegt in der Integration vieler Netzwerkelemente. Ein adaptives Logistiksystem, ein automatisiertes Hochregallager, ein intelligentes Energiemanagement von Maschinen, die Integration der Werker über Eskalationsprozesse sowie die unterschiedlichen Möglichkeiten der Kundenintegration im Auftragsabwicklungsprozess betonen den Systemansatz.

4.2.6 Fallstudienübergreifende Zusammenfassung und Auswertung

Die fallstudienübergreifende Auswertung thematisiert die Ergebnisgegenüberstellung der Fallstudien anhand des „*Warum*“ und „*Wie*“. Anforderungen und Eigenschaften werden in Kombination mit der Gruppenbefragung in Abschnitt 4.3 abschließend ausgewertet. Der Schwerpunkt der Anwendungsbeispiele liegt auf der innerbetrieblichen Materialversorgung in Beschaffung und Produktion.

4.2.6.1 Motivation, Potenziale und Herausforderungen

Die ausgewählten Unternehmen sind seit geraumer Zeit im Umfeld der Digitalisierung aktiv. Dieser evolutionäre Prozess hat durch politische Initiativen und Projekte seit 2012 eine Beschleunigung erfahren. Die strategischen Ebenen initiieren zunehmend Projekttaktivitäten im Umfeld von IKT, IDT und AT und bündeln diese unter einem systemischen I4.0-Ansatz. **Potenziale** auf der strategischen Ebene sind u. a. die Steigerung der Effizienz (Kosten, Qualität und Zeit) und Transparenz, die wirtschaftliche Realisierung kundenindividueller Produkte sowie die Beherrschung der Varianten-, Prozess- und Informationskomplexität. Motiviert ist dieser Prozess aus Problemstellungen des operativen Tagesgeschäfts mit klassischen Zielgrößen, wie die Reduzierung von Beständen, Durchlaufzeiten, Leerfahrten und Buchungsaufwänden sowie die Erhöhung von Auslastungen. Betont werden ebenfalls die Senkung nicht-wertschöpfender Tätigkeiten, die Entlastung der Mitarbeiter von Routinetätigkeiten sowie die Beschleunigung und Verbesserung der Entscheidungsqualität. Die Zielerreichung strategischer und operativer Ebenen wird durch neue Instrumente innerhalb von I4.0 unterstützt. Dies stimmt mit den Erkenntnissen der Literatur überein.

Herausforderungen sind eine Motivation, sich mit I4.0 auseinander zu setzen. Zusätzlich zu den in Kapitel 2 thematisierten Herausforderungen konnten im konkreten Einsatz unternehmensübergreifend z. B. die Stammdaten- und Infrastrukturqualität als Herausforderung festgestellt werden. Neben der zunehmenden Variantenvielfalt sind die Formulierung einer Digitalstrategie, die Komplexitätsbeherrschung, die Integration von Führungskräften und operativem Personal, ein ganzheitliches, bereichsübergreifendes Systemverständnis sowie standardisierte Prozesse als wesentliche Voraussetzungen für einen erfolgreichen I4.0-Einsatz thematisiert worden. Zusätzlich wurde aus Sicht der Projektinitiation auf ein Muss der anwendungsgetriebenen Motivation hingewiesen. Projekte aus Vermarktungsgründen mit überzogener Erwartungshaltung gilt es zu vermeiden.

4.2.6.2 System- und Netzwerkebene

Abbildung 25 zeigt eine Übersicht realisierter Potenziale sowie die relevantesten Herausforderungen, mit denen die Unternehmen konfrontiert sind.

Realisierte Potenziale		
Strategisch	Taktisch	Operativ
<ul style="list-style-type: none"> * Steigerung der Produktivität (Kosten, Qualität und Zeit) * Steigerung Transparenz * Beherrschung der Varianten-, Prozess- und Informationskomplexität 	<ul style="list-style-type: none"> * Reduzierung Medienbrüche * Virtualisierung Prozessabläufe * Vernetzung Objekte und Subjekte * Mitarbeiterintegration * Prozessstandardisierung * Ganzheitliche, übergreifende Optimierung und Schwachstellenanalyse 	<ul style="list-style-type: none"> * Reduzierung von Beständen, Durchlaufzeiten, Leerfahrten und Buchungsaufwänden * Erhöhung der Auslastung von Ladungsträgern, Betriebsmittel- und Personalkapazitäten * Mitarbeiterentlastung von Routinetätigkeiten * Beschleunigung/Verbesserung Entscheidungsqualität
Herausforderungen		
<ul style="list-style-type: none"> * Zunehmende Variantenvielfalt und Kundenindividualisierung/-integration * Zielkonflikte und bereichsübergreifendes Prozess-, IT- und Gesamtsystemverständnis * Nicht synchrone, isolierte Planung, Steuerung und Kontrolle aufgrund fehlender digitaler Durchgängigkeit * Abweichung geplanter und realer (Daten-) Welt durch Medienbrüche und unterschiedliche Anforderungen * Verbindlichkeit von Führungskräften zur Zieleinhaltung und Systemdenken sowie Mitarbeiterintegration * Anwendunggetriebene Projektmotivation * Standardisierte Stammdaten-, Infrastruktur- und Prozessqualität 		

Abbildung 25: Fallstudienresultate: Potenziale und Herausforderungen³⁵⁹

Die bisher **realisierten Potenziale** konnten insbesondere bei **operativen Kennzahlen** in allen vier Fallstudien festgestellt werden. Positive Effekte bestehen in der Reduzierung von Durchlaufzeiten, Beständen, Rüst- und Transportaufwänden sowie der Erhöhung der Auslastung von Ladungsträgern, Betriebsmittel- und Personalkapazitäten. Des Weiteren äußerten sich Effekte in einem beschleunigten Störungsmanagement, der Senkung nicht-wertschöpfender Tätigkeiten sowie einer beschleunigten/verbesserten Entscheidungsqualität. In den Fallstudien konnten neue „Projektinstrumente“ identifiziert werden, die in der Logistik förderlich sind. So wurden neue Optimierungsziele, wie die Reduzierung von Medienbrüchen, die Virtualisierung aller Prozessabläufe, die Vernetzung von Objekten und Subjekten oder die (technische) Mitarbeiterintegration genutzt, um die klassischen Zielgrößen, die Prozessstandardisierung sowie die ganzheitliche, übergreifende Optimierung positiv zu beeinflussen. Auf der **strategischen Ebene** konnte die Produktivität, Transparenz sowie die Komplexitätsbeherrschung verbessert werden. Dies bezieht sich vor allem auf die Prozess- und Informationskomplexität.

Die Stammdaten- und Infrastrukturqualität stellt bei allen Fallstudien die größte technische **Herausforderung** dar. Die Prozessqualität wird insbesondere durch standardisierte Prozesse mittels Lean Management ermöglicht, schwankt aber im Umsetzungsgrad. Alle drei stellen eine wichtige Voraussetzung für Transparenz und die anschließende Virtualisierung dar. Diese bildet die Basis für die Reduzierung der Medienbrüche, um einer nicht-synchronen, isolierten Planung, Steuerung und Kontrolle aufgrund fehlender digitaler Durchgängigkeit und der Abweichung zwischen geplanter und realer Welt entgegenzuwirken. Für den Aufbau eines bereichsübergreifenden Gesamtsystemverständnisses ist die frühzeitige nicht-/technische Integration der Mitarbeiter anspruchsvoll. Dies bezieht sich auf Führungskräfte und auf das operative Personal. Während das Systemdenken die Einschränkung der Freiheitsgrade des Menschen nötig macht, dringen

³⁵⁹ Eigene Darstellung.

intelligente Objekte (vornehmlich durch Selbststeuerung und Ad hoc-Planung) in deren Arbeitsumfeld ein. Dies erzeugt für die Belegschaft einen Anpassungsdruck.

Aufgrund des Charakters der Anwendungsbeispiele (Milkrun) sind Transportfahrzeuge die am häufigsten eingesetzten „intelligenten“ Objekte im **innerbetrieblichen Logistiknetzwerk** im I4.0-Kontext. Betriebsmittel und assistierte Entscheider sind am zweithäufigsten integriert, gefolgt von Ladungsträgern und Lägern, die in der Literatur bisher kaum thematisiert wurden. Assistierte Entscheider besitzen in allen Fallstudien eine übergeordnete Rolle, sind in Unternehmen D aufgrund des betrachteten Anwendungsbeispiels jedoch weniger relevant. Bei allen Fallstudien werden zur zentralen Vernetzung Objekte und Subjekte über Integrationsplattformen bzw. Assistenzsysteme integriert. Die Integrationsplattformen besitzen unterschiedliche Lösungen. Neben internen und externen Akteuren werden Lieferanten in das Netzwerk mit einbezogen. Die Kundenintegration findet nach I4.0-Gesichtspunkten, d. h. durch intelligente Produkte oder die Vernetzung mit Elementen innerbetrieblicher Abläufe bis dato nicht statt bzw. ist auf einige Kunden in Sonderlösungen begrenzt. Die Integration wird durch Online-Portale sowie Konfigurationssysteme realisiert.

Eingebundene logistische Aufgaben konnten insbesondere im Bereich der Steuerung und Kontrolle identifiziert werden. Dies beruht im Wesentlichen auf der Realisierung technischer Regelkreise durch das Vorhandensein von Sensoren und Aktoren in Anlagen sowie über IDT auf Bereitstellungsflächen. Die in Kapitel 2 eingeführte Steuerung konnte in Form der Auftragsveranlassung (insbesondere Fertigungsauftragsfreigabe und Verfügbarkeitsrechnung) und der Mengen- und Terminüberwachung identifiziert werden. Der fließende Übergang zum Kontrollprozess konnte in den Fallstudien mit den Teilprozessen Überwachen, Melden, Simulieren und Messen aufgenommen werden. Auf der Planungsseite konnten Einflüsse auf verbrauchs- und bedarfsorientierte Verfahren in der Programm- und Mengenplanung festgestellt werden. Die Kapazitäten von Routenzügen und Lägern wurden involviert.

Somit weisen I4.0-Lösungen für die Erreichung logistischer Ziele in den vier Fallstudien einen positiven Effekt auf. Die Unternehmen betonten, dass auf Grund der Neuartigkeit der Projekte keine abschließenden Aussagen über die Vor- und Nachteile getätigt werden können, der Trend aber positiv ausfalle.

4.2.6.3 Technologieebene

Der assistierte Entscheider nimmt eine zentrale Rolle in den Fallstudien ein: Routineaufgaben werden durch Planalgorithmen erledigt, andere Tätigkeiten werden dem Personal in Form von Entscheidungsgrundlagen via Assistenzsystemen zur Verfügung gestellt. Das Mobile Computing als Assistenzsystem kommt mittels Tablets und Smart Phones am häufigsten zum Einsatz bzw. befindet sich in der Pilotierung. Zusätzlich werden fallweise das Predictive Computing sowie die Objekt- und Mustererkennung

angewendet. Die Entscheidungsgrundlagen werden durch statistische Verfahren und Data Analytics-Anwendungen von allen Unternehmen angewendet bzw. befinden sich in der Pilotierung. Die Ergebnisse werden auf die Ausgabegeräte des Mobile Computing oder zusätzlich wie in Fallstudie A auf dem Maschinenterminal ausgegeben. In Fallstudie A und C nimmt der assistierte Entscheider bzw. das Logistikpersonal eine weitere wichtige Rolle für manuelle Ein- und Ausbuchungsvorgänge zur Schließung von Medienbrüchen ein. Dadurch kann das Personal zum Engpass in den Abläufen werden. Fallstudien B und D präferieren daher Auto-ID-Lösungen bzw. vollautomatisierte Prozesse. Dies führt bei Unternehmen B z. B. zu einer Ad hoc-Planung und zur Auflösung von Planungsprozessen. Fallstudie C nimmt manuelle Buchungsvorgänge an Anliefer- und Abholflächen vor und Fallstudie A an den Maschinen. Abbildung 26 zeigt eine Übersicht des Technologieeinsatzes.

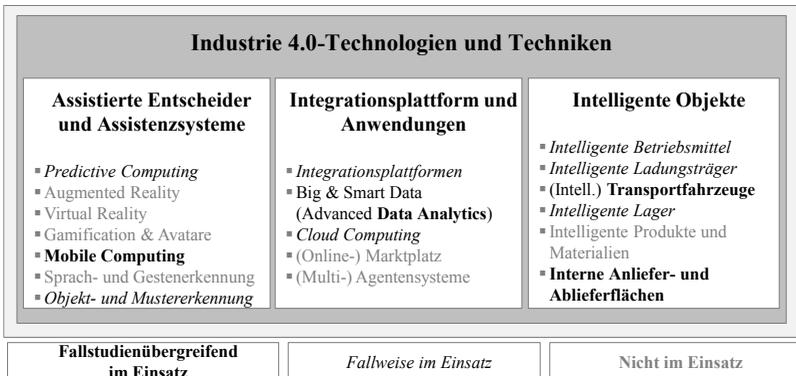


Abbildung 26: Fallstudienenergebnisse: I4.0-Technologien und Techniken³⁶⁰

4.2.6.4 Logistikprozesse

In den Fallstudien starteten Digitalisierungsaktivitäten in der Produktionslogistik. Dieser Bereich dehnte sich auf die Schnittstellenprozesse zur Beschaffung sowie zur Distribution aus. Die skizzierten Anwendungsbeispiele konzentrieren sich auf die innerbetriebliche Materialversorgung in Beschaffung und Produktion. Logistisch abgebildete Kernprozesse sind vordergründig das Transportieren, Umschlagen, Disponieren und die Lagerung gefolgt von der Kommissionierung. Aktuell sind die Unternehmen mit der Virtualisierung ihrer Prozesse konfrontiert. Dazu bedienen sie sich unterschiedlichster Lösungen, die sich insbesondere im Integrationsgrad statischer oder dynamischer Objekte, der Ort der Buchung, der gewählten IDT sowie dem generierten Verhältnis manueller und (voll-) automatisierter Buchungsvorgänge unterscheiden. Der Virtualisierung geht bei den Unternehmen die Prozesstandardisierung mittels Lean Management voran. Resultat der Standardisierung ist Prozesstransparenz, -sicherheit und -beherrschung,

³⁶⁰ Eigene Darstellung.

um mittels generierter Vorhersagbarkeit Objekte und Subjekte in das Logistiknetzwerk integrieren zu können. Während Unternehmen A mittels „*Intranet der Dinge*“ ein bereichsübergreifendes internes Kunden (Maschine)-Lieferanten Netzwerk aufgebaut hat und über Terminals an den Anlagen Planungs- und Steuerungsaufgaben vom Personal lösen lässt, werden in Unternehmen B und D vollautomatisierte Planungs- und Steuerungsprozesse ohne Zutun des Menschen durchgeführt. Unternehmen B und D haben zudem die externen Lieferanten integriert, um die Materialversorgung in der Beschaffung ad hoc realisieren zu können. Die zweigeteilte Lösung von Unternehmen C legt den Fokus auf eine digitale Plantafel, die als Integrationsplattform wirkt, um „zeitnah“ reagieren zu können. Die manuellen Buchungsvorgänge sind für die Transportplanung ausreichend, verhindern allerdings die Echtzeitfähigkeit sowie die Kenntnis über den tatsächlichen Ort der Produkte oder Transportfahrzeuge.

Individualisierte Ziele für Objekte liegen für Steuerungsaufgaben in Form von Soll-Ist-Abgleichen vor. Dies sind z. B. definierte Zielorte oder -zeiten. Wie in Kapitel 2 als Logistiktrend beschrieben, entstehen dadurch Zielkonflikte. Einerseits Konflikte mit anderen Objekten wie der Auslastung der Transportfahrzeuge und andererseits Konflikte im Objekt selbst (Monatsmiete Behälter vs. Reinigungsprozesse). Ebenfalls entstehen Zielkonflikte beim Personal und der damit verbundenen „Einschränkung der Freiheitsgrade“, um Systemziele nicht zu gefährden. Die Auflösung von Bereichszielen bzw. Überbrückung der taktischen Eben wird daher von Unternehmen A und B anvisiert.

4.3 Zusammenführung empirische Analyse

Der Vergleich theoretischer Erkenntnisse aus Kapitel 3 mit jenen aus Kapitel 4 zeigt, dass die Praxis mit der Umsetzung von I4.0-Lösungen in der Logistik erst begonnen hat. Erste Inhalte sind adressiert, liegen jedoch fragmentiert, ohne direkten Logistikbezug und in keinem zusammenfassenden Ansatz vor. Die Forschungsleistung dieser Arbeit liegt daher in der Gestaltung des cyber-physischen Logistiksystems zur Bündelung von Theorie und Praxis in einem Ansatz. In Abschnitt 4.3 werden auf Grundlage der systematischen Literaturanalyse sowie der empirischen Analyse zunächst Anforderungen und Eigenschaften aus der Perspektive des Logistikmanagement abgeglichen, priorisiert, selektiert und definiert. Diese Inhalte gehen in Kapitel 5 als Merkmale in die Gestaltung des CPLS einer Smart Factory ein.

4.3.1 Anforderungen aus der Logistikperspektive

Abbildung 27 zeigt die Zusammenführung der identifizierten Anforderungen.

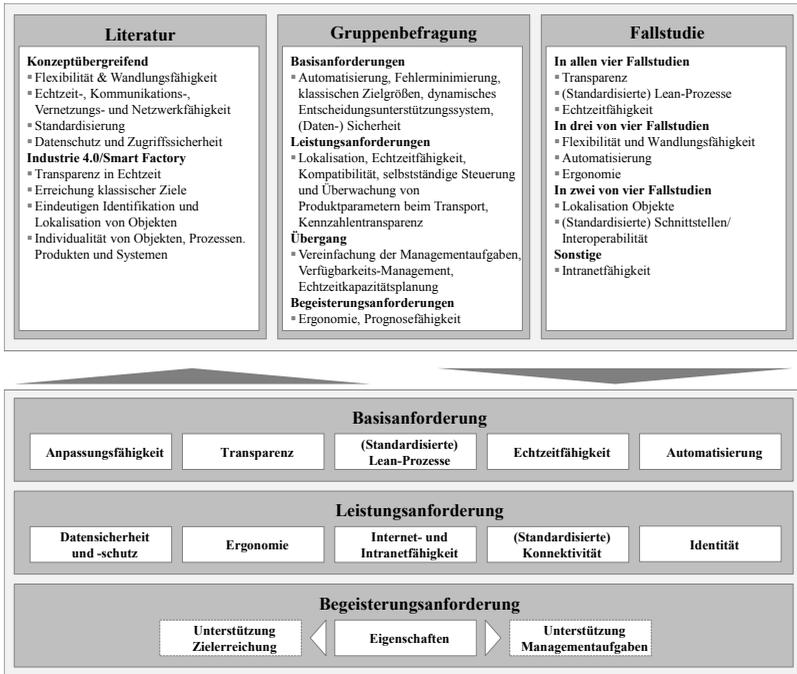


Abbildung 27: Zusammenführung Anforderungsanalyse³⁶¹

Für das weitere Vorgehen wurden die identifizierten Anforderungen auf zehn verdichtet und in Basis-, Leistungs- und Begeisterungsanforderungen eingeteilt. Die Einteilung resultiert aus den Erkenntnissen der Wissenschaft (konzeptübergreifend und I4.0-/Smart Factory-spezifisch) und Praxis (Priorisierung Gruppenbefragung sowie Nennung in den Fallstudien). Zu den Basisanforderungen im logistischen I4.0-Kontext gehören Anpassungsfähigkeit, Transparenz (der Informationsbereitstellung), (standardisierte) Lean-Prozesse, Echtzeitfähigkeit sowie die Automatisierung. Als Leistungsanforderungen konnten Datensicherheit und -schutz, Ergonomie, Inter- und Intranetfähigkeit, (standardisierte) Konnektivität sowie die Identität erarbeitet werden. Die Unterstützung von Zielerreichung und Managementaufgaben werden als Begeisterungsanforderungen interpretiert, da diese per Definition dem Kunden i. d. R. nicht bekannt sind und somit Potenzial zur Erhöhung der Kundenzufriedenheit besitzen. Diese werden unter die neuen Eigenschaften der I4.0 in der Logistik subsumiert. Die zehn Anforderungen werden im Folgenden einzeln beschrieben.

³⁶¹ Eigene Darstellung.

4.3.1.1 Anpassungsfähigkeit

Die Anpassungsfähigkeit gilt als „*Kernanforderung an Logistiksysteme*“, um logistische Aufgaben trotz Schwankungen in der Auftragslage mit kurzen Reaktionszeiten zu erfüllen.³⁶² Die Anpassungsfähigkeit setzt sich in dieser Arbeit aus der Flexibilität und der Wandlungsfähigkeit von Systemen zusammen. Die Flexibilität ist die Fähigkeit eines Produktions- oder Logistiksystems, sich unter Kosten-, Qualitäts- und Zeitrestriktionen an sich verändernde Systemanforderungen anzupassen. Entstehende Kosten werden bereits bei der Systemplanung berücksichtigt. Die Wandlungsfähigkeit bezieht sich auf die Anpassung von Prozessen, Ressourcen und Strukturen an sich verändernde Kundenanforderungen, z.B. an die Auftragslage, aufgrund von externen Störungen. Etwaige Kosten sind nicht in der Systemplanung inkludiert, sondern entstehen erst im Moment der Systemwandlung.³⁶³ Die Anpassungsfähigkeit nimmt somit Bezug auf den Anpassungsprozess bzgl. Adaptivität und Reaktivität, in dem für in Szenarien „eingepreiste“ Routineentscheidungen (Flexibilität) im System abgebildet sind und Nicht-Routineentscheidungen (Wandlungsfähigkeit) ausgehandelt bzw. fallweise entschieden werden müssen.

4.3.1.2 Transparenz (der Informationsbereitstellung)

Die Transparenz der Informationsbereitstellung wird literatur- und empiriebasiert gefordert. Gewährleistet werden soll die Transparenz über Material- und Informationsflüsse über das gesamte Wertschöpfungsnetzwerk durch die ubiquitäre Datenverfügbarkeit sowie die Virtualisierung von Fabriken. Dies wird in I4.0 durch die Reduzierung der Medienbrüche in der Smart Factory erreicht. Damit lassen sich die klassischen Optimierungsziele und -bereiche wie die Erhöhung der Produktivität in der gesamten Prozesskette weiter vorantreiben. Die zentrale Planung und Steuerung von Systemen, Prozessen und Netzwerken soll abgelöst werden und dezentrale, (teil-) autonome Entscheidungen ermöglichen.³⁶⁴ Der assistierte Entscheider kann in Echtzeit bereitgestellte Informationen zur Entscheidungsunterstützung nutzen. Visualisierte Prognoseverfahren mittels Predictive Computing unterstützen dabei, Entscheidungen bereits im Vorfeld zu bewerten. Assistenzsysteme steigern somit die Informationstransparenz und reduzieren die Prozess- und Informationskomplexität für den Anwender.

4.3.1.3 (Standardisierte) Lean-Prozesse

In einer Vielzahl von Gesprächen und Vorträgen wurde die Prozessstandardisierung nach Lean-Prinzipien als Voraussetzung bzw. Anforderung für I4.0 betont.³⁶⁵ Einige

³⁶² Vgl. Günthner et al. (2014), S. 309 f.

³⁶³ Vgl. Lüder (2014), S. 493 f.

³⁶⁴ Vgl. ten Hompel und Henke (2014), S. 622 f.

³⁶⁵ U. a. während der Hannover Messe 2014 und 2015, auf Kongressen wie dem Deutschen Logistikkongress 2015 sowie dem Deutschen Wirtschaftsingenieurstag 2015.

Autoren sehen I4.0 als Erweiterung des Lean Management an, um insbesondere der zunehmenden Prozesskomplexität sowie der abnehmenden Prozessrobustheit zu begegnen.³⁶⁶ Auf Grundlage der fünf Lean-Prinzipien Kundenorientierung, Wertstrom, Flussprinzip, Pull-Prinzip sowie dem Streben nach Perfektion wird das Ziel der schlanken Produktion bzw. verschwendungsarmer, wertschöpfender Abläufe entwickelt. Grundlage sind u. a. die Standardisierung von Informations- und Materialflüssen sowie die konsequente Ausrichtung am Kundentakt. Standardisierung gewährleistet ein gleichbleibendes bzw. steigendes Qualitätsniveau (kongruent zum Ziel der AT). Konsequenz ist die Planbarkeit, Verlässlichkeit sowie Stabilität von Prozessabläufen. Dem Personal kommt in diesem Kontext eine wichtige Rolle zu, da es für die Einhaltung der Standards sowie deren kontinuierliche Verbesserung verantwortlich ist.³⁶⁷

4.3.1.4 Echtzeitfähigkeit

Nach *DIN 44300* versteht man unter **Echtzeit** „den Betrieb eines Rechensystems, bei dem Programme zur Verarbeitung anfallender Daten ständig betriebsbereit sind, derart, dass die Verarbeitungsergebnisse innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne verfügbar sind.“³⁶⁸ Echtzeit ist „Definitionssache“. Die vorgegebene Zeitspanne variiert in Produktion und Logistik von Millisekunden bis Stunden und darüber hinaus. Planungssysteme (ERP) z. B. benötigen keine Echtzeitvorgaben, da es bei einer Störung zwar zu einigen Minuten Verzögerung kommen kann, was für die Abläufe jedoch nicht mittelbar einen Stillstand bedeutet. Bei Ausfall eines Produktionsleitsystems (MES) hat dies direkt Einfluss auf die Abläufe, weswegen deren Aufgaben in Echtzeit erfolgen müssen.³⁶⁹ Umso echtzeitfähiger ein System sein soll, desto mehr Daten müssen aufgenommen und letztlich ausgewertet werden. Die Steuerungstechnik muss daher eine hohe Verfügbarkeit und Robustheit der Komponenten gewährleisten, um in angemessener Zeit reagieren zu können. Die notwendige Rechenleistung und -geschwindigkeit ist dafür Voraussetzung.³⁷⁰ Bei der Systemauslegung ist es daher erforderlich, nicht so viele Daten wie *möglich* generieren zu wollen, sondern so viele, wie für adäquate verbrauchs- oder bedarfsorientierte Entscheidungen *notig* sind.

4.3.1.5 Automatisierung

Die Automatisierung ist für I4.0 von hoher Relevanz (Kapitel 2). Die Hauptfunktion besteht im Regeln von physikalischen Größen in Richtung des angestrebten Sollwertes, in der Steuerung diskreter Zustände eines technischen Prozesses, in der Überwachung/Meldung bei Soll-Ist-Abweichungen sowie im Anzeigen von Prozesszuständen für den Menschen und seinem Eingriff durch Verstellung der Stellwerte der Aktoren. Regelung

³⁶⁶ Vgl. Hofmann (2015), S. 5 ff.

³⁶⁷ Vgl. Dennis (2007), S. 3 ff.; Womack und Jones (2003), S. 15 ff.

³⁶⁸ DIN 44300 (1985), zitiert nach Scholz (2005), S. 39

³⁶⁹ Vgl. Kropik (2009), S. 95 f.

³⁷⁰ Vgl. Nettsträter und Kuzmany (2010), S. 108 f.

und Steuerung kann unabhängig von Menschen halb oder voll automatisch erfolgen.³⁷¹ Ziel ist das Halten (in I4.0 auch das Steigern) definierter Qualitätsniveaus sowie die Entlastung des Personals von Routinetätigkeiten³⁷² infolge der zunehmenden Informations- und Prozesskomplexität. Zur Komplexitätsbeherrschung nutzen Mitarbeiter Assistenzsysteme zur Überwachung der Prozesse. Die Mitarbeiter tragen durch Buchungs- und Abwicklungsvorgänge zur Schließung von Medienbrüchen bei. Für das Schließen der Medienbrüche wird das Personal mit der manuellen Erfassung von Prozessgrößen zum Engpass im Informationsfluss. Technologisch werden z. B. Auto-ID Technologien für die Systemintegration der Produktion und Logistik verwendet.³⁷³ Für die nahtlose digitale Durchgängigkeit können sie die echtzeitfähige Abbildung des KAP sowie logistische Kernprozesse wie Transportieren und Kommissionieren automatisieren.

4.3.1.6 Datensicherheit und -schutz

Datensicherheit und -schutz stellen Barrieren im Umfeld der vierten industriellen Revolution dar. Unternehmen sind insbesondere bei der Nutzung von Cloud-Lösungen skeptisch. Aber nicht nur unter dem Gesichtspunkt von Cyber-Security oder Industriespionage sind Datensicherheit und -schutz relevant. Im Zuge der Zunahme der vernetzten Geräte und der damit einhergehenden Komplexität der Netzwerkstrukturen ist ein durchgehendes Sicherheitsniveau nicht realistisch. Abhilfe können Sicherheitsarchitekturen schaffen, die in der Lage sind, in Echtzeit Auffälligkeiten zu identifizieren und entsprechend zu reagieren. Bei Software sollen diese bei Beginn des Entwicklungsstarts im Sinne einer „Security by design“ berücksichtigt werden. Die Zunahme der Datenvolumina und die Möglichkeiten von Big oder Smart Data im industriellen und privaten Umfeld führen zu vermehrten Informationen über logistische Objekte wie über das Verhalten des Bedienpersonals, was den Schutz der Privatsphäre an Wichtigkeit zunehmen lässt.³⁷⁴

4.3.1.7 Ergonomie

Für Mitarbeiter sind nicht nur Aspekte der Privatsphäre relevant, sondern auch Anforderungen an Ergonomie und Benutzerfreundlichkeit. Datenzunahme, Prozess- und Informationskomplexität sowie die zunehmende Mensch-Maschine-Interaktion in I4.0 machen eine intuitive Bedienbarkeit ebenso wie eine leicht verständliche Visualisierung komplexer Sachverhalte als Entscheidungsgrundlage nötig. Diese Aufbereitung ist, abhängig von der jeweiligen Aufgabe sowie den individuellen Bedürfnissen der Mitarbeiter, von der operativen bis zur leitenden Funktion zu gestalten.³⁷⁵ Im operativen Bereich

³⁷¹ Vgl. Litz (2012), S. 7

³⁷² Vgl. Weller (2008), S. 22 f.

³⁷³ Vgl. Schlick et al. (2014), S. 76 ff.

³⁷⁴ Vgl. Kagermann (2014), S. 610 f.

³⁷⁵ Vgl. Vogel-Heuser (2014), S. 45 f.

werden Assistenzsystemen wie Tablets zunehmend eingesetzt. Erweitert durch Anwendungen der Data Analytics erhöht sich deren Anwendungspotenzial.

4.3.1.8 Inter- und Intranetfähigkeit

Die Intra- bzw. Internetfähigkeit ist Voraussetzung für die kabellose oder -gebundene Kommunikationsfähigkeit intelligenter Objekte, des Bedienpersonals sowie externer Akteure. So erhöhen cloudbasierte Netzwerkverbindungen die Vernetzung von Objekten und Subjekten. Für den Austausch der Netzwerkpartner innerhalb und außerhalb des Unternehmens ist die Anbindung an das Internet unerlässlich, um die mit I4.0 verbundenen Potenziale zu realisieren³⁷⁶ und die CPS-Funktionen wie z.B. Identifikation & Erfassen in Echtzeit an jedem Ort zu realisieren. Diese Anforderung wurde im Rahmen der Empirie nur von einem Unternehmen (Intranet) geäußert. Die Anbindung der Kunden via Internet konnte in der Empirie kaum festgestellt werden. Die Anforderung kann aus technologischer Perspektive, aus externer Kundensicht sowie in Abhängigkeit der Systemauslegung eine Basisanforderung darstellen.

4.3.1.9 (Standardisierte) Konnektivität

Echtzeitfähigkeit hat direkten Einfluss auf die Kommunikations- und (ad hoc) Netzwerkfähigkeit logistischer Objekte, welche als Voraussetzung für I4.0 dienen und unter Konnektivität zusammengefasst werden. Für die passive und aktive Konnektivität von Objekten sind standardisierte Schnittstellen durch eine gemeinsame Ontologie und universelle kabelgebundene oder -lose Schnittstellen von physischen und virtuellen Objekten Voraussetzung. Die Interoperabilität von I4.0-Techniken untereinander mittels standardisierter Datenformate (z.B. OPC) für eine durchgängige Beschreibung von Abläufen auf allen Unternehmensebenen dient der Integration unterschiedlicher Herstellerkomponenten und Software-Systeme. Wie die Inter- und Intranetfähigkeit kann diese Anforderung aus technologischer Perspektive eine Basisanforderung darstellen.

4.3.1.10 Identität

Für die (Echtzeit-) Kommunikationsfähigkeit benötigt jedes Objekt oder Subjekt eine Identität. Durch die Identität wird die eindeutige Identifikation und Lokalisation anhand von Identifikationsmerkmalen realisiert. Identifikationsmerkmale beziehen sich z.B. darauf, dass alle relevanten Daten und Informationen inhärenter Bestandteil eines Objektes oder Subjektes für seinen Ablauf sind sowie für andere Akteure zur Verfügung gestellt werden können.³⁷⁷ Dadurch werden Objekte, Subjekte, Prozesse und Systeme zunehmend individualisiert. Die eindeutige Identifikation und Lokalisation soll in Echtzeit und jederzeit möglich sein, um die Planung und Steuerung vernetzter Objekte, Subjekte und Kunden zu gewährleisten.

³⁷⁶ Vgl. Fallenbeck und Eckert (2014), S. 427 ff.

³⁷⁷ Vgl. Wegener (2014), S. 347 f.

4.3.2 Eigenschaften aus der Logistikperspektive

Abbildung 28 zeigt die Zusammenführung der identifizierten Eigenschaften.

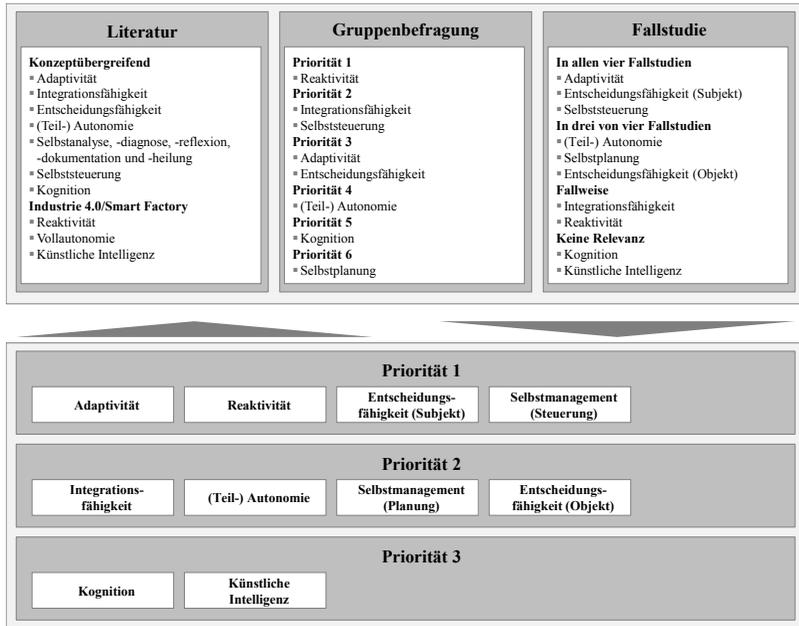


Abbildung 28: Zusammenführung Eigenschaftsanalyse³⁷⁸

Für das weitere Vorgehen wurden die identifizierten Eigenschaften auf acht (bzw. 10) verdichtet und in drei Prioritäten eingeteilt. Die Einteilung resultiert aus den Erkenntnissen der Wissenschaft (konzeptübergreifend und I4.0-/Smart Factory-spezifisch) und Praxis (Bewertung Gruppenbefragung sowie Nennung in den Fallstudien). Zu den Eigenschaften mit Priorität 1 im logistischen I4.0-Kontext gehören Adaptivität, Reaktivität, Entscheidungsfähigkeit (für Subjekte) sowie die Selbststeuerung. An zweiter Stelle wurden Integrationsfähigkeit, (Teil-) Autonomie, Selbstplanung sowie Entscheidungsfähigkeit für Objekte ermittelt. Mit geringerer Priorität bzgl. der aktuellen Verwendung wurden Kognition sowie künstliche Intelligenz identifiziert. Auch wenn diese mit geringerer Priorität bewertet wurden, betont die Praxis, dass sie in Zukunft eine Rolle spielen werden. Die acht Eigenschaften werden folgend einzeln beschrieben.

4.3.2.1 Adaptivität

Adaptivität bezieht sich auf die Anpassung an sich intern ändernde betriebliche Umfelder, indem sich z. B. Objekte bei Störungen mit älteren sowie mit modernen technischen

³⁷⁸ Eigene Darstellung.

Systemen vernetzen und neu konfigurieren können.³⁷⁹ Neben der technischen (Hard- und Software) Anpassung beschreibt die Eigenschaft die Adaptivität von Logistikmitarbeitern, um flexibel auf Veränderungen bei manuellen Tätigkeiten reagieren zu können.³⁸⁰ So wird die Adaptivität als die Fähigkeit verstanden, bei Toleranzabweichungen des internen Informations- und Materialflusses selbst durch Anpassungen einzuwirken und dadurch z. B. die Planung neuer Produktionsprogramme zu unterstützen.³⁸¹ Die Auswirkungen bleiben intern begrenzt, der Kunde nimmt davon keine Notiz. Der Anpassungsprozess kann sich auf Routine- (in Szenarien abgebildet) und Nicht-Routineentscheidungen beziehen. Bei Routineentscheidungen können Maßnahmen durch Objekte selbstständig erfolgen, bei Nicht-Routineentscheidungen treten Akteure (Objekte und Subjekte) in Verhandlung zu einander bzw. erhalten die Subjekte alleinige Entscheidungsautonomie.

4.3.2.2 Reaktivität

Die Reaktivität beschreibt die Sensibilisierung und Anpassung eines intelligenten Objektes oder Subjektes bzgl. sich ändernder Rahmenbedingungen.³⁸² Neben der Identifikation von Auswirkungen im Betriebsablauf ist die Ergreifung geeigneter korrigierender Maßnahmen in einer adäquaten Zeitspanne in Abhängigkeit von Zielrestriktionen Kern der Reaktivität. Reaktionen beziehen sich insbesondere auf Anpassungen hinsichtlich sich ändernder Kundenanforderungen, um hohe Lieferfähigkeiten mit geringen Beständen und nötiger Auslastung zu ermöglichen. Diese kundenzentrierte Eigenschaft wurde in einer Studie von 98 % befragter Unternehmen als sehr wichtig eingestuft.³⁸³ Die Wirkung der Anpassung hat eine direkte Rückkopplung zum Kunden. Der Anpassungsprozess kann sich auf Routine- (in Szenarien abgebildet) und Nicht-Routineentscheidungen beziehen. Bei Routineentscheidungen können Maßnahmen durch Objekte selbstständig erfolgen, bei Nicht-Routineentscheidungen treten Akteure (Objekte und Subjekte) in Verhandlung zu einander bzw. erhalten die Subjekte alleinige Entscheidungsautonomie.

4.3.2.3 Entscheidungsfähigkeit

Die Entscheidungsfähigkeit gilt gleichermaßen für technische und menschliche Akteure der Smart Factory. Ziel ist die Beschleunigung von Entscheidungsprozessen, die Reduzierung von Störungsauswirkungen und die Erhöhung von Adaptivität und Reaktivität. Für die individuelle Entscheidungsfindung in einem angemessenen Zeitfenster mit einem adäquaten Ergebnis ist die Nutzung lokaler Informationen entscheidend. Diese lokalen Informationen werden durch intelligente Objekte und Subjekte generiert, um

³⁷⁹ Vgl. Broy (2010), S. 21 f.

³⁸⁰ Vgl. Günthner et al. (2014), S. 309 f.

³⁸¹ Vgl. Kagermann et al. (2013), S. 105

³⁸² Vgl. VDI/VDE 2653 (2010), S. 4

³⁸³ Vgl. Spath (2013), S. 67

Entscheidungen an Ort und Stelle zu fällen.³⁸⁴ Der Mensch als flexibelste Einheit in I4.0 soll als Entscheider und Überwacher in Form einer übergeordneten Steuerungsinstanz Situationen beurteilen können.³⁸⁵ Visualisierungen unterstützen die Reduzierung von Informations- und Prozesskomplexität, um die Entscheidungsqualität zu verbessern. Die Entscheidungsfähigkeit von Objekten wurde in den Fallstudien für einfache Regelkreise (eKanbans) eingesetzt, die durch das Unterlaufen eines Mindestbestandes automatisch eine Nachbestellung auslösen. Werden Objekte mit mehr Intelligenz ausgestattet, wird die Entscheidungsfähigkeit für Nicht-Routinetätigkeiten ausgebaut werden. Inwiefern CPS bzw. intelligente Objekte Entscheidungen fällen und nach welchen Kriterien der Eingriffszeitpunkt durch das Personal festgelegt wird, hängt vom spezifischen Anwendungsfall ab.

4.3.2.4 Selbstmanagement

Die Selbststeuerung wird im Rahmen der I4.0 betont und in zahlreichen Beiträgen beschrieben. Ihre Verwandtschaft zu Autonomie und Entscheidungsfähigkeit ist in der folgenden Definition beschrieben: „*Selbststeuerung beschreibt Prozesse dezentraler Entscheidungsfindung in heterarchischen Strukturen. Sie setzt voraus, dass interagierende Elemente in nicht-deterministischen Systemen die Fähigkeit und Möglichkeit zum autonomen Treffen von Entscheidungen besitzen.*“³⁸⁶ Selbststeuernde Objekte sollen Menschen bei der Erfassung komplexer Zusammenhänge und der Entscheidungsfähigkeit in dynamischen Umfeldern unterstützen. Wichtige Merkmale der Selbststeuerung sind die Autonomie der Entscheidungsfindung und das zielorientierte Verhalten durch Messung, Bewertung und Rückkopplung von Toleranzabweichungen.³⁸⁷ Im Rahmen dieser Arbeit definiert sich das Selbstmanagement nach den Grundsätzen der *Kybernetik* mit einer Min-Max-Steuerung technischer Regelkreise. D. h. Ziele und Toleranzgrenzen bleiben vom Management vorgegeben. Innerhalb der Toleranzgrenzen sind logistische Objekte befähigt, Entscheidungen zeitnah und mit optimalem Ressourceneinsatz selbstständig zu treffen, um alternative Maßnahmen der Steuerung oder Planung zu ergreifen. Bei drohender Überschreitung von Toleranzgrenzen dient die Visualisierung als Entscheidungsgrundlage für das Personal, welches die endgültige Entscheidung fällt. **Selbstplanung, -steuerung und -kontrolle** bilden den Inhalt von Logistikaufgaben in Form des **Selbstmanagement**.

4.3.2.5 Integrationsfähigkeit

Für die digitale Durchgängigkeit ist die horizontale und vertikale Integration essentiell. **Vertikale Integration** beschreibt die Integration von IT-Systemen auf verschiedenen Hierarchieebenen der Automatisierungspyramide (von der Feld- bis zur Unternehmens-

³⁸⁴ Vgl. ten Hompel (2010), S. 6 f.

³⁸⁵ Vgl. Gorecky et al. (2014), S. 525 f.

³⁸⁶ Windt (2006), S. 283

³⁸⁷ Vgl. Windt (2006), S. 284 ff.

leitebene) zu einer durchgängig vernetzten, hierarchielosen, dezentralen Lösung.³⁸⁸ Die **horizontale Integration** beschreibt die Integration von IT-Systemen aller Prozesse, zwischen denen vom Auftragseingang über die Entwicklung zur Produktion und Logistik bis zur Auslieferung fertiger Produkte Material-, Informations- und Energieflüsse bestehen. Die digitale Durchgängigkeit ist nicht nur auf eine Smart Factory beschränkt, sondern kann zudem zwischen Unternehmen erfolgen.³⁸⁹ Entstehende vernetzte Produktions- und Logistiksysteme reduzieren System- und Medienbrüche und sollen durch neue Analysemöglichkeiten Qualität, Kosten und die Zeit optimieren.³⁹⁰

Die Integrationsfähigkeit von Objekten und Subjekten entlang der Wertschöpfungskette ermöglicht einen durchgängigen Informationsfluss innerhalb und außerhalb von Logistik- und Produktionssystemen. Die entstehenden dynamischen Netzwerke koordinieren sich weltweit über das Internet, um z. B. auftrags- und produktspezifisch Ressourcen, Termine und Kapazitäten virtuell abzugleichen. Durch digitale Produktgedächtnisse sowie eine Datensammlung über den Produktlebenszyklus soll die Produkt- und Prozessoptimierung unterstützt werden.³⁹¹ Objekte werden z. B. über Komponenten der CPS und Subjekte über Assistenzsysteme und IDT in Informations- und Materialflüsse integriert.

4.3.2.6 (Teil-) Autonomie

Unter Autonomie wird die Eigenschaft einer I4.0-Technik verstanden, die „*Kontrolle über den internen Zustand und sein Verhalten, durch die er aufgrund seines lokalen Wissens über seine Handlungen oder Aktivitäten entscheidet*“³⁹², zu besitzen. Die Verbindung zur Entscheidungsfähigkeit ist durch die Definition ersichtlich. Innerhalb und außerhalb der Fabrik sollen CPS und deren Anwendung in Produktions- und Logistiksystemen zu einer „*Autonomisierung der Teilprozesse*“ führen. Intelligente Produkte und Objekte werden dezentral auf Informationen zugreifen,³⁹³ um Entscheidungen im Sinne einer dezentralen autonomen Planung oder Steuerung für effiziente Logistikabläufe gestalten zu können. Die Smart Factory soll durch Autonomie und Selbstmanagement einen Umbruch erfahren. In einem CPS sollen autonome Agenten Menschen von Routineaufgaben entlasten und standardisierte Entscheidungen selbst durchführen bzw. das Personal bei Entscheidungen unterstützen.³⁹⁴ Die vollständige Autonomie von dezentralen intelligenten Objekten ist aktuell noch in Erprobung.³⁹⁵ Ob es zu einer Voll- oder Teilautonomie kommen wird, ist bisher offen.

³⁸⁸ Vgl. Kagermann et al. (2013), S. 24

³⁸⁹ Vgl. BMBF (2013), S. 6; Kagermann et al. (2013), S. 24

³⁹⁰ Vgl. Kagermann et al. (2013), S. 24; PWC und Strategy& (2014), S. 18

³⁹¹ Vgl. BMBF (2013), S. 6

³⁹² Vgl. VDI/VDE 2653 (2010), S. 4; „Autonomie“ wird innerhalb der Norm auch als „Selbstständigkeit“ verstanden.

³⁹³ Vgl. VDE und DIN (2013), S. 10 f.

³⁹⁴ Vgl. Spath (2013), S. 98 f.

³⁹⁵ Vgl. Spath (2013), S. 6

4.3.2.7 Kognition

Der aus der Psychologie stammende Begriff „*Kognition*“ beschreibt die Informationsverarbeitung und -umgestaltung in verhaltensgesteuerten Systemen von Menschen sowie die „*Fähigkeit zur Wahrnehmung und zielgerichteten Interpretation der Lebenswelt*.“³⁹⁶ Die Übertragung kognitiver Eigenschaften auf Objekte hat das Potenzial, die Entwicklung in der Industrie nachhaltig zu beeinflussen. Die Kognition wird in AS der I4.0 steigen.³⁹⁷ CPS als Weiterentwicklung bzw. Ausbau eines AS erfordern die Übertragung menschlicher kognitiver Fähigkeiten auf logistische Objekte. Die Selbstorganisation kann wesentlicher Bestandteil seiner „Intelligenz“ sein. „*Selbstorganisierende Systeme*“ sind sich selbst entwickelnde Systeme. Die gerichtete Entwicklung von einem niedrigeren zu einem höheren Leistungsniveau basiert auf einem Wissensaufbau aus gewonnenen Erfahrungen niedrigerer Leistungsstufen. Diese Verbesserung wird durch vorgegebene, unveränderliche Funktionen realisiert.³⁹⁸ I4.0-Techniken mit dieser Eigenschaft können in die Lage versetzt werden, die Toleranzgrenzen für Zielwerte selbstorganisierend anzupassen. Der Einsatz für Nicht-/Routinetätigkeiten wird damit möglich. Dies ist ebenfalls Inhalt künstlicher Intelligenz.

4.3.2.8 Künstliche Intelligenz

Agenten besitzen i. d. R. kein Gedächtnis und dadurch eine verminderte Lernfähigkeit. „*Lernende Systeme*“ zählen zu den anspruchsvollsten AS und stellen einen wesentlichen Teil der künstlichen Intelligenz (KI) dar. Maschinelles Lernen befähigt die Systeme, ihr Verhalten zielgerichtet zu verbessern. Sie können auf erlerntes Wissen jederzeit zugreifen.³⁹⁹ KI definiert sich aus vier Dimensionen und ist ein System, das wie ein Mensch denkt, wie ein Mensch agiert, das rational denkt und rational handelt. Eigenschaften der KI sind rationales Handeln, logisches Schlussfolgern, kognitives Verhalten, Emergenz und Entscheidungsfähigkeit. Ein Programm besitzt KI, wenn es eigenständig Entscheidungen treffen kann für Vorkommnisse, die vorher nicht definiert waren.⁴⁰⁰ I4.0-Techniken mit dieser Eigenschaft können nicht nur Toleranzgrenzen, sondern zusätzlich ihre Zielwerte für Nicht-Routinen selbstständig anpassen.

4.4 Ableitung von Gestaltungsanforderungen

Gestaltungsanforderungen an cyber-physische Logistiksysteme konnten weder in der Wissenschaft noch in der Praxis identifiziert werden. Die Berücksichtigung der Logistikerspektive fehlt gänzlich. Abbildung 29 stellt die abgeleiteten Gestaltungsanforde-

³⁹⁶ Gabler Wirtschaftslexikon (2015), Zugriff 10.12.2015

³⁹⁷ Vgl. Bubeck et al. (2014), S. 231

³⁹⁸ Vgl. Weller (2008), S. 125 ff.

³⁹⁹ Vgl. Weller (2008), S. 125 ff.

⁴⁰⁰ Vgl. Bogon (2013), S. 12 f.

rungen des Logistikmanagements dar, die auf Basis der gesammelten Erkenntnisse systematisiert und zusammengefasst wurden.

Theoretisches und konzeptionelles Bezugssystem	
System- und Kybernetik-ebene	<p>Systemansatz: Die ganzheitliche Betrachtung berücksichtigt unterschiedliche Ebenen (System, Netzwerk, Technologie) in CPLS und interpretiert die Smart Factory als ein System von Systemen. Die Planung, Steuerung und Kontrolle dieser Systeme ist auf das Gesamt optimum und nicht nur auf lokale Optima ausgerichtet.</p> <p>Elemente: Elemente können technische und organisatorische interne Ressourcen darstellen. Elemente stellen Eigenschaftsträger dar, die innerhalb des Logistiksystems zur Zielverfolgung individuelle Aufgaben besitzen können.</p> <p>Abgrenzung: Die Abgrenzung von Umwelt, Prozessen und Elementen muss für Logistiksysteme dargestellt werden. Abgrenzungen können z.B. institutionell sowie funktional erfolgen.</p> <p>Zieltransparenz: Systeme, Netzwerke und Elemente besitzen unterschiedliche Ziele auf unterschiedlichen Ebenen. Die Verknüpfung unterschiedlicher Ebenen kann in einem transparenten Zielsystem erfolgen.</p>
Netzwerk-ebene	<p>Netzwerkgedanke: Innerbetriebliche Netzwerke können aus einzelnen Elementen oder aus Systemen dargestellt werden. Elemente und Systeme bilden Kanten sowie Knoten.</p> <p>Ressourcenallokation: Im Zuge der technischen Entwicklung können Objekte und Subjekte individuelle Ziele und Aufgaben zugeteilt werden sowie die dazu nötigen Ressourcen.</p> <p>Verantwortlichkeiten: Operative Elemente werden direkten und beschleunigten Einfluss auf das System Smart Factory nehmen. Zielbeitrag, Ergebnisverantwortung sowie Entscheidungshierarchie sollten berücksichtigt werden.</p> <p>Regulation und Standardisierung: Die Zuordnung von Aufgaben und Zielen sowie deren Abhängigkeiten sollte transparent sein. Daraus folgende Ziel- und Entscheidungshierarchien sollten Regeln unterworfen werden.</p>
Technologie-ebene	<p>Verbindung Ausrüster- und Anwenderspektrale: Übersetzung unspezifischer Kundenanforderungen in technische Spezifikationen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Anspruchsgruppen, wie operative und strategische Logistikmitarbeiter.</p> <p>Interaktion von Objekten und Subjekten: Durch Anwendungen, Assistenzsysteme und cyber-physische Systeme werden Objekte und Subjekte dezentral und autonom Einfluss auf Material- und Informationsflüsse cyber-physischer Logistiksysteme nehmen. Der Mensch-Maschine-Interaktion sollte Rechnung getragen werden.</p> <p>Dimensionen der Veränderung: Technologien im Kontext von I4.0 verändern die Ebenen von Logistiksystemen. Diese müssen aus Theorie und Wissenschaft erarbeitet werden und in die Gestaltung einfließen.</p>
Empirische Analyse	
Anwendungs-orientierung	<p>Interdisziplinärer Charakter von Logistik und I4.0: Die Integration von Anwender- und Ausrüsterspektrale sollte gewährleistet werden. Die Schnittstellen zwischen Logistik, Produktion sowie dem Einsatz neuer Technologien sollte Rechnung getragen werden.</p> <p>Kundenorientierung: Die Aufnahme von Anforderungen externer und interner Kunden sollte in die Gestaltung einfließen. Externe Kunden haben Einfluss auf Zielvorgaben sowie in I4.0 auf Material- und Informationsflüsse. Interne Kunden (Führungskräfte und operatives Logistikpersonal) partizipieren durch Nutzung von Technologien und den zur Verfügung gestellten Eigenschaften im täglichen Arbeitsumfeld.</p> <p>Aufgaben des Logistikmanagements: Die Aufgaben des Logistikmanagements beziehen sich auf Aufgaben des System-, Netzwerk- sowie Technologiemanagements und deren Betrieb. Dies bezieht sich auf die Planung, Steuerung und Kontrolle von Material- und Informationsflüssen.</p> <p>Methoden und Instrumente: Die zum Einsatz kommenden Werkzeuge sollten umsetzungsorientiert sein. Die Visualisierung sowie Handhabung der Gestaltung sollte für das Logistikmanagement sowie deren Vorgesetzte grafisch und zielgerichtet dargestellt werden. Werkzeuge dienen somit als Kommunikationsmedium zwischen unterschiedlichen Anspruchsgruppen.</p> <p>Implementierung: Die anwendungsgetriebene und schrittweise Realisierung mit der Darstellung von Zielen, Verantwortlichkeiten etc. zur prozessorientierten Abwicklung sollte technische und organisatorische Aspekte berücksichtigen und aus den Bedürfnissen der Operative abgeleitet werden.</p>

Abbildung 29: Gestaltungsanforderungen an cyber-physische Logistiksysteme⁴⁰¹

Innerhalb der Bezugssysteme wird auf der **Systemebene** ein ganzheitlicher Systemansatz von Logistiksystemen, die Zieltransparenz auf unterschiedlichen Ebenen, die Abgrenzung von Umwelt, Prozessen und Elementen sowie die Berücksichtigung technischer bzw. organisatorischer Elemente als Eigenschaftsträger gefordert. Die **Netzwerk-ebene** inkludiert den Netzwerkgedanken durch diese Elemente und den daraus geformten Systemen. Diesen sollten durch die Ressourcenallokation individuell und dezentral Ziele und Aufgaben zugeordnet werden. Damit erhalten die Elemente Ergebnisverantwortlichkeit sowie einen Zielbeitrag. Um Zielkonflikte in einem innerbetrieblichen Netzwerk zu reduzieren, müssen Verhaltensregeln und Standards für un-/geplante Abläufe erstellt werden. Die **Technologieebene** muss eine gemeinsame Sprache für den Austausch der Ausrüster- und Anwendersicht berücksichtigen. Intelligente Objekte und

⁴⁰¹ Eigene Darstellung.

assistierte Entscheider werden durch Technologien im Kontext von I4.0 in Prozesse integriert. Diese Technologien sollten dem jeweiligen „Kunden“ zugeordnet werden können. Durch den Einsatz dieser Technologien werden Objekte, Subjekte sowie Material- und Informationsflüsse Veränderungen ausgesetzt. Diese Veränderungen sollten aufgezeigt werden und in die Gestaltung einfließen.

Die **empirische Analyse** betont den interdisziplinären Charakter von Logistik und I4.0 sowie die Kundensicht. Neben externen Kunden sollten die Anforderungen des Logistikmanagements sowie der Einfluss auf innerbetriebliche Logistikprozesse in der Gestaltung berücksichtigt werden. Diese Prozesse inkludieren Material- und Informationsflüsse sowie die Schnittstellen zu Kunden und Lieferanten. Die Prozesse werden durch interdisziplinäre Aufgaben des Logistikmanagements geplant, gesteuert und kontrolliert. Methoden und Instrumente sollten als Kommunikationsmedium für die Visualisierung und Handhabung umsetzungsorientiert sein. Die Implementierung bzw. der Aufbau von CPLS muss aus den Bedürfnissen der Operative abgeleitet werden und schrittweise, „*nicht effekthaschend*“ realisiert werden.

5 GESTALTUNG CYBER-PHYSISCHER LOGISTIKSYSTEME

Die Auseinandersetzung mit CPLS findet in Wissenschaft und Praxis bisher kaum statt. Der Fokus liegt auf CPPS. Bisher wurden in der vorliegenden Arbeit Begriffe, Konzepte, Potenziale, Herausforderungen, Technologien, Anforderungen und Eigenschaften identifiziert und um die Logistikperspektive erweitert. In Kapitel 5 werden die erarbeiteten Erkenntnisse für das Logistikmanagement unter Berücksichtigung der Gestaltungsanforderungen in das CPLS überführt. Dafür wird zunächst in Abschnitt 5.1 die terminologische Abgrenzung vorgenommen und die Gestaltungsebenen und -merkmale des CPLS systematisiert sowie deren Zusammenhang dargestellt. Dies bildet die Ausgangslage zur Beantwortung der fünften sekundären Forschungsfrage:

F.5 Wie können cyber-physische Logistiksysteme gestaltet werden?

Die Gestaltung gliedert sich in die zwei Schritte Konzeptionierung (Abschnitt 5.2) und Entwicklung (Abschnitt 5.3). Für die Konzeptionierung werden Veränderungsdimensionen der zukünftigen Logistik dargestellt und für die Ableitung von Gestaltungsempfehlungen (Ebenen und Merkmale) genutzt. Für die Entwicklung werden identifizierte Gestaltungsfelder für die Ableitung von Gestaltungsempfehlungen (Auswahl von Instrumenten und Methoden) genutzt. Anschließend wird das CPLS mit Vertretern aus der Praxis⁴⁰² diskutiert, validiert und angepasst. In Abschnitt 5.4 werden die Auswirkungen des CPLS auf das Logistikmanagement mittels der Darstellung der Veränderungen für Material- und Informationsflüsse beschrieben und durch Beispiele aus Planung, Steuerung und Kontrolle dargestellt. Die Erkenntnisse münden in Handlungsempfehlungen für das Logistikmanagement produzierender Unternehmen.

F.6 Welche Handlungsempfehlungen können für das Logistikmanagement im Kontext von Industrie 4.0 abgeleitet werden?

Der folgende Abschnitt leitet mit der Begriffserklärung in die Gestaltung von CPLS ein.

5.1 Terminologie

KAGERMANN *et al.* z. B. beschreiben CPPS als die „Anwendung von Cyber-Physical Systems in der produzierenden Industrie und somit die Befähigung zur durchgängigen Betrachtung von Produkt, Produktionsmittel und Produktionssystem unter Berücksichtigung sich ändernder und geänderter Prozesse.“⁴⁰³ Innerhalb der Smart Factory stellen CPPS nach BAUER *et al.* die Basis für das Management dar, welches durch die Übertragung sozialer Netzwerke auf Objekte die Verbesserung von Durchlaufzeiten, Qualität und Auslastung, d. h. ein Gesamtoptimum anstrebt. Die Akzeptanz bei Menschen soll durch Assistenzsysteme gesteigert werden.⁴⁰⁴ VDI und VDE berücksichtigen ebenfalls

⁴⁰² Dabei handelt es sich nicht um die gleichen Experten wie in der empirischen Analyse oder der Gruppenbefragung.

⁴⁰³ Kagermann *et al.* (2013), S. 84

⁴⁰⁴ Vgl. Bauer *et al.* (2014), S. 20

Produktionsanlagen, die Anforderungen und Eigenschaften im Sinne dieser Arbeit besitzen. Sie sollen flexibel, adaptiv und in Grenzen selbstständig konfigurierbar und organisierend sein, um eine kosteneffiziente Produktion zu gewährleisten. Dafür besitzen CPPS Daten, Dienste und Funktionen, um diese Ziele ressourcenschonend zu erreichen. Dienste, Daten und Komponenten können frei und dezentral auf Knoten im Netzwerk verteilt werden. Diese dezentrale Verteilung löst die Automatisierungspyramide sukzessive auf⁴⁰⁵ (Kapitel 3). Dadurch entsteht ein System von Systemen, in das (Öko-) Systeme wie Logistik oder Energieversorgung integriert werden.⁴⁰⁶

Im Rahmen der Literaturrecherche konnte lediglich eine Veröffentlichung gefunden werden, die CPLS definiert. A *BigDataLogModule* wird innerhalb des *Big Data* Modules mittels *Computation*, *Communication* und *Control* die Eingangsgrößen für das *Data Analytics* Modul erzeugt. Innerhalb dieses Modules werden mittels *Computation*, *Communication* und *Control* Prognosen, Trends und Entscheidungsgrundlagen für die Logistik generiert.⁴⁰⁷ Darüber hinaus existieren keine weiteren Definitionen oder Beispiele, daher soll folgende Definition für diese Arbeit gelten:

„Cyber-physische Logistiksysteme sind Netzwerke in einer Smart Factory bestehend aus Produkt-, Objekt- und Subjektsystemen, die über Integrationsplattformen miteinander vernetzt sind. Dessen Elemente sind 14.0-Techniken, die mit Funktionen und Eigenschaften auf Basis von cyber-physischen Systemen, Assistenzsystemen und Anwendungen in logistischen Prozessen die Erfüllung von Zielen und Aufgaben des Logistikmanagements zur Befriedigung der Kundenwünsche unterstützen.“

Der Fokus der Arbeit liegt auf innerbetrieblichen Logistiknetzwerken innerhalb der Smart Factory von produzierenden (Maschinenbau-) Unternehmen, deren Leistungsspektrum die Anwender- und Ausrüstersicht kombiniert. Per Definition⁴⁰⁸ ist ein Logistiknetzwerk die vereinfachte Darstellung eines Logistiksystems. Die Kanten und Knoten stellen die Systemelemente (14.0-Techniken) dar, die in Abhängigkeit von ihrer Anwendung Produkt-, Objekt- und Subjektsysteme formen können. In dieser Arbeit bildet die Gestaltung dieser Systemelemente das Zentrum der Betrachtung der CPLS. In Anlehnung an das theoretische Bezugssystem sollen die System-, Netzwerk- und Technologieebene beschrieben werden. Die Ebenen sind in dieser Arbeit durch Merkmale und ihre Ausprägungen determiniert, die die Gestaltung der CPLS in Abhängigkeit vom Anwendungsfall ermöglichen. Neben Merkmalen und Ausprägungen stehen dem Logistikmanagement Instrumente und Methoden zur Verfügung (Abschnitt 5.3.2). Diese dienen der anwendungsorientierten Entwicklung des Ansatzes und basieren im Wesentlichen auf den Erkenntnissen der empirischen Analyse. Abbildung 30 stellt die Systeme

⁴⁰⁵ Vgl. VDI und VDE (2013), S. 3 f.

⁴⁰⁶ Vgl. VDE und DIN (2013), S. 9

⁴⁰⁷ Vgl. Frazzona et al. (2015), S. 333

⁴⁰⁸ Siehe dazu die Ausführungen in Kapitel 2.

matisierung der Gestaltungsebenen und -merkmale von CPLS in der Smart Factory dar. Zur Übersicht wurden die bezugnehmenden Abschnitte integriert.

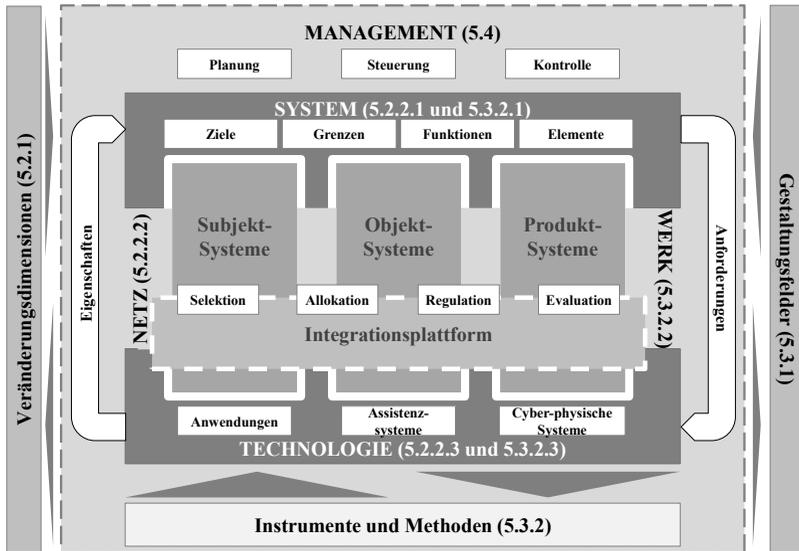


Abbildung 30: Systematisierung der Gestaltungsebenen und -merkmale von CPLS⁴⁰⁹

Die integrierte Sicht resultiert aus dem gleichzeitigen Wirken der System- und Technologieebene auf die Netzwerkebene. Die Managementebene plant, steuert und kontrolliert mittels technischer Unterstützung Informations- und Materialflüsse und somit die anderen Ebenen. Aus ganzheitlicher, integrierter Perspektive übernimmt das Management somit Aufgaben des System-, Netzwerk- und Technologiemanagements.

5.2 Konzeptionierung

Die Konzeptionierung stellt den ersten Teil der Gestaltung dar, in der zunächst Veränderungsdimensionen sowie deren Einfluss auf cyber-physische Logistiksysteme entlang der Gestaltungsebenen in Abschnitt 5.2.1 dargestellt werden. Diese Erkenntnisse dienen der Formulierung von Gestaltungsempfehlungen (Abschnitt 5.2.2).

5.2.1 Veränderungsdimensionen

Den Dimensionen werden in diesem Abschnitt relevante Anforderungen und Eigenschaften zugeordnet sowie deren Einfluss auf CPLS beschrieben. Anschließend werden die Aktivitäten der Unternehmen der empirischen Analyse bzgl. der Veränderungen qualitativ bewertet. Die Veränderungsdimensionen sowie die beschriebenen Anforderungen und Eigenschaften lassen sich nicht strikt auf eine Gestaltungsebene limitieren,

⁴⁰⁹ Eigene Darstellung.

werden daher je nach dem Verständnis der Gestaltungsebenen und -merkmale (s.o.) zugeordnet.

5.2.1.1 Systembezogene Veränderungsdimensionen

Veränderungsdimensionen sind Systemdenken und Zielkonflikte, Virtualisierung und Entgrenzung sowie die Dezentralisierung und Individualisierung (Abbildung 31).

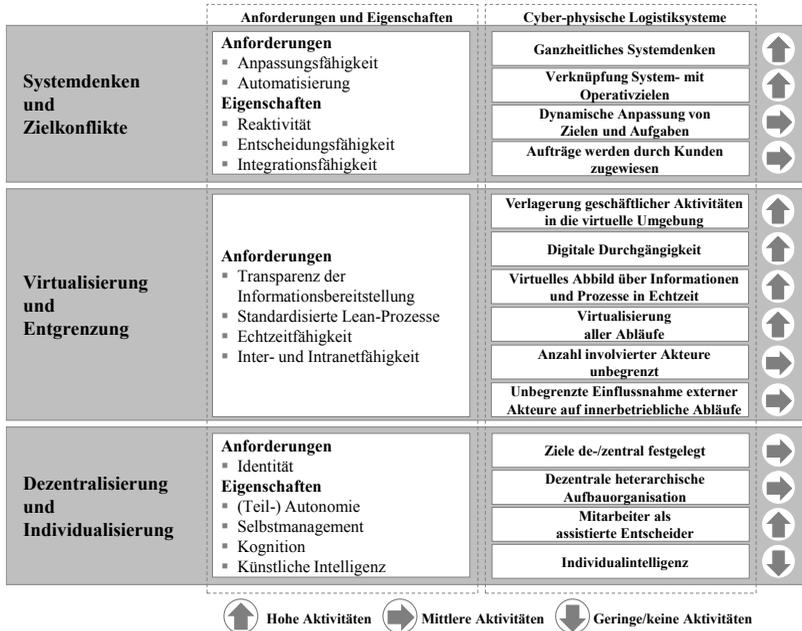


Abbildung 31: Systembezogene Veränderungsdimensionen⁴¹⁰

Die Praxis etabliert in den Unternehmen einen Mentalitätswandel zum ganzheitlichen **Systemdenken**. Dies bezieht sich auf das Verhalten und die Einstellung des Führungspersonals sowie die Vorbereitung des operativen Personals auf die zunehmende Digitalisierung. In diesem Kontext z. B. nutzt Unternehmen A seine entwickelte Lösung zur direkten Integration strategischer und operativer Planungs- und Steuerungsebenen. Unternehmen B hat damit begonnen, die Auflösung von Bereichszielen und die direkte Verknüpfung der strategischen mit der operativen Ebene organisatorisch zu realisieren. Die dynamische Anpassung erfolgt maßgeblich durch die Mitarbeiter und weniger durch Objekte. Die Verschlankeung der Aufbauorganisation soll **Zielkonflikten** zwischen den Bereichen entgegenwirken, wird allerdings kurz- bis mittelfristig durch die Zunahme operativer Akteure ebenfalls Zielkonflikte entstehen lassen. Dies gilt insbesondere, wenn operative Akteure Ziele und Aufgaben selbst festlegen. Werden zusätz-

⁴¹⁰ Eigene Darstellung.

lich Kunden integriert (bisher nur im Einzelfall), kommen zusätzliche vorerst „unberechenbare“ Akteure hinzu.

Die **Virtualisierung** mittels Reduzierung der Medienbrüche in der Auftragsabwicklung bildet für Wissenschaft und Praxis eines der übergeordneten Ziele im Kontext von I4.0. Die ersten Schritte dahingehend sind vielversprechend. Unternehmen A betont die Sogwirkung der Aktivitäten auf andere Bereiche infolge generierter Verbesserungen. Ursächlich sind Transparenz und Standardisierung. Diese bilden eine der Basisanforderungen des Logistikmanagements und zählen neben der Prozesssicherheit und -beherrschung zu den logistischen Erfolgsfaktoren.⁴¹¹ Die „Echtzeitfähigkeit“ ist in diesem Kontext ein relativer Begriff, der zwischen Millisekunden, Tagen oder mehr schwanken kann. Umso kleiner die Frequenz und das damit genauere virtuelle Abbild ist, umso mehr Daten werden generiert, die eine etwaige leistungsfähigere Infrastruktur (manuelle bzw. automatische IDT) benötigen. Die Schließung informatorischer Lücken ist insbesondere für Asymmetrien von Plan- und Realwelt relevant, die direkte Auswirkungen auf die Güte von Planungs-, Steuerungs- und Kontrollparametern besitzen. Ersichtlich ist, dass die Aktivitäten von allen Unternehmen als hoch einzustufen sind. Die Virtualisierung und Anbindung von Akteuren via Inter- oder Intranet beschleunigt die sukzessive Entwicklung von Smart Factories zu selbstreferentiellen Systemen mit offenen Grenzen. Diese **Entgrenzung** führt zu einer „theoretisch“ unbegrenzten Anzahl an Akteuren, die mit dem Unternehmen in Austausch treten können (IoE). Der Austausch und die gegenseitige Einflussnahme werden in diesem Kontext für die Systemstabilität wie auch aus Produkthaftungsgründen reguliert werden müssen. Inwieweit die Entgrenzung einer vollständig permeablen Membran gleicht, wird abhängig von dem Geschäftsmodell sowie der notwendigen Integration der Akteure für die Befriedigung der Kundenbedarfe sein. Die Durchlässigkeit der Grenzen (insbesondere informatorisch) lässt extern Branchen und intern Bereiche, wie die Beschaffung, Produktion und Distribution, konvergieren.

Die **Dezentralisierung** und **Individualisierung** der Systemelemente ist ein wesentliches Charakteristikum der Smart Factory und basiert u. a. auf der (Teil-) Autonomie, Identität sowie dem Selbstmanagement. In diesem Kontext sind Aktivitäten der Unternehmen auf verschiedenste Weise identifiziert worden. Die Stärkung des assistierten Entscheiders ist hier besonders zu betonen, der mittels Assistenzsystem integriert eine zentrale Rolle in logistischen Prozessen einnimmt. Die Individualisierung ist zusätzlich in der Datenaufnahme zu verzeichnen. Unternehmen B „individualisiert“ die Bereitstellungs- und Lagerflächen in Form von Meldebeständen.

⁴¹¹ Vgl. Schuh und Stich (2013), S. 21

5.2.1.2 Netzwerkbezogene Veränderungsdimensionen

Veränderungsdimensionen sind Arbeitsteilung, Vernetzung und Verantwortung sowie Kundenzentrierung (Abbildung 32).

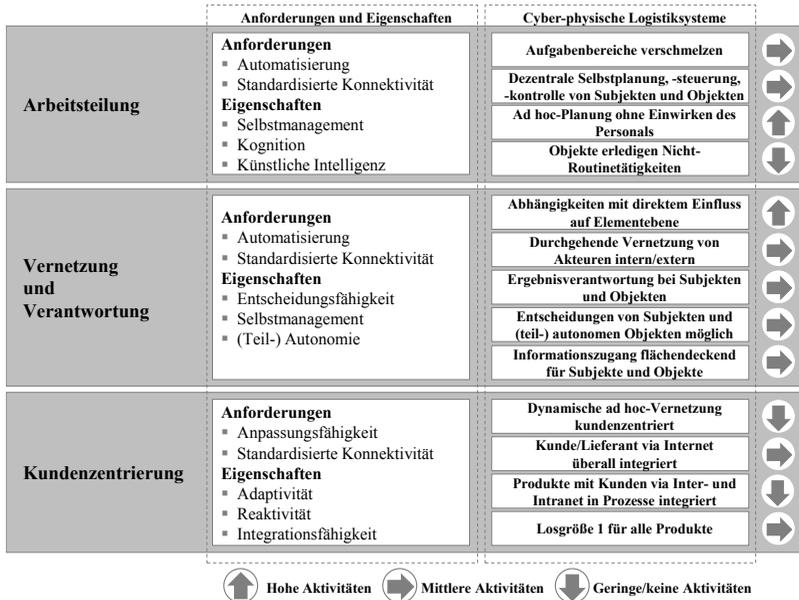


Abbildung 32: Netzwerkbezogene Veränderungsdimensionen⁴¹²

Dezentralisierung und Individualisierung verlagern Ziele und Aufgaben zunehmend auf operative Objekte und führen zur vermehrten **Arbeitsteilung**, derer sich die Unternehmen annehmen müssen. Die Verschmelzung der Tätigkeiten konnte in den Fallstudien z. B. durch die automatischen Bestellprozesse von Behältern bei Erreichung eines Mindestbestandes oder durch die Aktivierung der internen Logistik für die Abholung von Voll- bzw. Leergut identifiziert werden. Umgesetzte Aktivitäten für Nicht-Routinetätigkeiten sind angedacht, allerdings nicht realisiert. Aktuell gilt es die Routinetätigkeiten informatorisch abzubilden. Eine zentralistische Unternehmensstruktur wird zu Gunsten der Stärkung dezentraler Elemente modifiziert, in der Kompetenzen sukzessive in Richtung der operativen Ebenen vordringen.

Dafür müssen die **Vernetzung** und **Verantwortlichkeiten** in Form von Regeln, Normen und Standards neu festgelegt bzw. erweitert werden, wenn operative Elemente selbstständig die Ergebnisse verwalten und diesbezüglich Entscheidungen fällen. Verantwortung über Ergebnisse und Entscheidungen obliegen bisher mehrheitlich den Mitarbeitern und werden bei Objekten für Routineentscheidungen als technische Regelkrei-

⁴¹² Eigene Darstellung.

se realisiert. Durch die Entgrenzung und die damit ermöglichte Partizipation einer unbegrenzten Anzahl an Systemelementen, werden sich diese unbegrenzt vernetzen und miteinander interagieren. Alle partizipierenden Unternehmen der Fallstudienforschungen verzeichnen durch den erhöhten Vernetzungsgrad eine interne Erhöhung der Abhängigkeiten. Dadurch werden systemisch erhebliche Potenziale aufgedeckt, aber auch Störungen erzeugt, die nicht nur lokale Auswirkungen haben, sondern systemische. Die Abhängigkeiten werden im Kontext von I4.0 nach außen hin erweitert.

Das innerbetriebliche Logistiknetzwerk kann in I4.0 zusätzlich durch Produkte die **Kundenzentrierung** vorantreiben. In der konventionellen Auftragsabwicklung befinden sich Kunden und Lieferanten am Beginn bzw. am Ende der Prozesskette. Die zunehmende Kundenintegration soll Kunden überall in die Prozesse eingreifen lassen und dadurch die Losgröße 1 in der Serie ermöglichen. Aktivitäten zu intelligenten Produkten mit inhärenten Kundenauftragsdaten konnten nicht identifiziert werden. Maßnahmen beziehen sich auf die Optimierung von Rüst- und Reihenfolgeplanungen mittels Virtualisierungsprozessen, um die Variantenvielfalt zu adressieren. Kunden sind konventionell über den Vertrieb oder den After-Sales-Bereich integriert, aber nicht direkt in interne Abläufe einbezogen. Configurationssysteme ermöglichen die Integration und Individualisierung der Kundenwünsche. Die Lieferantenintegration ist bereits in der Industrie vielfach realisiert. In den Fallstudien konnte die Lieferantenintegration für die Beschaffungslogistik und die Materialbereitstellung bis zur Arbeitsstation beschrieben werden.

5.2.1.3 Technologiebezogene Veränderungsdimensionen

Veränderungsdimensionen sind Dynamisierung und Automatisierung, Integration und Service-Orientierung sowie Intelligenz und Leistungsfähigkeit (Abbildung 33).

	Anforderungen und Eigenschaften	Cyber-physische Logistiksysteme	
Dynamisierung und Automatisierung	Anforderungen <ul style="list-style-type: none"> ▪ Transparenz der Informationsbereitstellung ▪ Standardisierte Lean-Prozesse ▪ Echtzeitfähigkeit ▪ Automatisierung Eigenschaften <ul style="list-style-type: none"> ▪ Entscheidungsfähigkeit 	Echtzeitanforderungen	↑
		Planung und Steuerung über Assistenzsysteme (HMI)	↑
		Entscheidungen gestützt durch Smart Data-Anwendungen	↑
		Automatische Datenaufnahme via CPS	→
		Maßnahmenumsetzung via Assistenzsystem	↑
		Kundendaten fließen direkt in die Planung und Steuerung ein	↓
Integration und Service-Orientierung	Anforderungen <ul style="list-style-type: none"> ▪ Datensicherheit und -schutz ▪ Inter- und Intranetfähigkeit ▪ Standardisierte Konnektivität Eigenschaften <ul style="list-style-type: none"> ▪ Entscheidungsfähigkeit ▪ Selbstmanagement ▪ Integrationsfähigkeit 	Vollständige vert./hor. Integration von „intelligenten“ Objekten und Subjekten	→
		Daten und Dienste auf dezentraler/ öffentlicher Infrastruktur (Cloud)	→
		Intra- bzw. Internet flächendeckend	→
		Mustererkennung für un-/strukturierte Daten zur Logistikunterstützung	→
		Apps und SOA	→
			↓

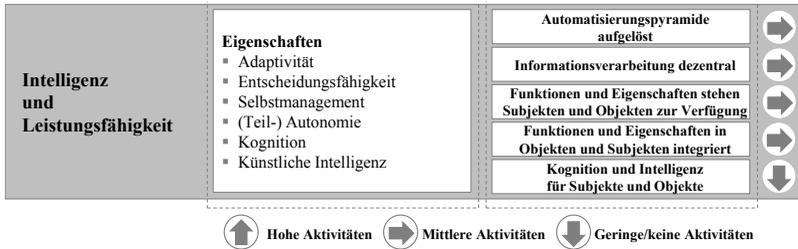


Abbildung 33: Technologiebezogene Veränderungsdimensionen⁴¹³

Zur Erhöhung der Entscheidungsqualität dienen die Basisanforderungen Echtzeitfähigkeit und Automatisierung. Dadurch werden Planungs-, Steuerungs- und Kontrollprozesse **dynamisiert** und **automatisiert**. Die dafür notwendige Virtualisierung wird von den Unternehmen unterschiedlich vorangetrieben. Während Unternehmen A und C aktuell manuelle Buchungsvorgänge nutzen, präferieren B und D voll- bzw. halbautomatisierte Lösungen via CPS. Echtzeitinformationen unterstützen die Verbesserung und Beschleunigung von Planungs- und Steuerungsaufgaben. Informationen können als Entscheidungsvorlagen auf Assistenzsystemen visualisiert werden. Dadurch wird neben der Geschwindigkeit die Qualität der Entscheidungen verbessert. Dies gilt ebenfalls für das Störungsmanagement, wenn unvorhergesehene Ereignisse durch direkte Kundenintegration auftreten.

Die Nutzung dezentraler Infrastrukturen für die **Integration** spielt in allen Fallstudien eine Rolle. Dafür kommen zentrale Integrationsplattformen zum Einsatz, die Objekte und Subjekte miteinander vernetzen. Unternehmen A nutzt die Integrationsplattform als MES zur Verbindung strategischer mit der operativen Ebene. Unternehmen C nutzt eine zentrale Struktur als Planungs- und Steuerungstafel direkt im Ausführungsbereich. Aktuell wird die zentrale Vernetzung der dezentralen vorgezogen. Die Anbindung des Internets insbesondere mit der externen Umwelt gestaltet sich aufgrund von Sicherheitsbedenken als schwierig. Die Unternehmen testen Systeme durch externe Partner auf Sicherheitslücken, scheuen allerdings die Anwendung nach außen. Dies bezieht sich ebenfalls auf die horizontale Integration mit mehreren externen Partnern und der Teilung von Daten zur Leistungserstellung. Die Ausbreitung von Inter- bzw. Intranet im internen Gebrauch nimmt sukzessive aufgrund der Vernetzungsbestrebungen zu. Unternehmen A etabliert bereits ein durchgängiges „Intranet der Dinge“, in dem Elemente in einem (internen) Kunden-Lieferanten-Netzwerk via Integrationsplattform integriert sind. Über diese Plattform werden Mitarbeitern z. B. via Smart Data-Analysen Dienste in Form von Entscheidungsempfehlungen für innerbetriebliche Logistikprozesse zur Verfügung gestellt. Dadurch nimmt die **Service-Orientierung** zu, wenn Entscheider und intelligente Objekte im Moment des Bedarfes auf die für sie notwendigen Dienste dezentral zugreifen können.

⁴¹³ Eigene Darstellung.

Grundlage vieler Veränderungsdimensionen ist die Auflösung der Automatisierungspyramide, die die CPS-basierte Automation und eine Dezentralität von Planung und Steuerung (Kapitel 2) ermöglicht. Die Verfügbarkeit von technischen Funktionen und Eigenschaften für operative Elemente wird die **Intelligenz** sowie die **Leistungsfähigkeit** der Systemelemente erhöhen.⁴¹⁴ Die Unternehmen haben hier Potenzial, die Leistungsfähigkeit ihrer Systeme weiter auszubauen, da z. B. die Eigenschaften der Kognition und künstlichen Intelligenz bisher nicht berücksichtigt werden. Dennoch werden Funktionen und Eigenschaften von CPS in Abhängigkeit von der Anwendung genutzt. Die Ergebnisse der empirischen Analyse zeigen auf, dass insbesondere Adaptivität, Entscheidungsfähigkeit der Subjekte sowie Selbststeuerung von Objekten bereits realisiert sind. Die dezentrale Informationsverarbeitung ist durch technische Regelkreise bzgl. MDE und BDE realisiert, wird aber durch eine zentrale Instanz gesteuert.

5.2.2 Gestaltungsempfehlungen

Die Gestaltungsempfehlungen sollen auf Basis der vorangegangenen Erkenntnisse Möglichkeiten aufzeigen, wie die Praxis gemäß den Gestaltungsebenen, -merkmalen und deren -ausprägungen cyber-physische Logistiksysteme konzipieren kann.

5.2.2.1 Systemebene

Wie in Kapitel 2 aus Systemtheorie und Kybernetik erarbeitet, besteht die Aufgabe des Systemmanagements im Aufbau von **Systemzielen, -grenzen und -funktionen**, die auf **Systemelemente** angewendet werden sowie in der kybernetischen Steuerung und Kontrolle von dynamischen, heterarchischen Systemen. Die Systemebene wird im Rahmen der Konzipierung durch die Netzwerk- und Technologieebene zu einem ganzheitlichen, integrierten CPLS entwickelt.

Die Veränderungsdimensionen weisen darauf hin, dass die Unternehmen auf der organisatorischen Ebene begonnen haben, ein ganzheitliches Systemdenken und die Verknüpfung von strategischen und operativen Zielen zu fördern. Für die Auflösung der Bereichsziele wird das Bereichsdenken von Führungskräften und Mitarbeitern zu Gunsten des Systemdenkens aufgegeben werden müssen. Dies gilt auch für die Berücksichtigung des gesamten Beziehungsgeflechts in der Smart Factory. Die Ziele der Fallstudienunternehmen sind die klassischen **strategischen und operativen Ziele**, die in der Haltung und Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit der Logistik sowie der Erfüllung von Kundenanforderungen sowie der Produktivität⁴¹⁵ mit den etablierten Dimensionen der Leistungspyramide Qualität, Kosten und Zeit bestehen. Die empirische Analyse bestätigt die Verfolgung der klassischen Zielpyramide auf der strategischen Ebene. Neben diesen Zielen wurden die Transparenz sowie die Beherrschung der Varianten-, Prozess- und

⁴¹⁴ Wie in Kapitel 3 dargestellt bemisst sich die Intelligenz von Objekten durch Funktionen, Eigenschaften sowie dem Ort der Informationsverarbeitung.

⁴¹⁵ Vgl. Straube (2004), S. 303

Informationskomplexität thematisiert. Die strategischen Ziele lassen sich bis auf die operative Ebene kaskadieren und können im Sinne technischer Regelkreise als Toleranzgrenzen für die Ziele anderer Ebenen betrachtet werden. Für den Aufbau dieser Zielstruktur sowie die Darstellung der Zusammenhänge wird ein kennzahlenbasiertes Zielsystem verwendet. **Logistische Ziele auf operativer Ebene** dienen der kurzfristigen, messbaren Erfolgskontrolle des Instrumenteneinsatzes zur Zielerreichung.⁴¹⁶ STRAUBE empfiehlt für die Erhöhung der Kundenzufriedenheit, die Anzahl kundenindividueller Leistungen, die Lieferzeit/-treue oder Fehlerquoten zu berücksichtigen. Für die Produktivitätserhöhung dienen die Auftragsabwicklungszeit und Wartezeiten (Durchlaufzeit), Kapazitätsauslastungsgrade, Lieferqualität und -service⁴¹⁷ sowie Bestände zur Bewertung der Logistik. Die realisierten operativen Ziele der Praxispartner wurden in der Reduzierung von Beständen, Durchlaufzeiten, Leerfahrten und Buchungsaufwänden sowie der Erhöhung der Auslastung von Ladungsträgern, Betriebsmittel- und Personalkapazitäten festgestellt, d.h. die Fokussierung sollte aus den Bedürfnissen der Operative sowie deren Kennzahlen erfolgen. Zusätzlich haben I4.0-Lösungen einen positiven Einfluss auf die Entlastung der Mitarbeiter von Routinetätigkeiten sowie die Beschleunigung und Verbesserung der Entscheidungsqualität. Strategische und operative Logistikziele aus der Wissenschaft sind kongruent mit denen aus der Empirie. Die strategischen Ziele wirken auf das System in Summe, operative Ziele der Logistikleistung und Logistikkosten dagegen können einzelnen Systemelementen bzw. den daraus gebildeten Produkt-, Objekt- oder Subjektsystemen zugeordnet werden. Des Weiteren kann die in der Veränderungsdimension Systemdenken und Zielkonflikte festgehaltene Entwicklung zur dynamischen Anpassung von Zielen und Aufgaben führen sowie die direkte Aufnahme der Kundenwünsche durch die Integration derselben Potenziale generieren.

Eine der wesentlichen Veränderungen ist die Entgrenzung unternehmerischer Abläufe infolge der in I4.0 entstehenden digitalen Durchgängigkeit. Dadurch wird die Partizipation einer unbegrenzten Anzahl von internen und externen Akteuren in die Leistungserstellung möglich werden. Innerhalb der Fallstudien werden die **Systemgrenzen** insbesondere für die internen Abläufe betrachtet. Systemgrenzen können zur Umgebung, zum Prozess und zu Systemelementen gezogen werden.⁴¹⁸ Die Systemgrenze dieser Arbeit bezieht sich auf die innerbetriebliche Logistik der Smart Factory produzierender Unternehmen, die funktional abgegrenzt wird. Die funktionale Abgrenzung adressiert den KAP. In den Fallstudien wurde für die Digitalisierungsaktivitäten mit der Materialversorgung in der Produktion begonnen. Anschließend wurden Beschaffung, Distribution sowie indirekte Bereiche integriert. Kunden wurden nur z.T. adressiert, Lieferanten im Kontext der Beschaffung. Die Entwicklung von produzierenden Unternehmen zu

⁴¹⁶ Vgl. Schuh und Stich (2013), S. 21

⁴¹⁷ Vgl. Straube (2004), S. 303

⁴¹⁸ Vgl. DIN EN 61069-1 (2014), S. 31

selbstreferentiellen Systemen durch das Internet macht zukünftige Smart Factories durchlässig für den Austausch mit der Außenwelt.

Die Auflösung der Bereiche sowie die Verknüpfung der strategischen mit der operativen Ebene führen zu einer heterarchischen Aufbauorganisation, in der die Systemelemente dezentralisiert und individualisiert werden. Diese Veränderung inkludiert für Subjekte und Objekte die Individualisierung von **Systemfunktionen**. Diese sind aus der logistischen Perspektive die Erfüllung individueller (operativer) Ziele, Planungs- und Steuerungsaufgaben, die bisher der Unternehmensleitebene bzw. den Führungskräften vorbehalten waren, sowie Kernprozesse wie Transportieren etc. Ergänzt werden die anwenderseitigen Funktionen durch die Ausrüsterperspektive. In der Vergangenheit waren technische Funktionen in der Leistungsfähigkeit⁴¹⁹ und damit in der Nutzung begrenzt. Unterschieden werden kann zwischen produkt- und nutzerbezogenen (technischen) Funktionen. Produktbezogene Funktionen beziehen sich auf die „*Wirkung eines Bestandteils eines Produkts bzw. die Wirkung zwischen den Bestandteilen des Produktes zum Zweck der Ausführung nutzerbezogener Funktionen*“. Nutzerbezogene Funktionen stellen die „*Wirkung, die von einem Produkt erwartet wird oder die von ihm ausgeht, um einen Teil eines Bedürfnisses eines bestimmten Nutzers zu erfüllen*“, dar.⁴²⁰ Produkte sind in dieser Analogie I4.0-Techniken, produktbezogene Funktionen die CPS-Funktionen (z. B. Datenerfassung) und nutzerbezogene Funktionen die Eigenschaften. Die Beschreibung von technischen Systemfunktionen erfolgt auf der Technologieebene. Diese werden durch intelligente Objekte und assistierte Entscheider das logistische Leistungsspektrum erweitern.

Im Zentrum der Veränderung durch I4.0 stehen **Systemelemente**, die durch I4.0 auf der operativen/taktischen Ebene infolge der Auflösung der Automatisierungspyramide und den damit verbundenen Veränderungsdimensionen erheblich beeinflusst werden. Die Veränderung von Systemelementen zu den in Kapitel 3 vorgestellten **I4.0-Techniken** wird im Rahmen der Technologieebene vorgenommen. Systemelemente sind im Kontext dieser Arbeit in Subjekte und Objekte unterteilt. **Subjekte** beziehen sich auf interne Kunden (Mitarbeiter). Der Mitarbeiter eines nachgelagerten Prozessschrittes stellt den Kunden des vorgelagerten dar. Verstärkt wird diese Entwicklung in den Unternehmen durch die zentrale Rolle der (Logistik-) Mitarbeiter. In den Fallstudien konnte die zentrale Rolle der Mitarbeiter eruiert werden. Zum einen sind diese zentral in der Funktion des assistierten Entscheiders sowie zusätzlich in der Funktion der Datenaufnahme. Dieses Aufgabenfeld konnte besonders in den Unternehmen A und C festgestellt werden, die sich auf den Aufbau zentraler Integrationsplattformen zur Planung, Steuerung und Kontrolle der Materialversorgung sowie auf manuelle Buchungsvorgänge konzentrieren. A und C nutzen für den Virtualisierungsprozess manuelle Buchungsvorgänge, B und D dagegen halb-/vollautomatische, die den Anteil nicht-wertschöpfender Tätigkei-

⁴¹⁹ Dies war ein Grund für das Scheitern des Ansatzes Computer Integrated Manufacturing.

⁴²⁰ DIN EN 1325 (2014), S. 10

ten senken. Ergebnis ist die Entlastung von Routinetätigkeiten sowie eine durch die Nutzung von Assistenzsystemen gesteigerte Entscheidungsgeschwindigkeit und -qualität. Beide Aufgabenfelder steigern die Dezentralität und Individualisierung. Logistische **Objekte** erfüllen neben ihren Kernprozessen, wie Lagern und Transportieren ebenfalls eine Buchungsaufgabe. Subjekte und Objekte übernehmen demnach neben Ziel- und Aufgabenerfüllung die Funktion des Buchungsvorgangs im Logistiknetzwerk zur Erhöhung von Transparenz, Automatisierung und Reduzierung der Medienbrüche. Aktuell wird bei Mitarbeitern und Transportfahrzeugen durch die dezentrale individuelle Festlegung der Ziele deren Systemrelevanz gestärkt. Die Veränderungsdimensionen Entgrenzung, Integration, Dezentralisierung und Individualisierung beeinflussen den Austausch mit externen Kunden.⁴²¹ Deren Integration kann in der Smart Factory der Zukunft durch die Objektausprägung der **intelligenten Produkte** bzw. Materialien repräsentiert werden. Auch wenn sie den intelligenten Objekten zuordbar sind, werden sie im Rahmen der Gestaltung als drittes Systemelement gesondert dargestellt. Ihre gesonderte Stellung ist in der direkten Repräsentierung des Kundenwunsches und somit dem übergeordneten Ziel von Unternehmung und Logistik begründet. Zudem gilt deren Integration als eine der wesentlichen Neuerungen der Smart Factory und I4.0.

Nach der Festlegung von Zielsetzung und Aufgaben kann das Logistikmanagement **Anforderungen** formulieren. Das Logistikmanagement ist in dieser Arbeit der „Kunde“ der durch I4.0 zur Verfügung gestellten technischen Möglichkeiten. Die Wahrnehmung von Kundenanforderungen resultiert aus dem verinnerlichten Prinzip, die Kundenzufriedenheit zu halten oder zu erhöhen. Die Differenzierung von Kundenanforderungen erfolgt nach dem **KANO-Modell** (Kapitel 4) in Basis-, Leistungs- und Begeisterungsanforderungen. Basisanforderungen werden vom Kunden als vorausgesetzt angenommen, daher werden diese i. d. R. nicht explizit artikuliert und bieten kein Potenzial, die Kundenzufriedenheit zu steigern bzw. sich am Markt zu differenzieren. Die Nichterfüllung führt zu einer drastischen Reduzierung der Kundenzufriedenheit. Leistungsanforderungen sind meist kommuniziert und bieten Potenzial zur Differenzierung, um die Kundenzufriedenheit zu erhöhen. Die Begeisterungsanforderungen sind den Kunden nicht bekannt und werden nicht erwartet. Existieren diese nicht, so ist keine Reduzierung der Kundenzufriedenheit zu befürchten. Existieren diese, bieten sie Potenzial zur Steigerung der Kundenzufriedenheit sowie zur Differenzierung.⁴²² Logistische Leistungen, die über die Basisanforderungen hinausgehen, können die Kundenzufriedenheit erhöhen und gewinnen weiter an Bedeutung.⁴²³ Basisanforderungen sind Anpassungsfähigkeit, Transparenz, standardisierte Lean-Prozesse, Echtzeitfähigkeit sowie die Automatisierung. Leistungsanforderungen konnten ebenfalls identifiziert werden: Datensicherheit und -schutz, Ergonomie, Internet- und Intranetfähigkeit, standardisierte Konnektivität

⁴²¹ Externe Kunden können Endkunden, Kundenmitarbeiter, Inhaber, Aktionäre oder andere Fabriken darstellen, werden in dieser Arbeit aber vernachlässigt.

⁴²² Vgl. Benz (2008), S. 35 ff.; Jochem et al. (2015), S. 83 ff.

⁴²³ Vgl. Pfohl (2010), S. 33

sowie die Identität. Begeisterungsanforderungen und die damit verbundene Leistungsfähigkeit sind dem Kunden i. d. R. nicht bekannt und stellen in dieser Arbeit die Eigenschaften (Technologieebene) dar. Innerhalb der Basisanforderungen konnten in den Fallstudien unterschiedliche Präferenzen identifiziert werden. Während die Standardisierung der Prozesse sowie die Transparenz angestrebt werden, ist die Echtzeitfähigkeit interner Abläufe bei keinem Unternehmen zu 100 % umgesetzt worden. Dies hat direkten Einfluss auf die Identifikation und Lokalisation (Identität) von Objekten und Subjekten sowie auf die Planungs- und Steuerungsparameter. Die Realität wird somit nach wie vor mit Zeitverzug abgebildet und der tatsächliche Status, wie z. B. der Ort, ist nur an vorgegebenen Punkten abrufbar. Echtzeitfähigkeit unterliegt allerdings der spezifischen Anforderung im Unternehmen und korreliert mit einer Datenzunahme, je echtzeitfähiger ein System ist. Ähnlich wie bei der Dezentralität ist hier ebenfalls die 100 %-Echtzeitfähigkeit in Abhängigkeit vom Anwendungsfall zu bewerten. Technische Leistungsanforderungen wurden nur bei Unternehmen A in Form des Intranets der Dinge kommuniziert. Die standardisierte Konnektivität und Identität gelten als wichtige Basis von I4.0, stehen für erste Aktivitäten aber nicht im Fokus. Datensicherheit und -schutz wurden ebenfalls nur im Rahmen externer Partner angesprochen, die im Auftrag der Unternehmen die Systeme auf ihre Sicherheitsarchitekturen hin überprüfen. Abbildung 34 fasst die Systemebene zusammen.

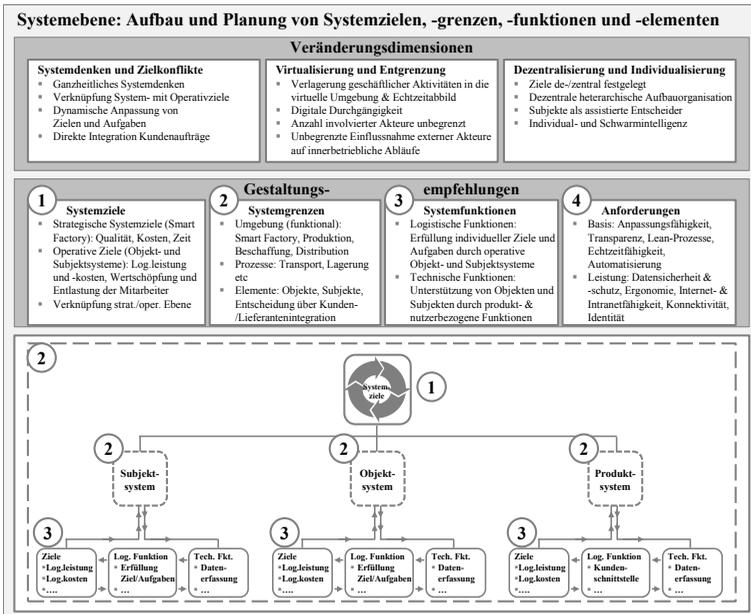


Abbildung 34: Gestaltungsebene: SYSTEM⁴²⁴

⁴²⁴ Eigene Darstellung.

Die Entscheidung, welche Systemelemente betrachtet werden, ist z. T. durch die vorliegende Prozessstruktur determiniert. I4.0 wird sukzessive in bestehende Fabriken implementiert werden. Die Ist-Aufnahme von Grenzen, Elementen und Funktionen ist ein wesentlicher Schritt, bevor Aufgaben und Ziele auf die Elemente verteilt werden können. Die Verteilung auf Kanten und Knoten sowie deren Verknüpfung ist Teil der Netzwerkebene.

5.2.2.2 Netzwerkebene

Ziel des Netzwerkmanagements ist der Aufbau von Kanten und Knoten in innerbetrieblichen Netzwerken. Dies erfordert in einem ersten Schritt die Diskussion der Arbeitsteilung von Objekten und Subjekten, zweitens die Auseinandersetzung mit Abhängigkeiten, um Zielkonflikten vorzubeugen. In einem dritten Schritt wird die Vernetzung der I4.0-Techniken zu einem System aus Systemen thematisiert. Durch ihren Schnittstellencharakter enthält die Netzwerkebene Aspekte von Anwendern wie von Ausrüstern. Für die Gestaltung wird sich an den vier Phasen des Netzwerkmanagements **Selektion**, **Allokation**, **Regulation** und **Evaluation** nach SYDOW⁴²⁵ orientiert und auf innerbetriebliche Netzwerke übertragen.

Während auf der Systemebene logistische Objekt- und Subjektsysteme identifiziert werden, soll das Netzwerkmanagement im Rahmen der **Selektion** deren Art, Anzahl sowie Zielbeitrag planen helfen. Durch den integrativen, vernetzenden Charakter der Netzwerkebene erfolgt die Selektion aus der Perspektive der Logistik, während die Ausstattung der Objekte und Subjekte mit der nötigen technologischen Lösung zur Zielerreichung auf der Technologieebene erfolgt. Die Auswahl logistischer Subjekte und Objekte, die in der Materialversorgung (Beschaffung und Produktion) zum Einsatz kommen, erfolgte fallstudienübergreifend identisch. Nach assistiertem Entscheider, Transportfahrzeugen und Bereitstellungsflächen werden Ladungsträger und Läger integriert, in Unternehmen B und D zusätzlich Lieferanten und z. T. Kunden. Bis auf Unternehmen D handelt es sich nicht um Grüne-Wiese-Fabriken, d. h. Objekte und Subjekte sind prozessbedingt bereits vorhanden und werden erweitert. Der Zielbeitrag ist abhängig von der strategischen Ausrichtung und bemisst sich neben dem Einfluss auf operative Kennzahlen an dem Beitrag zur digitalen Durchgängigkeit, zur Integration in Material- und Informationsflüssen sowie zur Vernetzung von Objekten und Subjekten durch den Aufbau von Integrationsplattformen.

Zentrale Unternehmensstrukturen werden zu Gunsten dezentraler Elemente verändert werden, indem Kompetenzen den operativen Ebenen zur Verfügung gestellt werden. Dies stellt eine wesentliche Neuerung bei der Übertragung netzwerktheoretischer Ansätze auf Objekte und Subjekte dar. Die angesprochene Auflösung von Bereichszielen zur Verknüpfung von System- und Operativzielen wird Entscheidungen sowie Maß-

⁴²⁵ Vgl. Sydow (2003), S. 312 ff.

nahmen automatisieren bzw. deren Ausführung auf assistierte Entscheider und intelligente Objekte der operativen Ebene übertragen. Dies bedeutet, dass intelligente Objekte in die Arbeitsbereiche des Personals vordringen bzw. mit ihnen kollaborativ arbeiten. Die **Allokationsphase** versucht diesem Umstand Rechnung zu tragen, indem die Befähigung von I4.0-Techniken für die Zielerreichung geplant werden soll. Ausgehend von Systemzielen sowie den logistischen und technischen Systemfunktionen ist es notwendig, für jedes intelligente Objekt sowie jeden assistierten Entscheider eine Qualifikationsmatrix abzuleiten. In dieser werden (operative) Logistikziele und -aufgaben sowie Ressourcen individuell für jedes operative Element festgelegt. Transportfahrzeuge besitzen z.B. individuelle Ziele bzgl. des spezifischen Ortes und Lieferzeitpunktes des Produktes, Lager und Behälter bzgl. des Meldebestandes. Die Eigenschaften befähigen insbesondere intelligente Objekte, selbstständig logistisch zu planen, zu steuern und zu kontrollieren. Dadurch werden sie in die Lage versetzt, mit anderen Objekten angepasste Zielwerte bzw. deren Toleranzgrenzen in der Systembetrachtung auszuhandeln sowie Maßnahmen wie der selbstständige Bezug nötiger Dienste aus der Cloud oder eine Ad hoc-Planung durchzuführen. Für die Konzeptionierung hat das zur Folge, dass intelligente Objekte bzgl. der Aufgabenerledigung als „gleichberechtigte“ Akteure das Personal ergänzen. Die Arbeitsteilung hat durch die technische Integration somit eine Steigerung der Abhängigkeiten zur Folge. Die Elemente tauschen Eingangs- bzw. Ausgangsgrößen wie z.B. Leistungen zu einem definierten Marktpreis miteinander aus. Dadurch entsteht eine Modularisierung von dezentralen Einheiten, die individuelle Ziele verfolgen und eine eigene Ergebnisverantwortung besitzen.⁴²⁶ Abhängig von z.B. der Zielkonformität oder der Anzahl gleicher Elemente können diese für die technische Auslegung zu Systemen zusammengefasst werden. Die empirische Analyse hat gezeigt, dass die Auflösung von Bereichszielen zu Gunsten der Vernetzung von strategischen (hier das System Smart Factory) und operativen Zielen präferiert wird. Ebenfalls eruierte die Empirie, dass entgegen dem wissenschaftlichen Verständnis in I4.0 die vollständige Dezentralisierung von Objekten und Subjekten keinen Selbstzweck darstellen sollte. Wie de-/zentrale Software zur Verfügung stehen soll, ist abhängig von logistischen Anforderungen, wie der Echtzeitfähigkeit, sowie technischer Herausforderungen wie der Systemstabilität. Zusätzlich müssen finanzielle und infrastrukturelle Ressourcen berücksichtigt werden. Die Allokation kann somit die Entscheidung über den Ort der Informationsbereitstellung und de-/zentrale Informationssysteme determinieren.

Durch I4.0 kann eine unbegrenzte Anzahl von Dingen, Daten, Diensten und Menschen miteinander in Austausch treten. Die geformten Netzwerke schwanken in der Anzahl und in der Abhängigkeit benötigter Ressourcen zur Deckung der Kundenbedarfe. Die Fallstudien wiesen auf die positiven Effekte bzgl. der Prozesstransparenz hin, betonten allerdings Abhängigkeiten und die aufwendige Systemfehleranalyse bei Störungen. Die Vermeidung oder Abmilderung von Zielkonflikten durch äußere und innere Einflüsse

⁴²⁶ Vgl. Thom (2007), S. 26

kann durch die Definition von nicht-/technischen Verhaltensregeln bzw. Standards gewährleistet werden. Die Standardisierung wird in der Phase der **Regulation** für das Netzwerk festgelegt. Sie können in Normen, Regularien und Verträgen festgelegt werden. Diese sind wichtig, um mögliche Zielkonflikte bei der Szenarientwicklung vorab definieren zu können. In Unternehmen A wurde die höhere Zielpriorität (Logistikleistung) des Behältersystems gegenüber dem Maschinensystem (Energieeffizienz) thematisiert. Das Zusammenrücken unterschiedlicher intelligenter Ökosysteme in I4.0 zeigt sich hier. Dafür wird eine Ziellhierarchie erforderlich, die dem Wunsch nach Dezentralität und Autonomie, d. h. nach Individualisierung entgegensteht, um strategische Systemziele nicht zu gefährden. Dieser Konflikt betrifft Objekte gleichermaßen wie Subjekte (Auflösung Bereichsziele Unternehmen B). Aus diesem Sachverhalt leiten sich Entscheidungshierarchien ab, die z. B. nach dem finanziellen oder zeitlichen Risiko bewertet werden können. Entscheidungen in Verbindung mit Zielrestriktionen, die in Routinen/Szenarien und somit in Algorithmen abgebildet werden können, werden zum Großteil automatisiert. Für Zielkonflikte durch unvorhergesehene Störungen (also nicht in Szenarien abgebildet), bei denen Entscheidungen für Akteure gleich gut/schlecht oder für den einen gut und für den anderen schlecht sind, müssen ebenfalls Verhaltensregeln z. B. in Form von Bonus- und Malussystemen definiert werden. Ziel ist der konfliktfreie Austausch und die klare Regelung der „*Entscheidungshoheit*“ zwischen dem assistierten Entscheider, den intelligenten Objekten und den strategischen Zielen. Unternehmen B realisiert dies durch die Einschränkung der (Entscheidungs-) Freiheitsgrade des Personals unter Berücksichtigung des Systemoptimums. Die Maßnahmen dienen dem assistierten Entscheider als Rahmen für die Entscheidungsfindung, der letztlich eine standardisierte Toleranzgrenze darstellt. Für Entscheidungen außerhalb der Vorgaben wird der Mensch vorerst unabdingbar sein. Sollten Kognition und KI ebenfalls auf Objekte angewendet werden, wird dies auch die Entscheidungen bei Nicht-Routinetätigkeiten betreffen. Die Regulation von unvorhergesehenen Entscheidungssituationen wird dann an Relevanz zunehmen, wenn die Kundenzentrierung und deren Möglichkeiten zur direkten Einflussnahme zunehmen. Abhängig von der Kostenverursachung einer Entscheidung können Maßnahmen automatisiert bewertet werden, um die Entscheidungsqualität zu steigern.

Dieses Vorgehen hat Relevanz für die **Evaluation**. Sie dient der kontinuierlichen Erfolgskontrolle von Elementen, Systemen oder Netzwerken. Sie kann sich somit auf einzelne Verbindungen oder auf das gesamte Netzwerk beziehen. Die Evaluation wird z. B. hinsichtlich des individuellen Leistungsbeitrages des Behältersystems überprüft. Die Verknüpfung kann auf Basis von Kennzahlen (Zielen) oder qualitativen Einflussgrößen erfolgen. Die Ausführung von Planungs- und Steuerungsaufgaben oblag bisher vorwiegend Subjekten (mit Ausnahme einfacher Regelkreise), wird in I4.0 aber sukzessive für Objekte zugänglich oder durch Plattformen automatisiert. Transportrouten sowie Bereitstellungsflächen oder Behältereinheiten sind limitierte Güter, so dass in Abhängigkeit

vom Kunden und der Ressourcenbeschränktheit die Systemziele nicht gefährdet werden dürfen. Im Sinne von I4.0 werden die Definition von Toleranzgrenzen und die Selbststeuerung mittels einfacher technischer Regelkreise umgesetzt (Abtransport Voll-/Leergut Unternehmen A oder eKanban Unternehmen B). Analog zur Systemtheorie ist der technische Regelkreis der Kybernetik auf offene, geschlossene oder selbstreferentielle Systeme anwendbar. Zur Gewährleistung von Steuerung und Kontrolle kann das SCEM auf Grundlage von u. a. Kennzahlensystemen verwendet werden. Es wurde für IKT-Systeme und die Realisierung im technischen Regelkreis entwickelt, um z. B. verbrauchs- oder ereignisgesteuerte Auftragsfreigaben zu ermöglichen. Dieser Regelkreis dient der Überwachung von Soll-Ist-Abweichungen, indem z. B. individuelle Ziele mit den Gesamtzielen abgeglichen werden, um eventuell Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Am Ende des Prozesses fließen Informationen wieder in den Anfangszustand für eine etwaige Zielanpassung ein (Rückkopplung).⁴²⁷ Das SCEM kann somit die Entwicklung eines selbstorganisierenden Systems unterstützen.

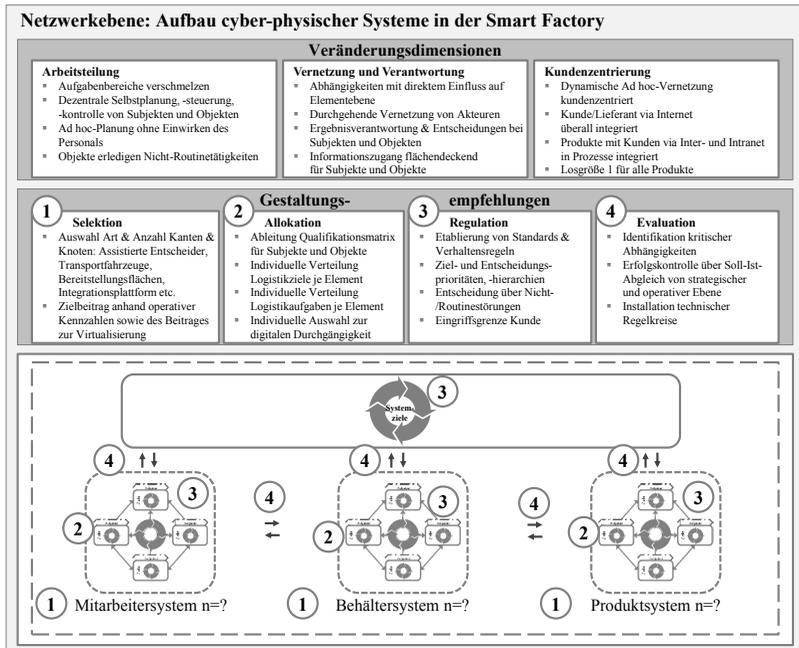


Abbildung 35: Gestaltungsebene: NETZWERK⁴²⁸

Neben der individuellen Verteilung und Verlagerung von Zielen und Aufgaben auf die operative Ebene, erfolgt in der Netzwerkgestaltung die Vorarbeit für die Vernetzung via Integrationsplattformen einzelner Objekte zu Objektsystemen (analog Produkte und

⁴²⁷ Vgl. Bensel et al. (2008), S. 8 ff.

⁴²⁸ Eigene Darstellung.

Subjekte) und die Abstimmung dieser mit den Systemzielen. Die Realisierung mittels I4.0-Technologien erfolgt auf der Technologieebene.

5.2.2.3 Technologieebene

Mit Hilfe der **Technologieebene** fließen die logistischen Anforderungen in die Technologieauswahl ein. Die Befähigung der Leistungserstellung durch geeignete Technologien zu adäquaten Kosten und Zeitpunkten bildet die Aufgabe des Technologiemanagements. Aus Sicht der industriellen Logistik werden Anforderungen an diese Technologien gestellt, die das Technologiemanagement bei der Auslegung technischer Systeme berücksichtigen muss. Diese technischen Systeme wurden in dieser Arbeit als **Industrie 4.0-Techniken** definiert. Diese Techniken konnten mittels des übergeordneten Konzeptes des Internet of Everything als **assistierte Entscheider** (Menschen), **intelligente Objekte** (Dinge) sowie **Integrationsplattformen** (Dienste und Daten) systematisiert werden. Die Ausgangslage der technologischen Gestaltungsmerkmale bilden die definierten Ziele, Grenzen, Elemente und Funktionen der Systemebene, die über die Netzwerkebene detailliert in der Technologieebene zu integrierten, vernetzten und intelligenten I4.0-Techniken konzipiert werden.

Das zentrale „intelligente“ Systemelement ist der **assistierte Entscheider**. Aktuell ist die Nutzung von Assistenzsystemen für das Logistikpersonal fallstudienübergreifend im Einsatz. In allen Fallstudien kommen mobile Endgeräte wie Tablets und Smart Phones zum Einsatz, wobei Mitarbeiter mit festem Einsatzort mehrheitlich mit Tablets (teilweise abnehmbare Terminals) und ortsungebundene Mitarbeiter mit Smart Phones unterstützt werden. Dieses Mobile Computing wird durch weitere Assistenz in Form von Sprach-, Gesten-, Objekt- und Mustererkennung sowie Augmented oder Virtual Reality (Kapitel 3) ergänzt. Smart Glasses befinden sich in der Erprobung, diesen wird aber bisher nicht genügend Potenzial beigemessen. Die Zunahme von Intelligenz und Leistungsfähigkeit ist bei assistierten Entscheidern insbesondere durch die Integration mittels der Assistenzsysteme in die Material- und Informationsflüsse begründet. Aus der Perspektive der technischen Integration übernehmen Assistenzsysteme die Aufgabe von smarten Sensoren und Aktoren für das Personal. Zusätzlich unterstützen sie durch die Visualisierung der Abläufe deren Entscheidungsfähigkeit. Durch Assistenzsysteme werden Mitarbeiter somit selbst zum CPS. Über Tablets und Smart Phones können assistierte Entscheider auf die Daten und Dienste der Integrationsplattformen zugreifen, um über Smart Data-Anwendungen z. B. Prognosen für die verbrauchsorientierte Programmplanung zu erhalten. Der Ort der Informationsverarbeitung kann somit auf einer de-/zentralen Integrationsplattform oder auf dem mobilen Gerät erfolgen. Bei intelligenten Objekten kann die Verarbeitung inhärent oder ebenfalls auf der de-/zentralen Plattform erfolgen.

Cyber-physische Systeme lassen intelligente Objekte entstehen. Die Intelligenz von Objekten wird durch Funktionen, Eigenschaften sowie den Ort der Informationsver-

beitung determiniert. Querschnittstechnologien liefern die Basis für Komponenten und ermöglichen produktbezogene Funktionen (smarte Sensoren: identifizieren & erfassen, Mikrocontroller und -prozessor: speichern, analysieren & entscheiden, smarte Aktoren: reagieren sowie HMI: darstellen) sowie die Integration intelligenter Objekte in Material- und Informationsflüsse. Die Integration der Komponenten ist in den Fallstudien mehrheitlich in Maschinen und Anlagen (Betriebsmittel) erfolgt. Intelligente logistische Objekte nach wissenschaftlichem Verständnis sind über IDT und weniger über CPS integriert, weswegen sie eine eher geringe Intelligenz aufweisen. Verantwortlich für die Integration ist demnach hardware-seitig die Ausstattung mit IDT und softwareseitig die Nutzung von Integrationsplattformen. Integriert auf der Objektseite sind Ladungsträger, Transportfahrzeuge, Lager sowie Anliefer- und Ablieferflächen. Die Fallstudien haben gezeigt, dass diese Nutzung von IDT bei Objekten und Mobile Computing bei Subjekten die gängige Lösung im Rahmen der Intelligenz, Leistungsfähigkeit und Integration ist. Verfolgt wird damit die Virtualisierung, die die Reduzierung der Medienbrüche ebenfalls durch das Personal ermöglicht.

Neben der Virtualisierung durch IDT tragen die Unternehmen dem Aufbau der Infrastruktur und damit der Integration und Vernetzung der Systemelemente intern durch **Integrationsplattformen** Rechnung. Ausgangspunkt waren in Unternehmen A die Maschinen, die die zentrale Infrastruktur mit der Integrationsplattform bilden. Die Erweiterung auf logistische Objekte wurde nach der Entwicklung der zentralen Infrastruktur forciert. Unternehmen C etablierte eine interne Planungs- und Steuerungsplattform, visualisiert an einem Bildschirm, und baute währenddessen die Buchungsinfrastruktur kontinuierlich aus. Unternehmen B nutzt für den Virtualisierungsprozess eine Kombination aus RFID-Tags und -Gates sowie eKanbans. Auf Integrationsplattformen werden unterschiedliche **Anwendungen** zur Verfügung gestellt. Diese sind z. B. infrastruktur-seitig das Cloud Computing. Auf dieser Infrastruktur werden Dienste zur Verfügung gestellt, die von Objekten sowie Subjekten via Assistenzsystem abgerufen werden. Dienste nach dem Verständnis aus Kapitel 3 können auf Basis der Fallstudien bestätigt und erweitert werden. Im Fokus stehen u. a. Analysewerkzeuge wie das Predictive Computing zur Erhöhung der Prognosefähigkeit oder das Condition Monitoring zur Zustandsüberwachung. Mittels Big und Smart Data bzw. den daraus abgeleiteten Advanced Data Analytics bieten Integrationsplattformen Dienste in Form von Entscheidungsempfehlungen an. Empfehlungen lassen sich auf Basis von Wahrscheinlichkeiten sowie Prognoserechnungen ableiten oder aus event-basierten Störungen gewinnen. I4.0 dynamisiert u. a. aufgrund von Automatisierung und Echtzeitfähigkeit die Entscheidungsprozesse. Neben der Beschleunigung konnte fallstudienübergreifend die Verbesserung der Entscheidungsqualität eruiert werden. Die Kombination aus Diensten, Assistenzsystemen sowie Integrationsplattformen unterstützt alle Unternehmen. Die Lösungen und Dienste von z. B. Unternehmen A und B werden ebenfalls externen Kunden angeboten. Zur weiteren Kundenintegration kommen Konfigurationssysteme zum Ein-

satz, die die Einflussnahme des Kunden auf den Erstellungsprozess bis zu einem definierten „*Point of no Return*“ ermöglichen. Dabei existiert die Möglichkeit – sofern ablauftechnisch realistisch – gewünschte kurzfristige Änderungen gegen Aufpreis als zusätzlichen Dienst anzubieten oder für A-Kunden Dienste kostenlos zur Verfügung zu stellen. Für die Entscheidung über den Dezentralisierungsgrad von Diensten kann die Nutzungshäufigkeit von Diensten und Daten durch Objekte oder Subjekte einen Hinweis darauf liefern, welche Anwendung exklusiv und dezentral sinnvoll ist oder zentral für das Netzwerk nutzbar sein soll. Die Entscheidung hat Einfluss auf mögliche Lizenzierungsfragen, auf eine dynamische Software-Verschiebung zwischen den Cloud-Hierarchien sowie die Belastung der Infrastruktur. Wissenschaft und Praxis sind sich einig, dass sich die Automatisierungspyramide im Kontext von I4.0 auflösen wird. Kein einheitliches Verständnis herrscht über die Rolle der logistischen Informationssysteme, die Einfluss auf Leistungsfähigkeit sowie auf die Systemauslegung haben. Einige Unternehmen treiben die Implementierung von BDE, MDE und MES voran, während andere diese reduzieren. Einige Autoren bewerten das MES als zentrales Informationssystem in der Smart Factory der Zukunft, in dem es für die echtzeitbasierte Lenkung und Steuerung (durch BDE/MDE) von Produktionsabläufen verantwortlich wird.⁴²⁹ Unternehmen A z. B. nutzt das MES als zentrale Integrationsplattform zur Integration von strategischer und operativer Ebene. Andere Autoren erwarten dagegen einen Wegfall des klassischen MES.⁴³⁰ Die Funktionen von BDE/MDE wurden bei den Fallstudien infolge von Auto-IDT teilweise aufgelöst, vollautomatisiert bzw. durch das Personal ausgeführt. Die Verlagerung von Planungsaufgaben der oberen Ebenen auf die Operative erfolgt bereits (z. B. Ad hoc-Planung). Dezentralisiert sich die Pyramide, werden auch LIS bzw. einzelne Funktionen dezentral auf Clouds als Dienste zur Verfügung stehen können, um bei Bedarf von intelligenten Objekten oder assistierten Entscheidern abgerufen zu werden.

Im Kontext von I4.0 ermöglichen die technische Integration von Objekten und Subjekten und deren Ausstattung mit **Eigenschaften** (nutzerbezogenen Funktionen) die Erhöhung der Intelligenz und Leistungsfähigkeit, um klassische Zielgrößen zu optimieren und neue Anwendungsgebiete zu erschließen. In Anlehnung an die empirische Analyse konnten die Eigenschaften priorisiert werden. Eigenschaften wurden in Kapitel 4 als Begeisterungsanforderungen deklariert, da sie im jetzigen Stand dem Unternehmen z. T. nicht bekannt sind und deshalb Potenzial bieten, die Kundenzufriedenheit zu erhöhen. Adaptivität, Entscheidungsfähigkeit für assistierte Entscheider sowie die Selbststeuerung traten bei allen vier Fallstudien auf und wurden auch bei der Gruppenbefragung als relevant erachtet. Die Reaktivität als auf den Kunden gerichtete Eigenschaft hängt von der Integration desselben in die Smart Factory ab und wurde in der Gruppenbefragung als wichtigste Eigenschaft bewertet. Die Reaktivität wurde für die I4.0-Techniken Be-

⁴²⁹ Vgl. Schließmann (2014), S. 460

⁴³⁰ Vgl. Stich et al. (2013), S. 271 f.

triebsmittel, Transportfahrzeuge, Produkte sowie assistierte Entscheider als wichtigste Eigenschaft ermittelt. In den Fallstudien wurde diese als wichtig erachtet, befindet sich aber nicht im Fokus der Umsetzung. Aufgrund des Charakters von I4.0 und der empirischen Analyse wurde die Reaktivität in dieser Arbeit mit höchster Priorität bewertet. Mit zweiter Priorität konnten die Eigenschaften Integrationsfähigkeit, (Teil-) Autonomie, Selbstplanung sowie die Entscheidungsfähigkeit von Objekten identifiziert werden. Die Integrationsfähigkeit ist bei Unternehmen (A und C) von zentraler Bedeutung, da sie die I4.0-Aktivitäten mit der Entwicklung von Integrationsplattformen begannen. In der Gruppenbefragung wurde die Eigenschaft insbesondere bei Lägern und Ladungsträgern favorisiert. Zudem können Ladungsträger als Schnittstelle zu Lieferanten und Kunden dienen, um im Sinne der horizontalen Integration die Verbindung „nach außen“ voranzutreiben. Die anderen drei Eigenschaften dieser Priorität sind bei Unternehmen mit dynamischen Abläufen und bei den Unternehmen B und D mit einem ausgeweiteten Automatisierungsgrad sowie Auto-ID-Lösungen im Einsatz. Die Selbstplanung ist in der Gruppenbefragung als nicht wichtig erachtet worden. In Fallstudie B ist die automatische Mengenplanung dagegen zu Gunsten einer Ad hoc-Planung durch die direkte Anbindung des Lieferanten gänzlich aufgehoben. Diese Form der Entscheidungsfähigkeit bezieht sich ebenfalls auf Routinetätigkeiten, die durch technische Regelkreise Bestellungen auslösen können. Unternehmen D bietet eine ähnliche Anwendung in Bezug auf das Lager und den Lieferanten. Beide Unternehmen integrieren zusätzlich die Kapazitätsplanung, um die Einlagerung in Supermarkt bzw. Wareneingangslager zu ermöglichen. Bei Unternehmen A und C obliegt die endgültige Entscheidung den assistierten Entscheidern, die Planungsszenarien in Form von Entscheidungsgrundlagen erhalten. Auch wenn kognitive Fähigkeiten sowie KI und dadurch die Entscheidungsfähigkeit außerhalb von Routinetätigkeiten in den Unternehmen nicht festgestellt werden konnte, wurde deren kommende Bedeutung von der Praxis betont. Die damit verbundene Entwicklung zu selbstorganisierenden und lernenden Systemen, die z. B. Toleranzgrenzen und/oder Zielwerte ohne das Wirken des assistierten Entscheiders anpassen, wird zu noch ungeahnten Anwendungen führen.

Technologieebene: Überführung logistischer Anforderungen in Referenzarchitektur

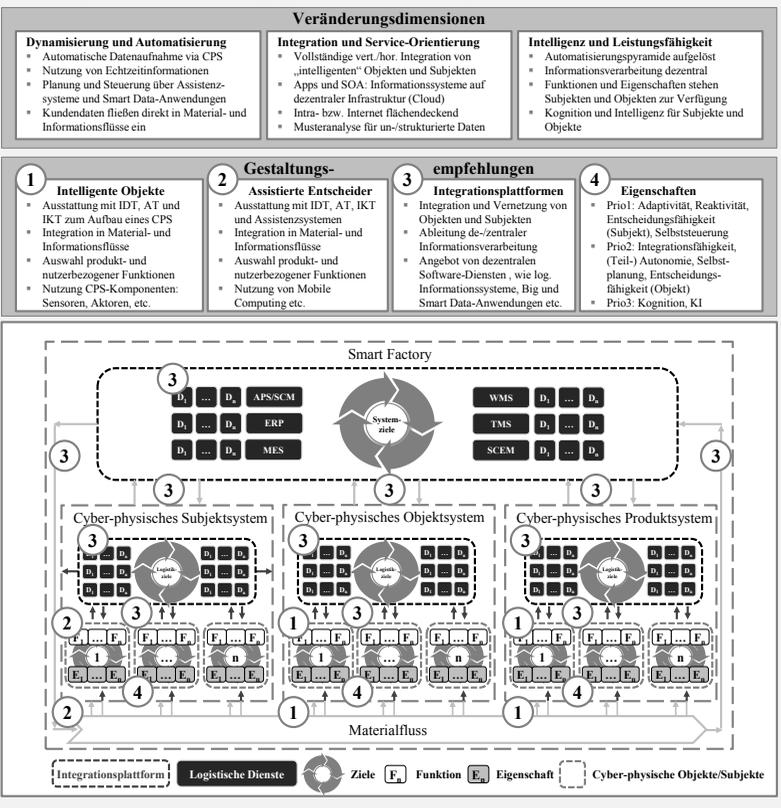


Abbildung 36: Gestaltungsebene: TECHNOLOGIE⁴³¹

Abbildung 36 stellt das CPLS als System von Systemen dar, in dem die Smart Factory als übergeordnetes System eigene (strategische) Ziele, das jeweilige System taktische/operative und das jeweilige Element operative Ziele besitzt. Neben den in den Integrationsplattformen hinterlegten Daten (Ziele) befinden sich Dienste zur Datenanalyse bzw. deren Auswertung sowie LIS (siehe Tabelle 3). Die Smart Factory kann als System (oder Kunde) auf Daten und Dienste zugreifen und einen kontinuierlichen Zielabgleich mit den Subsystemen vornehmen, um gegebenenfalls über Gegenmaßnahmen durch eine Anpassungsplanung vorzunehmen. Der Zugriff auf die LIS-Dienste kann modular nach der Logik von SOA oder auf mobilen Geräten als Apps erfolgen, in denen Dienste wie Mengen- oder Terminplanung bereitstehen. Die drei Subsysteme der Smart Factory bestehen in cyber-physischen Subjekt-, Objekt- und Produktsystemen. Kriterien für die Bündelung zu Systemen können gleiche Kunden, Ziele, Aufgaben, LIS etc. dar-

⁴³¹ Eigene Darstellung.

stellen. Die regulatorische Vernetzung aufgrund von Austauschbeziehungen sowie die technische Vernetzung infolge von Evaluationsprozessen vernetzen diese Systeme miteinander zu einem System aus Systemen. Die Systematisierung von Zielen, Aufgaben und Prozessen in den Profilen je Element unterstützt die Entscheidung nach der de-/zentralen Auslegung des CPLS. So wird z. B. die Entscheidung, welche LIS exklusiv auf einem Element oder exklusiv in einem System oder durch eine zentrale Cloud-Infrastruktur für das gesamte CPLS zur Verfügung stehen soll, unterstützt. Jedes System für sich kann wie die Smart Factory eigene Systemziele besitzen sowie Daten und Dienste auf einer (dezentralen) Integrationsplattform, die den Zielabgleich zu den übergeordneten Smart Factory-Zielen vornimmt, abrufen. Diese Integrationsplattform auf Systemebene wird ihrerseits den Kennzahlenabgleich zu möglichen Individualzielen auf der niedrigsten Systemebene durchführen. Auf dieser operativen Feldebene besitzt jedes Objekt, Produkt oder Subjekt seine Individualziele, die mit den Systemzielen rückgekoppelt werden, wie es der Logik der Kybernetik erster und zweiter Ordnung entspricht. Diese Charakteristika weisen Parallelen zu der von *BAUERNHANSL* angesprochenen „*Fraktalisierung*“ auf. Inwiefern logistische Elemente untereinander bi- oder multidirektional in Austausch treten, d. h. vollständig dezentral sind oder über eine zentrale Instanz (Integrationsplattform) mit höheren Ebenen vernetzt sind, kann nicht abschließend geklärt werden. Im Sinne der empfohlenen Bandbreitenreduzierung wie in den Anwendungsfällen eruiert, ist von einer 1:1-Vernetzung abzusehen. Auf intelligenten Objekten bzw. Subjekten befinden sich die spezifischen Funktionen und Eigenschaften zur Gewährleistung von Ziel- und Aufgabenerfüllung gemäß den logistischen Anforderungen. Die Belegung der Einheiten mit Funktionen und Eigenschaften kann modular aufgebaut sein, da die Notwendigkeit ebenfalls in Abhängigkeit vom Anwendungsfall schwanken kann. Diese Detaillierung hat direkten Einfluss auf die Wahl der Komponenten des CPS, was die Komplexität des Systems reduziert. Gemäß der CPS-Definition ist der Prozess bzw. der Materialfluss nicht Teil eines CPS und daher außerhalb dargestellt. Durch Sensoren und Aktoren stehen diese jedoch miteinander im Austausch.

Nachdem in Abschnitt 5.2 die Konzeptionierung ausgehend von Veränderungsdimensionen in Gestaltungsempfehlungen übersetzt wurde, werden im Abschnitt 5.3 Gestaltungsfelder in Gestaltungsempfehlungen zur Entwicklung von CPLS genutzt.

5.3 Entwicklung

Die Entwicklung stellt den zweiten Teil der Gestaltung dar, in der zunächst identifizierbare Gestaltungsfelder auf Basis der empirischen Analyse beschrieben werden. Die Erkenntnisse werden genutzt, um Gestaltungsempfehlungen für die Entwicklung cyberphysischer Logistiksysteme aufzuzeigen.

5.3.1 Gestaltungsfelder

Abgeleitet und motiviert auf Basis der empirischen Analyse konnten vier Gestaltungsfelder identifiziert werden, die fallstudienübergreifend für die Entwicklung von CPLS berücksichtigt werden sollten: Fokussierung auf (klassische) Zielgrößen, Standardisierung der Prozesse, Technologieauswahl zur Virtualisierung der Prozesse sowie Einstellungen und Verhalten der Mitarbeiter.

5.3.1.1 Fokussierung auf (klassische) Zielgrößen

I4.0 wurde – zumindest in den Fallstudien – aufgrund der skizzierten Erwartungen durch die Führungskräfte der Unternehmensleitenebene motiviert. Diese Ebene ist für die Vorgabe von Strategien, Missionen und Visionen zuständig, die die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit als übergeordnetes Ziel mit den klassischen Zielgrößen Kosten, Zeit und Qualität verfolgt. Im Rahmen dieser Ausrichtung wurden technische Lösungen im Kontext von I4.0 als Werkzeug zur Optimierung dieser Zielgrößen in Produktion und Logistik identifiziert. Zur Rahmensetzung wurden Digitalisierungsstrategien formuliert. In diesem Kontext werden standortübergreifend Digitalisierungsaktivitäten unter dem Dach I4.0 gebündelt und darauf aufbauend Projektlandkarten entwickelt. Die Unternehmen A, B und C entwickelten die Strategie aus den operativen Problemen heraus. Die Unternehmen betonten, dass die Definition von Zielen große Relevanz besitzt, aus Gründen der Anwendungsorientiertheit in einem neuen Technologiefeld nicht „überakademisiert“, sondern eng an den Anforderungen der Operative ausgerichtet werden sollte. Wie bereits beschrieben, betrachtet die Praxis I4.0 und deren Technologien als Mittel zum Zweck, die klassischen Optimierungsbereiche gemäß der funktionalen Abgrenzung und den operativen Zielen weiter zu verfolgen. Daher wurden Optimierungsziele aus der strategischen und operativen Perspektive mittels Ziel- und Kennzahlensystemen operationalisiert.

5.3.1.2 Standardisierung der Prozesse

Ziel von I4.0 ist die digitale Durchgängigkeit durch die Reduzierung von Medienbrüchen. Dafür ist es nötig, prozessorientiert die Transparenz von Material- und Informationsflüssen in der Smart Factory zu gewährleisten. Die Ausrichtung der Material- und Informationsflüsse nach Lean-Prinzipien hat neben standardisierten Prozessen das Ziel, stabile und robuste Prozesse zu gestalten. Erreicht wird dies durch die Erhöhung des Anteils wertschöpfender Tätigkeiten durch verschwendungsarme Abläufe. Eine Grundlage bietet die Standardisierung, die Flüsse vorhersehbar und damit planbar macht. Damit kann eine verlässliche Prozess- und Informationsinfrastruktur für CPLS aufgebaut und deren Komplexität reduziert werden. Das Lean Management wurde von allen Gesprächspartnern als zwingende Voraussetzung für die Virtualisierung der Fabrik thematisiert. Die Aussage: „*Schlechte Prozesse werden durch I4.0 nicht unbedingt besser*“ beschreibt die Situation eindeutig. Eine Methode zur Neuauslegung bzw. Standardisie-

rung von Logistikprozessen ist das Wertstromdesign. Dieses kann bereichs- und prozessübergreifend zur visuellen Unterstützung die Entwicklung einer Ist- und Soll-Prozesslandschaft fördern, in der die Offenlegung von Schwächen logistischer Abläufe sowie deren Lösungen standardisiert werden. Die Standardisierung stellt die Voraussetzung für die Virtualisierung der Prozesse dar, die als einer der ersten Schritte auf der Ausführungsebene angesehen werden kann.

5.3.1.3 Technologieauswahl zur Virtualisierung der Prozesse

Für die geforderte Prozesstransparenz physischer und informatorischer Abläufe legen Unternehmen die nötige Informationsinfrastruktur zur virtuellen Abbildung der Abläufe fest. Diese Festlegung führte bei allen Fallstudienteilnehmern zu einer zusätzlichen Standardisierung, die lokale und systemische Schwachstellen in den Abläufen identifizierte. Die Entscheidung der notwendigen Technologie für Virtualisierung, Integration und Vernetzung orientiert sich u. a. an der Höhe der Investition, dem vorhandenen internen Wissen sowie an den Kundenanforderungen.

Prinzipiell besteht für die Virtualisierung und Integration die Möglichkeit, voll- oder teilautomatische oder manuelle Vorgänge zu nutzen. Für die (teil-) automatische Erfassung kann IDT losgelöst von Objekten oder Subjekten an statischen Systemen wie z. B. Anliefer- und Ablieferflächen durch manuelle Buchungsvorgänge realisiert werden. Für die technische Integration in dynamischen Systemen kann die Erfassung durch intelligente Objekte oder assistierte Entscheider erfolgen. CPS in intelligenten Objekten wie Behältern oder Transportfahrzeugen können die Datenerfassung durch smarte Sensoren integrieren. Dadurch kann die automatische Erfassung überall und zu jederzeit gewährleistet und das Personal entlastet werden. Für die technische Integration assistierter Entscheider haben sich Assistenzsysteme wie Smart Phones als vielversprechende Lösung etabliert. Die Assistenzsysteme als Schnittstelle zum Menschen reduzieren die Prozess- und Informationskomplexität und erleichtern dem Personal durch die Bereitstellung echtzeitnaher Handlungsalternativen die Entscheidungsfindung.

In I4.0 steht noch eine weitere Möglichkeit zur Datenerfassung unter den intelligenten Objekten zur Verfügung: Die Integration des Kunden in intelligenten Produkten. Als Infrastruktur zur Vernetzung von Objekten, Produkten und Subjekten werden unternehmensübergreifend zentrale Cloud-Infrastrukturen bzw. Integrationsplattformen thematisiert, auf die die dezentralen Elemente zugreifen und darüber in Austausch treten. Inwiefern diese de-/zentral sind, ist vom Anwendungsfall abhängig. Die vollständige Dezentralisierung und 1:1-Kommunikation wird in der Praxis nicht präferiert. Integrationsplattformen dienen, im Sinne des Internets der Dienste und Daten, den Dingen und Menschen, zur Vernetzung sowie dem Angebot von Dienstleistungen. Durch die Verfügbarkeit der Daten über Integrationsplattformen werden Advanced Data Analytics-Anwendungen wie z. B. die Prognosefähigkeit unterstützt und völlig neue Dienste ermöglicht. Logistische Informationssysteme werden z. B. als komplettes TMS oder mo-

dular als einzelner Dienst „Mengenplanung“ auf den Plattformen dem Netzwerk, den Systemen oder einzelnen I4.0-Techniken zur Verfügung stehen.

Die Angebotskomplexität von Technologien im Kontext von I4.0 erschwert den Anwendern die Implementierung deutlich. Abhängig von der jeweiligen I4.0-Definition erweitert sich die Angebotskomplexität, daher bedarf es einer systematischen Methode zur Analyse der Leistungsfähigkeit von Technologien und deren Beitrag zur Erfüllung der Kundenanforderungen unter Kosten-Nutzen-Anforderungen.

5.3.1.4 Einstellung und Verhalten der Mitarbeiter

Dem Menschen wird in Literatur und Empirie eine zentrale Rolle zugesprochen. Insbesondere für Führungskräfte von der strategischen bis zur operativen Ebene bedeutet ein unternehmens- und bereichsübergreifendes Systemverständnis, sich auf gemeinsame Systemziele zu verständigen, auch wenn dies temporär zu Lasten lokaler Optima geschieht. Die Strukturen bisheriger Unternehmen sind mehrheitlich auf die Erfüllung der (dezentralen Bereichs-) Ziele des eigenen Einflussraumes begrenzt, der Systemansatz also Barrieren unterworfen. Mehr Dezentralität wird daher eine Änderung der Aufbauorganisation zur Folge haben, wodurch gewachsene Strukturen in Frage gestellt werden. Für Führungskräfte bedeutet dies den Verlust der Informationsautonomie. Zum anderen stellt die Einführung neuer Technologien zunächst eine Investition dar, die sich nicht direkt monetarisieren lässt. Von den Führungskräften wird für deren erfolgreichen Einsatz Überzeugungskraft, Durchhaltevermögen, Verbindlichkeit und Kontinuität in der Zielverfolgung erwartet. In Bezug auf I4.0 sind die möglichen Potenziale noch nicht abzuschätzen, was neben Promotoren und dem Engagement der Führungskräfte ein Mitwirken der übrigen Mitarbeiter voraussetzt. Die nötige Anpassung des Verhaltens und der Einstellung von Mitarbeitern infolge zunehmender Mensch-Maschine-Kooperationen ist mit einer gewissen Skepsis verbunden, insbesondere wenn Maschinen zunehmend in den Tätigkeitsbereich der Menschen vordringen. Bei Fallstudienunternehmen sowie den vorbereitenden Interviews wurde die Nutzung von Lernfabriken als Werkzeug zur Mitarbeiterintegration durch das „Ausprobieren“ von technischen Neuerungen thematisiert. Diese Lernfabriken werden nicht nur für das eigene Personal verwendet, sondern auch für Kunden zum Abbau von Hemmnissen sowie dem Vertrieb neuer Geschäftsmodelle. „Reine“ Anwender legen i. d. R. nicht den Fokus auf tiefes technisches Verständnis, sondern auf ergonomische Bedienbarkeit und Erfüllung der geforderten Aufgaben.

Auf Basis der identifizierten Gestaltungsfelder werden für die Entwicklung des CPLS Gestaltungsempfehlungen mit unterstützenden Instrumenten und Methoden der System-, Technologie- und Netzwerkebene zugeordnet und beschrieben.

5.3.2 Gestaltungsempfehlungen

Für die zielorientierte und erfolgreiche Projektabwicklung ist eine geordnete, prozessorientierte Abwicklung von Tätigkeiten zielführend. Für die Durchführung bestehen die Ziele und Aufgaben des Logistikmanagements in der Realisierung von Projekten innerhalb der geplanten Qualitäts-, Zeit-, Ressourcen- und Kostenvorgaben.⁴³² Dies beinhaltet das Treffen von Entscheidungen sowie die Befähigung und Überwachung von Mitarbeitern und externen Dienstleistern. Entscheidungen erfolgen u. a. über die Wahl und die Freigabe der geeigneten Projektinstrumente und -methoden. Diese bilden auf der Systemebene den taktischen Übergang von strategischen zu operativen Zielen. Aus Instrumenten werden mittelfristige Projekte formuliert, die aus den strategischen Zielen abgeleitet werden, um sie operativ zu realisieren. Instrumente konnten insbesondere aus der empirischen Analyse gewonnen werden und können als I4.0-Projekte die klassischen Zielgrößen unterstützen.

5.3.2.1 Systemebene

Der Projektrealisierung ist die Projektinitiation vorangestellt. Die empirische Analyse hat zwei Quellen der **Projektinitiation** aufgezeigt. Zum einen aus den Bedürfnissen der Operative heraus, zum anderen durch die Initiation der Führungskräfte. Die strategische Bedeutung von I4.0 für die Unternehmen hat die Führungskräfte dazu veranlasst, Digitalisierungsoffensiven unter einem Dach zu bündeln und eine ganzheitliche Planung der Projekte anzuvisionieren. Im Rahmen der Strategieformulierung wird zunächst eine gemeinsame Sprache bzgl. des Begriffsverständnisses sowie der Leistungsfähigkeit von Konzepten und I4.0-Lösungen nötig. Herrscht ein einheitliches Verständnis unter den Entscheidungsträgern, kann innerhalb der Strategie der Projektumfang abgegrenzt werden. Dies kann die Planung der internen (bzw. externen) vertikalen (bzw. horizontalen) Integration zur Vernetzung von Objekt- Subjekt- und Produktsystemen zu einer durchgängigen Lösung beinhalten. Diese Planung ist abhängig von der strategischen Konzentration der I4.0-Aktivitäten. Der Fokus der Arbeit ist die interne Logistiksicht der Smart Factory. Für die externe Sicht kann die Vernetzung von Smart Factories im Wertschöpfungsnetz, die Vernetzung mit anderen Industrien im Rahmen der Smart Ecosystems oder die Vernetzung nicht-industrieller Anwendungen zum Internet of Everything in Anspruch genommen werden. *STRAUBE* empfiehlt für die Eingrenzung des Projektumfangs ein strukturiertes dreistufiges Vorgehen, in dem zunächst eine allgemeine Analyse von Trends in Bezug zu Kunden und dem Wettbewerb erfolgt. Daraus werden strategische Zielsetzungen formuliert, die sich intern z. B. an der Stärkung von Leistungsparametern der Logistiksysteme orientieren oder extern strategische Allianzen formen. Sind die Strategien festgelegt, münden diese in Projekte. Extern können z. B. Kooperationsprojekte aus den Allianzen entstehen oder intern Optimierungsprojekte.

⁴³² Vgl. Straube (2014e), S. 7f.

Die daraus folgende Projektzielsetzung wird unter Kosten-Nutzen-Gesichtspunkten bewertet.⁴³³

Eine geeignete Methode zur Verbindung von Trends und Zielsetzungen unter Berücksichtigung der Kundenbedürfnisse ist das **KANO-Modell**. Die Befriedigung von (externen) Kundenanforderungen stellt für die Logistik das übergeordnete Ziel ihrer Aktivitäten dar.⁴³⁴ Das KANO-Modell dient der Anforderungsanalyse und wurde im Zuge der empirischen Analyse beschrieben und soll an dieser Stelle nur auf die wesentlichen Schritte reduziert werden. Es kann als Planungsinstrument ebenfalls der strategischen Differenzierung dienen. Anforderungen können sich auf Funktionen von Produkten, die Qualität oder produktbegleitende Dienstleistungen beziehen. Das KANO-Modell kann im Rahmen von Gruppen- oder Einzelbefragungen durchgeführt und durch statistische Methoden mittels IT-Einsatz ergänzt werden. Der erste Schritt ist die Aufnahme und Einteilung der Anforderungen in Basis-, Leistungs- und Begeisterungsanforderungen, die nach den zwei Dimensionen Kundenzufriedenheit und Grad der Leistungserfüllung bewertet werden. Als weitere Bewertungsmethode können die Anforderungen mit den Zielen des Unternehmens abgeglichen werden, da die gleichzeitige Umsetzung aller Ziele ressourcentechnisch nicht möglich ist.⁴³⁵ Abbildung 37 zeigt das KANO-Modell sowie die Matrix der Zielpriorisierung.

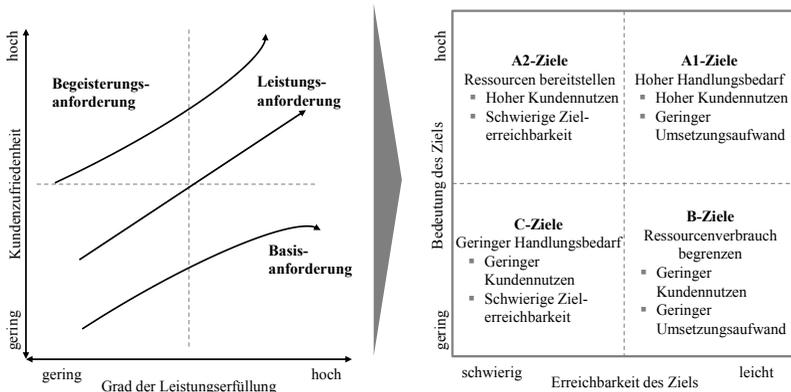


Abbildung 37: KANO-Modell und Matrix der Zielpriorisierung⁴³⁶

Während beim ursprünglichen KANO-Modell die „Erreichbarkeit des Ziels“ aus den Erfahrungen und dem vorhandenen Wissen im Unternehmen abgeschätzt werden kann und die „Bedeutung des Ziels“ aufgrund von externen Markt- und Kundendaten erhoben werden muss,⁴³⁷ kann bei der internen Kundenperspektive ebenfalls auf internes

⁴³³ Vgl. Straube (2014e), S. 15 f.

⁴³⁴ Vgl. Pfohl (2010), S. 33; Straube (2014a), S. 10

⁴³⁵ Vgl. Benz (2008), S. 35 ff.; Kano et al. (1984), S. 147 ff.

⁴³⁶ In Anlehnung an Benz (2008), S. 35 ff.

⁴³⁷ Vgl. Benz (2008), S. 45 ff.

Wissen in Arbeitskreisen oder Umfragen eingegangen werden. Im Kontext von I4.0 konnte eine Asymmetrie der Kundenanforderungen bzw. ein Fehlen der Logistikperspektive in Wissenschaft und Praxis elaboriert werden. KANO-Modell und die Zielpriorisierung unterstützen die logistikspezifischen Anforderungen bei Projekten.

Die Identifikation eines Projektziels, das gleichbedeutend sein kann mit den Projektinstrumenten, mündet in die Aufnahme des **Projektauftrages**. Projektaufträge beinhalten i. d. R. das Projektziel, die grobe Problembeschreibung, die Team-Zusammensetzung (interne/externe Projektverantwortliche), eine Zeit- und Meilensteinplanung sowie die Limitationen/Grenzen (Prozess, Produkt, Standort etc.). Operative Projektziele können qualitativ oder quantitativ sein, wobei der Fokus auf den quantitativen Zielen liegt, die nach dem *SMART*-Prinzip (*“simple, measurable, achievable, reasonable, and trackable“*⁴³⁸) formalisiert werden. Der Projektauftrag wird nach den Ist-Analysen verfeinert und endet mit der Unterschrift der Auftraggeber und -nehmer. Projektinstrumente in I4.0 sind u. a. die Virtualisierung aller Abläufe, durchgängige Vernetzung von Objekten und Subjekten durch horizontale und vertikale Integration, die Reduzierung der Medienbrüche, die Flexibilisierung von Arbeitsgestaltung und -organisation durch die Nutzung von Assistenzsystemen sowie die Standardisierung der IT-Systemlandschaft.

Für den erfolgreichen I4.0-Einsatz genügt es nicht, sich nur auf die technologische Perspektive zu konzentrieren. Die Aussage von Unternehmen B *„schlechte Prozesse werden nicht durch I4.0 grundsätzlich besser“* unterstreicht diese Ansicht. Übergreifend betonen die Interviewpartner transparente und standardisierte Prozesse unter Lean-Prinzipien als Voraussetzung für einen erfolgreichen Technologieeinsatz unter I4.0. Für die Auslegung von Informations- und Materialflüssen nach Lean-Prinzipien hat sich im industriellen Kontext das **Wertstromdesign** etabliert. Dieses dient zur Planung der Prozessauslegung und -verbesserung von Grenzen, operativen Zielen, Elementen und Funktionen. Die Methode besteht aus der **Ist-Analyse**, dem **Soll-Konzept** und der **Umsetzung** und adressiert die Flüsse zwischen Wareneingang und -ausgang, die ein Produkt erzeugt, für das der Kunde bereit ist zu zahlen. Die Entwicklung eines ganzheitlichen Abbildes der Fabrik erhöht die Transparenz. Die fabrikübergreifende Betrachtung kann ebenfalls mit dieser Methode durchgeführt werden.⁴³⁹ Abbildung 38 zeigt einen exemplarischen Wertstrom. Eine **Wertstromanalyse** besteht i. d. R. aus den Bereichen Lieferanten, Kunden, Steuerung und Informationsfluss, Materialfluss und Prozesse sowie Zeiten und Kennzahlen. Ausgehend von den Kundenanforderungen (Kundentakt) werden rückwärtsgerichtet die Prozessschritte mit allen Prozessdaten (Bestände, Zeiten etc.) bis zum Lieferanten für ein spezifisches Produkt oder eine Produktfamilie aufgenommen.

⁴³⁸ Vgl. Dennis (2007), S. 161

⁴³⁹ Vgl. Rother und Shook (2000), S. 3 ff.

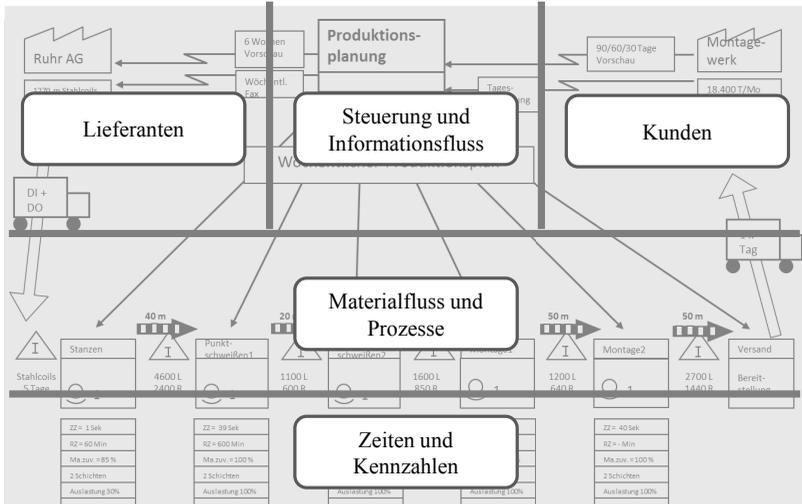


Abbildung 38: Wertstromanalyse⁴⁴⁰

Zusätzlich erfolgt die Analyse des Informationsflusses. Als letzter Schritt wird die Berechnung der Gesamt- und Prozessdurchlaufzeit durchgeführt. Häufig wird im Übergang zum Soll-Konzept eine Schwachstellenanalyse zur Reduzierung/ Eliminierung der acht Verschwendungsarten⁴⁴¹ durchgeführt.⁴⁴² Nach der Wertstromanalyse erfolgt die Erstellung eines **Soll-Wertstroms**. Ziele sind verschwendungsarme, robuste Abläufe mit einem möglichst hohen wertschöpfenden Anteil. Die Auslegung wird nach den fünf Lean-Prinzipien (Kundenorientierung, Wertstrom, Fluss, Pull und Perfektion⁴⁴³) vorgenommen, bei denen der Kundentakt die Auslegung des Systems determiniert.⁴⁴⁴ In Wissenschaft und Praxis sind die Auswirkungen von I4.0 auf die Lean-Prinzipien kaum erforscht. Der Kundentakt z. B. wird in der Zukunft nicht mehr statisch sein, wenn der Kunde in unterschiedlichen Prozessbereichen in Echtzeit Einfluss nehmen wird. Daher sollte der Soll-Wertstrom durch Aspekte der Digitalisierung wie z. B. die Festlegung der Buchungsinfrastruktur ergänzt werden. Das Wertstromdesign wird im Rahmen der Gestaltung sukzessive weiter entwickelt. Dies erfolgte erstens zur Entwicklung einer „konventionellen“ Prozesslandschaft, zweitens zur Weiterentwicklung durch netzwerktechnische Erkenntnisse und final zu einer „cyber-physischen“ Prozesslandschaft durch Integration von Technologien in den Material- und Informationsfluss. Zur Identifikation von Logistikanforderungen kann, wie in der empirischen Analyse, abermals auf das

⁴⁴⁰ Eigene Darstellung in Anlehnung an Rother und Shook (2000), S. 32 f.

⁴⁴¹ Nach Dennis (2007), S. 22 ff. sind diese Überproduktion, Bestände, Bewegung, Transport, Wartezeit, Überfüllung, Fehler und Nacharbeit sowie die Wissensasymmetrien.

⁴⁴² Vgl. Rother und Shook (2000), S. 17 ff.

⁴⁴³ Vgl. Womack und Jones (2003), S. 15 ff.

⁴⁴⁴ Vgl. Rother und Shook (2000), S. 57 ff.

KANO-Modell zurückgegriffen werden. Diese Art der Mitarbeitereinbindung als interne Kunden erleichtert die Implementierung und Akzeptanz.

Das Wertstromdesign hat Einfluss auf operative Kennzahlen, welche in ein Ziel- bzw. Kennzahlensystem eingebettet werden. Wie beschrieben, wird die Ergebnisverantwortung von oberen Hierarchieebenen auf die Operativen verlagert. Für die Verbindung strategischer und operativer Systemziele ist es notwendig, die Logistikziele der Smart Factory mittels eines **Kennzahlensystems (KEZ)** zu operationalisieren. Es trägt zur Steigerung der Transparenz über den Informations- und Materialfluss bei, um den Logistikanforderungen zu entsprechen. In der Literatur sind eine Vielzahl von KEZ sowie deren Aufbau beschrieben. Hier soll beispielhaft das Prinzip innerhalb des Logistik-Controllings dargestellt werden. Nach *WEBER* haben KEZ eine Funktion zur Operationalisierung (der Zielerreichung), zur Anregung (laufende Kennzahlenerfassung zur Identifikation von Auffälligkeiten), zur Vorgabe (Ermittlung kritischer Werte als Teilgrößen für unternehmerische Teilbereiche), zur Steuerung (Verwendung von Kennzahlen zur Vereinfachung von Steuerungsprozessen) und zur Kontrolle (laufende Erfassung von Kennzahlen zur Erkennung von Soll-Ist-Abweichungen).⁴⁴⁵ Die Verbindung zu technischen Regelkreisen der Automation sowie zu Eigenschaften wie dem Selbstmanagement wird hier ersichtlich. Die Tiefe der Operationalisierung ist von der Komplexität des zu beschreibenden Systems abhängig, daher können KEZ in unterschiedlicher Weise dargestellt werden. Nach *PFOHL* und *ZÖLLNER* ist es zielführend, Kennzahlen den Logistiksystemen (Transportsysteme z. B.) und diese den einzelnen Bereichen im KAP zuzuordnen.⁴⁴⁶ Unternehmen A und B lösen sukzessive die Bereichsziele auf, indem strategische mit operativen Zielen direkt verknüpft werden. Daher ist die Zuordnung zu einzelnen Bereichen im KAP zukünftig eventuell obsolet. Für die Entwicklung von KEZ ist ein gemeinsames Verständnis über logistische Ziele erforderlich, was deren Gewichtung erfordert. Anschließend erfolgt die Ableitung der Logistikkennzahlen aus den Logistikzielen zu Planungs-, Steuerungs- und Kontrollzwecken sowie deren Definition. Als dritter Schritt kann die Herstellung der sachlogischen Verknüpfung wie die Identifikation von Quelle und Senke der Kennzahlen durchgeführt werden, die im Rahmen von intelligenten Objekten eine Änderung erfährt. Zusätzlich werden die Erhebungspunkte sowie die Darstellungsform festgelegt.⁴⁴⁷ In den Fallstudien wurde die Ausgabe von Kennzahlen über den Prozessstatus dem assistierten Entscheider auf mobilen Endgeräten oder digitalen Plan- bzw. Steuerungstafeln angezeigt. Als letzter Schritt zur Entwicklung von KEZ erfolgt die Beschreibung von Interpretationsmöglichkeiten je Kennzahl sowie die Einbindung in IT-Systeme.⁴⁴⁸

Die identifizierten Systemziele, -grenzen, -elemente und -funktionen fließen in das Wertstromdesign ein, um die Informations- und Materialflüsse für die nächsten Schritte

⁴⁴⁵ Vgl. Weber (1993), S. 228 f.

⁴⁴⁶ Vgl. Pföhl und Zöllner (1991), S. 323 ff.

⁴⁴⁷ Vgl. Göpfert (2005), S. 364

⁴⁴⁸ Vgl. Göpfert (2005), S. 364

transparenter zu gestalten. Zudem helfen Transparenz und das Wissen über bereits vorhandene Kennzahlen dabei, den Aufwand für die Erstellung neuer Zielsysteme gering zu halten. Die Zuordnung und Ausdetaillierung erfolgt auf der Netzwerkebene.

5.3.2.2 Netzwerkebene

Die Wertstromanalyse lieferte u. a. Elemente sowie deren Ziele und Funktionen. Der Aufwand für Bestimmung, Zuordnung und Datengenerierung von KEZ korreliert mit der Größe der betrachteten Bereiche. Viele Kennzahlen werden nach wie vor händisch in Papierform aufgenommen, in Excel-Listen übertragen und anschließend in die zentrale Planungsinfrastruktur eingespeist. Dieser Prozess ist vielen Medienbrüchen unterworfen. Besitzen z. B. Maschinen durch BDE/MDE einen Zugang zur IT-Infrastruktur, können die aktuellen Stückzahlen und damit Plan- zu Istwerten halb- oder vollautomatisch aus dem System übernommen werden. Für logistische Objekte ist dies in Teilen über IDT realisiert, für operatives Personal über Buchungsvorgänge.

In I4.0 werden die Quellen und Senken von Kennzahlen zunehmen. Neben dem Leitungspersonal werden operative Mitarbeiter sowie intelligente Objekte eine steigende Anzahl von vernetzten Kanten und Knoten bilden, deren Interdependenzen berücksichtigt werden müssen. Durch die Zunahme der Systemelemente können Zielkonflikte entstehen, die sich sowohl auf die Ziele wie auch auf die Aufgaben beziehen. Die Belegung mit Kennzahlen sowie Planungs-, Steuerungs- oder Kontrollaufgaben führt zu einer Individualisierung von Objekten. Die Zuteilung von Zielen und Aufgaben auf operative Systemelemente muss in enger Abstimmung mit den Prozessverantwortlichen bereichsübergreifend durchgeführt werden. Ein operatives Ziel den Produkten, Objekten oder Subjekten zuzuordnen, ist überwiegend prozessbedingt, kann aber z. B. in Abhängigkeit von unterschiedlichen Kundenpräferenzen in der Priorisierung mittels unterschiedlicher Toleranzgrenzen (z. B. beim Lieferservice) in I4.0 schwanken. Die Verschiebung von der Prozess- zur Produktsicht hat z. B. Vorteile bei der Ermittlung des Engpasses und der Kundenintegration. Qualitative Werte sind dagegen nicht zwangsläufig durch die Verknüpfung von Berechnungsvorschriften eindeutig abbildbar, insbesondere wenn es um den Einfluss etwaiger automatisierter Maßnahmengreifungen geht. Die Kombination von qualitativen und quantitativen Charakteristika der Objekte und Subjekte muss Normen, Regularien und Verträgen, d. h. Standards unterworfen werden, um Zielkonflikten durch Ziel- und Entscheidungshierarchien vorzubeugen. Kommen für die Individualisierung von Objekten und Subjekten quantitative und qualitative Charakteristika zum Einsatz, kann deren Systemrelevanz durch eine Einflussanalyse bestimmt werden. Diese unterstützt den Aufbau von Ziel- und Entscheidungshierarchien, um die Entwicklung von Normen, Regularien und Verträgen zu ermöglichen. Die **Einfluss-Matrix** und das **System-Grid**⁴⁴⁹ (Abbildung 39) können bei der Gesamtbewertung von

⁴⁴⁹ Folgende Ausführung vgl. Reibnitz (1992), S. 35 ff.

Objekten oder Subjekten bzw. bei Objekt- oder Subjektsystemen die Ermittlung der Systemrelevanz unterstützen.

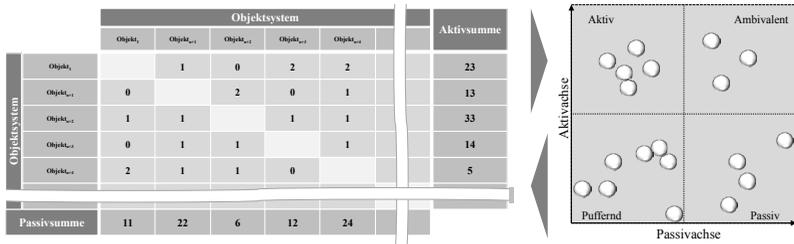


Abbildung 39: Einfluss-Matrix und System-Grid

Interpretiert als Einflussfaktoren können Objekte und Subjekte durch ihre Portfolios hinsichtlich ihrer gegenseitigen Beeinflussung durch Experten in der **Einfluss-Matrix** bewertet werden. Die Skalierung ist beispielhaft mit 0 (kein Einfluss) bis 2 (hoher Einfluss) angegeben. Die Addition der Zeilen je Objekt ergibt in Summe die Aktivsumme. Diese gibt an, wie groß der Einfluss des spezifischen Objektes auf das Gesamtsystem ist. Die Spaltensumme (=Passivsumme) gibt dagegen an, wie sehr ein Objekt durch andere Objekte/Subjekte beeinflusst wird. Zur Komplexitätsreduzierung bietet es sich an zu entscheiden, ob die Bündelung zu Systemen für die Einflussanalyse sinnvoller ist, indem z. B. Behälter-, Transport- und Kommissioniersysteme entlang des KAP bzw. für ein bestimmtes Produkt gegeneinander abgeglichen werden. Für die Fortführung des Beispiels wird daher von Systemen gesprochen. Das Ergebnis kann in einem sogenannten **System-Grid** (Abbildung 39, rechts) visualisiert werden. Die Systeme im ersten Quadranten „Aktiv“ besitzen den größten Einfluss auf andere Systeme und damit auf das Gesamtsystem. Erfahren diese durch eine Störung eine Planabweichung, können diese Systeme den größten positiven/negativen Einfluss auf andere Systeme und dadurch auf die operativen und strategischen Systemziele besitzen. Wenn Korrekturen der strategischen Ziele durch operative Prozesse beeinflusst werden sollen, kann es zielführend sein, diese Systeme als erstes durch Maßnahmen zu beeinflussen. Die Maßnahmen (z. B. Umplanung) müssen in einem sinnvollen Kosten-Nutzen-Verhältnis zwischen Maßnahmenergreifung und gewünschtem Effekt stehen. „Passive“ Systeme werden dagegen insbesondere durch andere Systeme beeinflusst. Ihre Möglichkeit, Einfluss auf viele Ziele gleichzeitig zu nehmen, ist eingeschränkt, die Maßnahmenergreifung demnach „teurer“. „Ambivalente“ Systeme zeichnen sich durch eine hohe Aktivität und Passivität aus. Diese beeinflussen und werden beeinflusst. Die ambivalenten Systeme können aufgrund ihrer „Unentschiedenheit“ die Robustheit von Prozessen nachteilig beeinflussen. Puffernde Systeme besitzen eine geringe aktive/passive Bedeutung. Auf Basis der Auswertungen können mittels **Relationen-Diagrammen** Abhängigkeiten

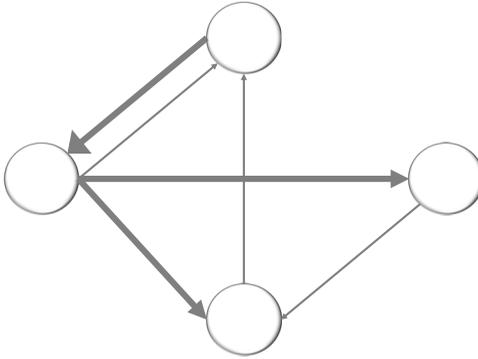


Abbildung 40: Relationen-Diagramm

zwischen einzelnen Elementen oder Systemen visualisiert werden (Abbildung 40). Die Einflussrichtung der Relationen bilden informatorische/materielle Eingangs- und Ausgangsgrößen ab, die Dicke den Grad des Einflusses. Durch Detailansichten des Beziehungsgeflechts von Elementen bzw. Systemen können direkte Zusammenhänge

identifiziert werden, die als Netzwerkdarstellung in die technische Auslegung sowie in die Soll-Prozesslandschaft einfließen können. Abhängig vom Detaillierungsgrad kann das Diagramm unübersichtlich und im Rahmen eines Arbeitskreises umfangreich werden, liefert aber einen Beitrag für die Erstellung von Ziel- und Entscheidungshierarchien sowie für die Vernetzung im Netzwerk. Ziele, Zielwerte, Aufgaben (Maßnahmen) und deren Zuteilung zu den Verantwortlichen können zur Individualisierung beitragen und Profile für Produkt-, Objekt- und Subjektsysteme erschließen. Dieses Vorgehen hat Relevanz für die **Evaluationsphase**, in der die kontinuierliche Erfolgskontrolle mittels Soll-Ist-Vergleichen auf Basis der sachlogischen Verknüpfung und Einflussanalyse durchgeführt wird. Für quantitative Werte finden **Prozess- oder Qualitätsregelkreise** in technischen Regelkreisen bereits Verwendung (Abbildung 41).

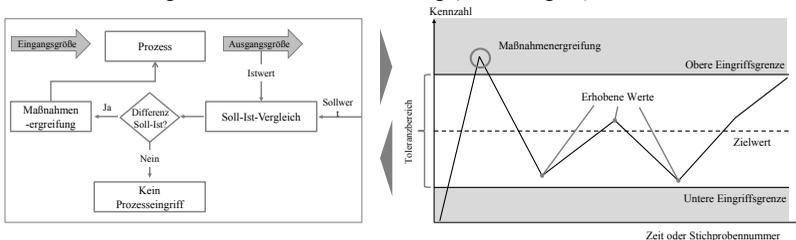


Abbildung 41: Prozessregelkreis⁴⁵⁰

Die etablierten Prozess- oder Qualitätsregelkarten können durch das in der Logistik verwendete **Supply Chain Event Management** erweitert werden, welches insbesondere für die Optimierung von Logistikleistung und -kosten in Logistikketten zum Einsatz kommt. Die operativen fünf Schritte nach *BENSEL et al.* sind für die Kontrollphase prädestiniert und explizit für die Realisierung in IKT-Systemen entwickelt. In der „Überwachung“ werden relevante Statusinformationen innerhalb vordefinierter Prozesse erfasst und mit vorab definierten Soll-Werten abgeglichen. Die Phase „Melden“ in-

⁴⁵⁰ Vgl. Quentin (2008), S. 20 ff.

formiert bei identifizierter Statusabweichung eines Prozesses (Event bzw. Störung) Prozessverantwortliche proaktiv und zeitnah. Alternativ ist es möglich, vordefinierte Prozesse bereits in diesem Schritt anzustoßen. Auf Basis hinterlegter Planungsdaten (z. B. Auftragsdaten, Kostentabellen etc.) werden in dem Schritt „Simulieren“ Reaktionen auf eine mögliche Störung geprüft und bewertet. Das „Steuern“ nimmt die Auswahl und Durchführung der besten Prozessalternative zur Beseitigung/Minimierung der Soll-Ist-Abweichung im betrachteten Prozessabschnitt vor. Das „Messen“ überwacht Kennzahlen zur Erkennung von Trends, Potenzialen und zur Verbesserung der zukünftigen Entscheidungssituation.⁴⁵¹

Zur Umsetzung logistischer Strategien, deren Steuerung und Kontrolle mittels Kennzahlen sowie um der kritisierten Eindimensionalität herkömmlicher KEZ zu begegnen, hat sich die **Balanced Scorecard (BSC)**⁴⁵² nach *KAPLAN und NORTON* etabliert. Als ausgewogenes Steuerungsinstrument werden qualitative und quantitative Kennzahlen genutzt, die in der klassischen Variante die vier Perspektiven Finanzen, Kunden, Prozesse sowie Innovation und Lernen besitzen. Die Perspektiven sind durch strategische Ziele mit Kennzahl(en), ihren Zielwerten sowie Maßnahmen und Verantwortlichkeiten beschrieben.⁴⁵³ Durch die Verdichtung auf vier Perspektiven wird die Komplexität reduziert und wichtige Führungsentwicklungen integriert: Die Kundenperspektive adressiert die Kundenzufriedenheit und deren Anforderungen, die Prozessperspektive konzentriert sich auf die Abläufe in Logistik und Produktion, die Finanzperspektive auf die Erfolgskontrolle der Strategieimplementierung und die Perspektive Lernen und Entwicklung auf Inhalte des Wissensmanagements. Die Erweiterung der BSC als reines Steuerungsinstrument wird durch die Festlegung strategischer Ziele und deren Operationalisierung sowie der anschließenden Festlegung von Maßnahmen zur Erreichung dieser Ziele realisiert.⁴⁵⁴ Die integrierte Maßnahmenfestlegung ist ein Aspekt, der die Reaktivität und Adaptivität als Eigenschaften im CPLS unterstützt. Realisiert werden kann die Erfolgskontrolle durch das SCEM. Wenn operative Elemente und Systeme der CPLS eigene Ziele und somit eigene Ergebnisverantwortung besitzen, werden Zielsysteme wie die BSC bis auf die Feldebene für I4.0-Techniken erweitert werden müssen. Inwiefern die Geschäfts- und Funktionsbereiche mit eigenen Zielen ausgestattet bleiben, ist unklar. In Unternehmen A und B werden diese Bereiche aufgelöst, um eine direkte Verbindung zwischen strategischen und operativen Zielen zu ermöglichen. Wenn der Kunde durch intelligente Produkte in die operative Ebene integriert wird, wird der Umweg der Entscheidungsfindung über die Fachbereiche tendenziell abnehmen. Mit der Zunahme von individualisierten intelligenten Objekten und Subjekten nimmt die Prozess- und Entscheidungskomplexität in echtzeitfähigen Zielsystemen zu. Die Visualisierung mittels BSC in z. B. KEZ-Cockpits kann für den assistierten Entscheider u. a. die Transparenz,

⁴⁵¹ Vgl. Bense et al. (2008), S. 8 ff.

⁴⁵² Vgl. Weber und Wallenburg (2010), S. 103

⁴⁵³ Vgl. Kaplan und Norton (1992), S. 72 ff.

⁴⁵⁴ Vgl. Weber und Wallenburg (2010), S. 105 f.

Ergonomie sowie Komplexitätsbeherrschung unterstützen. Die Zusammenführung von individuellen logistischen Zielen, Funktionen, Entscheidungshierarchien etc. je Element kann in **Profilen** oder **Qualifikationsmatrizen** festgehalten werden, um die Transparenz für Selektion, Allokation, Regulation und Evaluation für die technische Implementierung zu gewährleisten.

Die Angebotskomplexität von Technologien für ein visuelles Management zur Erhöhung der Entscheidungsfähigkeit sowie des Virtualisierungsprozesses stellt eine Barriere für die Durchdringung von I4.0-Technologien im industriellen Umfeld dar, daher werden im folgenden Abschnitt Methoden der Technologieanalyse vorgestellt.

5.3.2.3 Technologieebene

Die Aufgabe der technologischen Auslegung ist es, die Produkt-, Objekt- und Subsysteme entlang des KAP so zu erweitern, dass diese befähigt werden, die definierten Ziele zu erreichen. Das Technologiemanagement bedient sich einer Reihe von Methoden, um Technologien zu identifizieren und zu bewerten. Die **Technologie-Portfolio-Analyse (TPA)**⁴⁵⁵ unterstützt Investitionsentscheidungen durch die systematische Bewertung von ökonomisch vorteilhaften Technologien. Die systematische Bewertung gliedert sich in vier Schritte. Als **erster Schritt** empfiehlt die TPA die **Identifizierung von Technologien**, die intern bereits im Unternehmen zur Verfügung stehen. Zusätzlich sollten die durch I4.0 neu am Markt verfügbaren Technologien mit einbezogen werden. Dies ist ein Umstand, der durch die Führungskräfte aktuell gefordert wird und u. a. in den Unternehmen zu unterschiedlicher Verwendung von z. B. IDT mündet. Die identifizierten Technologien fließen **zweitens** in die **Bewertung des Ist-Zustandes** anhand der Dimensionen Technologieattraktivität und Ressourcenstärke ein. Die Technologieattraktivität stellt einen unternehmensexternen, unbeeinflussbaren Faktor dar. Mittels Relevanzbewertung von Technologiepotenzial und -bedarf unterstützt sie die strategische Einschätzung, welche Technologien zur Bewältigung zukünftiger Herausforderungen förderlich sind. Die Ressourcenstärke stellt einen unternehmensinternen, direkt beeinflussbaren Faktor dar, der die ökonomische und technische Expertise im Verhältnis zur Konkurrenz darstellt. Abbildung 42 zeigt beide Dimensionen.

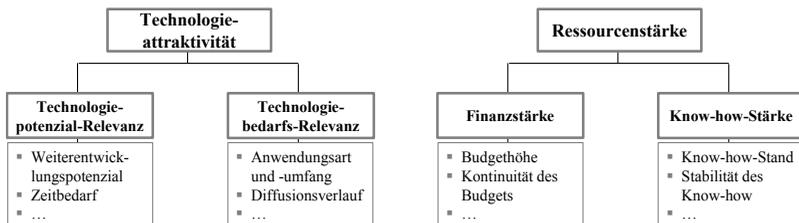


Abbildung 42: Technologieattraktivität und Ressourcenstärke

⁴⁵⁵ Nachfolgende Ausführungen in Anlehnung an Pfeiffer et al. (1982), S. 80 ff.

Beide Dimensionen spannen das Technologie-Portfolio auf. In dieses werden die bewerteten (internen) Technologien abgetragen. In **Schritt 3** wird der Ist-Zustand des Portfolios für einen **Soll-Zustand in die Zukunft projiziert**. (Abbildung 43, links).

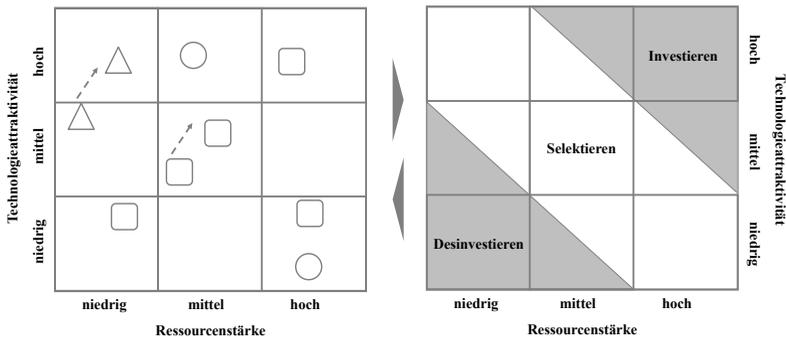


Abbildung 43: Technologie-Portfolio-Analyse

In dieser zeitlichen Transformation werden die internen sowie extern identifizierten Technologien, die komplementär oder als Substitut Relevanz besitzen können, aufgenommen. Der Vergleich eigener oder fremder Technologien kann Hinweise auf zu tätige Investitionen liefern. In **Schritt 4** werden aus der TPA **Handlungsempfehlungen** und **Normstrategien** für Investitions-, Selektions- oder Deinvestitionsentscheidungen abgeleitet (Abbildung 43, rechts).

Die durch die Technologien ermöglichten Funktionen und Eigenschaften können anschließend die Profile der Elemente zu **Technologie- bzw. Technik-Profilen** ergänzen. In einer **Referenzarchitektur** bzw. dem **Soll-Lastenheft** werden Anforderungen des Logistikmanagements schematisch dargestellt. Im Rahmen von CPS postulieren **GEISBERGER und BROY** Strukturen und Regeln von Anwendungswelten, formalisierte Einflüsse der Komponenten und interagierenden Akteure, Referenzanwendungen mit ihren Anforderungen, Prozessen, Funktionen, Interaktionsmustern sowie Regeln und Normen.⁴⁵⁶ In der Referenzarchitektur finden die Ergebnisse aus den Gestaltungsebenen von System, Netzwerk sowie Technologie Anwendung. Produkte, Subjekte und Objekte mit operativen Logistikzielen, logistischen Aufgaben sowie Kernprozessen werden technologisch unterstützt. Ziele werden durch die Einbindung in das SCEM, die Aufgaben durch logistische Informationssysteme, die Integration in Kernprozesse durch Funktionen und die dezentrale intelligente Interaktion im System durch Eigenschaften realisiert. Die Vernetzung dezentraler Elemente zu einem Netzwerk von Systemen wird durch Integrationsplattformen realisiert. Komponenten, Abhängigkeiten, Regeln und Normen können durch Qualifikationsmatrix und Einflussanalyse festgehalten werden. Die Entwicklung einer cyber-physischen Prozesslandschaft erleichtert den Abgleich mit

⁴⁵⁶ Vgl. Geisberger und Broy (2012), S. 72 ff.

den logistischen Kundenanforderungen durch die Darstellung von Material- und Informationsfluss.

Sind die Vorbereitungen und Analysen abgeschlossen, erfolgt i. d.R. eine Anpassung des Projektauftrages mit der finalen Festlegung der Ziele, des Teams etc. Diese Inhalte münden dann in die konkrete Umsetzung.

5.3.2.4 Implementierung

In der vorliegenden Arbeit könnte die **Implementierung** in Abhängigkeit von den Projektinstrumenten erfolgen. Ist z. B. die digitale Durchgängigkeit priorisiertes Ziel, liegt der Fokus auf IDT. Ist die Vernetzung intelligenter Objekte das Ziel, sind Hard- und Softwarekomponenten von CPS oder Anwendungen relevant. Für die Mitarbeiterintegration kann der Einsatz von Assistenzsystemen präferiert werden. Abbildung 44 stellt die empfohlene Abfolge für die digitale Durchgängigkeit in der Smart Factory dar.

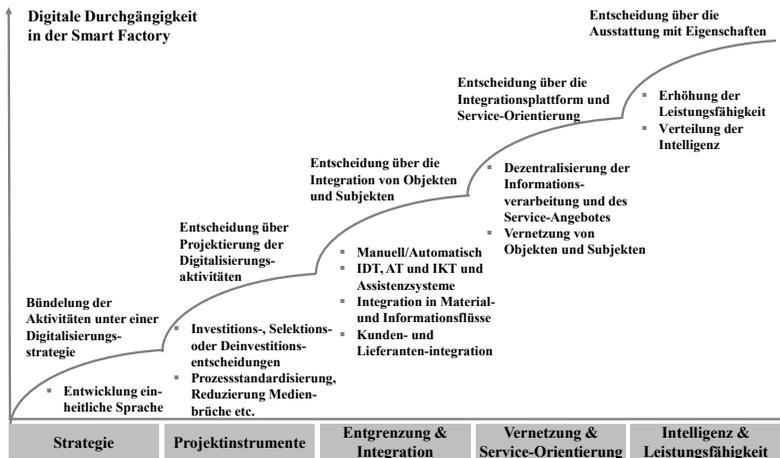


Abbildung 44: Digitale Durchgängigkeit in der Smart Factory⁴⁵⁷

Die Lösungsansätze werden zunächst in einem Pilotprojekt getestet. Die Pilotierung wird i. d.R. auf einen Bereich, einen Prozess oder ein technisches System angewendet und kontinuierlich überwacht. Die **Überwachungsfunktion** der Führungskräfte bezieht sich auf die Einhaltung von Meilenstein- und Zeitplanung sowie die Prüfung der Zielplausibilität. Um den Erfolg der Pilotierung zu überprüfen, werden die zuvor definierten Kennzahlen auf ihre Erreichung hin evaluiert. Bei Abweichungen kann ein neuer Zyklus angestoßen werden. Hat der Pilot die Erwartungen erfüllt (i. d.R. werden Anpassungen notwendig), kann der Pilot in einen neuen Standard überführt werden und alte Pro-

⁴⁵⁷ Eigene Darstellung.

zesse ablösen. Fällt die Entscheidung über die unternehmensweite Implementierung positiv aus, wird der neue Standard eingeführt.⁴⁵⁸

Für die Implementierung ist der Faktor Mensch entscheidend. Projekte scheitern häufig nicht daran, dass die technische Umstellung von Prozessen oder die Einführung von Software nicht erfolgt, sondern weil den Mitarbeitern die Vorteile der Veränderung nicht ausreichend kommuniziert werden und sie infolgedessen die Motivation des Projektes nicht verstehen, es ablehnen und im Betrieb nicht „leben“. Hier sind die Führungskräfte gefordert, ihre Mitarbeiter zu befähigen, die an sie gestellten Anforderungen zu erfüllen. Die **Befähigung** liegt in der Bereitstellung von Ressourcen, der Vorgabe von Zeiten und Zielen, der Koordination zwischen Bereichen und Vorgesetzten, der Qualifizierung von Mitarbeitern sowie der Gewährleistung der Unterstützung der Projektinitiatoren, die in den Fallstudien in der strategischen Führungsebene besteht. Realisiert werden kann dies u. a. durch eine frühzeitige Mitarbeiterbindung und Projekttransparenz bereits während der Analysephase. Neben der Einbindung über das KANO-Modell oder über das Wertstromdesign sollten die Informationen über das Projektvorhaben öffentlich an einem Standort ausgehängen werden, wo die betroffenen Mitarbeiter barrierefrei Zugang haben. Informationen können die Inhalte des Projektauftrages, wie z. B. das Team, die Ziele und der Zeitplan sein, ergänzt um die Ergebnisse der Ist-Analyse sowie das Soll-Konzept. Das Projekt-Team sollte nahe am Ort der Umsetzung operieren und damit für etwaigen Kommunikationsbedarf zugänglich sein. Ist der optimale Prozess als neuer Standard festgelegt, gilt es die Mitarbeiter zu schulen. Hier gilt: *„Kommunikation ist der Schlüssel“*, indem jeder Mitarbeiter z. B. Kenntnis darüber hat, wer was macht, womit, wie lange und bis wann.

Als Instrument können die in den Unternehmen genannten Lernfabriken eine sinnvolle Ergänzung darstellen. Mittels einer „Smart Micro Factory“ können in einer kontrollierten Testumgebung Anwendungsszenarien der I4.0, wie z. B. die Verbesserung der Prozessqualität durch die Identifikation, Analyse und Darstellung von Daten, erprobt werden. Dadurch kann die Mensch-Maschine-Interaktion oder die Kundenintegration für den Mitarbeiter ohne Gefährdung der realen Prozesse zugänglich gemacht werden.⁴⁵⁹ Neben den kontrollierten und dadurch risikoärmeren Bedingungen für das Gesamtsystem, unterstützen Lernfabriken die Mitarbeiterintegration durch die Kombination aus Praxis und Theorie in einer „spielerischen“ Umgebung. Sie sind damit ein geeignetes Schulungsinstrument, um technologische Vorbehalte durch „Ausprobieren“ abzubauen.

⁴⁵⁸ Vgl. Bicheno und Holweg (2009), S. 182 f.; Gorecki und Pautsch (2010), S. 96 ff.

⁴⁵⁹ Vgl. Jochem et al. (2016), S. 4 ff.; Seiffert et al. (2016), S. 43

5.3.3 Zusammenfassende Darstellung

Abbildung 45 zeigt eine zusammenfassende Darstellung zur Entwicklung von CPLS.

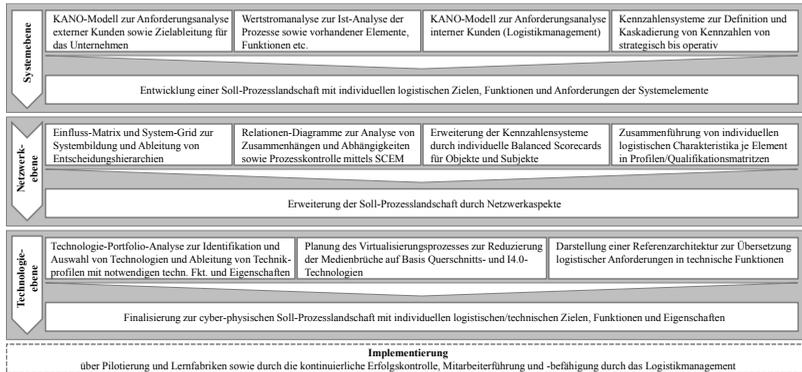


Abbildung 45: Entwicklung cyber-physischer Logistiksysteme in der Smart Factory⁴⁶⁰

5.4 Veränderungen für das Logistikmanagement

Abschnitt 5.4 thematisiert die Veränderung in Material- und Informationsflüssen, um anschließend anhand von Beispielen die Bedeutung für Managementprozesse darzustellen. Kapitel 5 schließt mit den daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen.

5.4.1 Material- und Informationsfluss

Die Veränderungsdimensionen der System-, Netzwerk- und Technologieebene wirken auf die Material- und Informationsflüsse, die in Abbildung 46 exemplarisch dargestellt sind. Die hier vorliegende Arbeit fokussiert interne Logistikprozesse. In diesem Abschnitt werden zusätzlich die Veränderungen an den Schnittstellen skizziert.

⁴⁶⁰ Vgl. Eigene Darstellung.

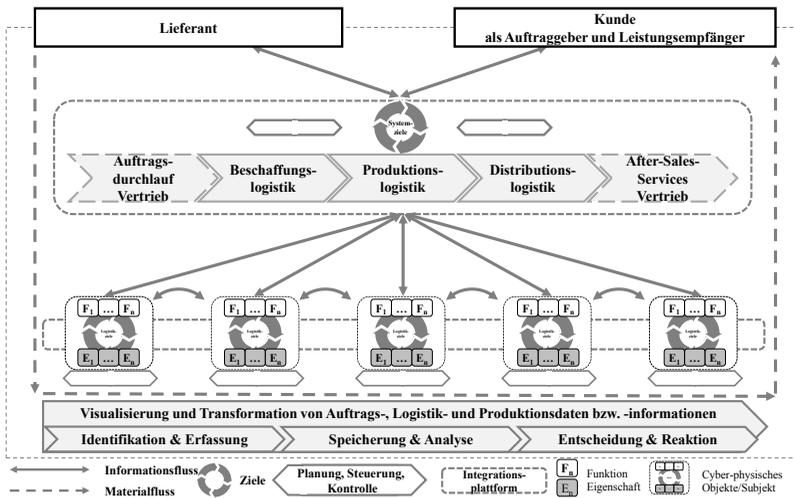


Abbildung 46: Cyber-physische Prozesslandschaft⁴⁶¹

Virtualisierung und Entgrenzung lassen externe Akteure wie Lieferanten und Kunden zum Bestandteil innerbetrieblicher Leistungsprozesse werden, die sie (theoretisch) direkt beeinflussen können. Dies geschieht durch die Auflösung der Systemgrenzen und informatorische Anbindung an strategische und operative Elemente sowie durch die direkte Integration in die Prozesse. Integrationsplattformen vernetzen externe Akteure mit internen Abläufen und interne Akteure mit der Umwelt. Zusätzlich werden interne cyber-physische Logistiksysteme untereinander (oder einzelner Einheiten) sowie mit den darüber liegenden Ebenen in Material- und Informationsflüsse integriert. Während der Materialfluss nach wie vor sequentiell ist, ist der Informationsfluss multidirektional, zirkulär und folgt keiner strikt definierten Prozessabfolge, sondern einer Prozesslogik. Neben der Integration und Vernetzung können auf den Plattformen Anwendungen als Dienstleistungen (Programme oder einzelne Apps) angeboten werden, auf die intelligente Objekte und Subjekte bei Bedarf zugreifen können.

Die Zunahme partizipierender Akteure und wechselnder kundenindividueller Anforderungen erhöht das Potenzial für Zielkonflikte. Dies gilt insbesondere, wenn Kunden während des gesamten Herstellungsprozesses direkt auf die Ziele und indirekt auf die Aufgaben und Prozesse wirken. Durch diese Eingriffe kann es zu einer Verschiebung von Zielen (Toleranzgrenzen oder Prioritäten) im Prozess kommen. Bei kurzfristigen Reaktionen bzgl. der neuen Kundenanforderung entstehen Zielkonflikte, für die Regeln und Normen festgelegt werden müssen, nach denen innerhalb des innerbetrieblichen Netzwerkes in Einklang mit den Systemzielen gehandelt wird. In Anlehnung an die Kybernetik kann der Zielabgleich in einem technischen Regelkreis erfolgen. In diesem

⁴⁶¹ Eigene Darstellung.

Kreisprozess werden Soll-Ist-Abgleiche zur Feststellung der Prozessleistung kontinuierlich durchgeführt, um diese wiederum in die Planung einfließen zu lassen. Die ermöglichte Maßnahmenergreifung, die gleichzeitig dem System zur Anpassung verhilft, indem neue Bedingungen die Toleranzgrenzen verändern, kann z. B. durch das SCEM als selbstlernendes/sich selbst organisierendes System unterstützt werden.

Für die Einhaltung von Regeln und Normen müssen interne Objekte geeignet befähigt werden. Die Befähigung wird einerseits durch die notwendige Arbeitsteilung sowie die Zunahme des Funktionsumfangs von logistischen Objekten realisiert. Infolge von Entgrenzung, Dezentralisierung und Individualisierung migrieren dafür Ziele und Aufgaben sowie deren direkte Ergebnisverantwortung von der Führungs- und Bereichsebene in die Operative. Für die notwendige Arbeitsteilung bzw. Zunahme des Aufgabenfeldes von Objekten wird mehr „Intelligenz“ auf die operative Ebene verlagert werden. Neben den durch CPS ermöglichten Funktionen (F_n), wie die Datenerfassung etc., erweitern sich die Fähigkeiten der intelligenten Objekte und Subjekte auf der operativen Ebene um die durch I4.0 ermöglichten Eigenschaften (E_n). Die Eigenschaften inkludieren z. B. das Selbstmanagement, durch das ein intelligentes Transportsystem in die Lage versetzt wird, dezentral und heterarchisch selbstständig zu planen, zu steuern und zu kontrollieren. Die Zielvorgaben können durch jede I4.0-Technik dezentral und heterarchisch erfolgen. Abhängig von der Zielpriorität wird eine „natürliche“ Zielhierarchie beibehalten werden müssen, d. h. operative Ziele werden sich im Korridor der strategischen Systemziele bewegen, können sich aber innerhalb von Toleranzgrenzen individuell verschieben. Daraus resultiert eine dezentrale und heterarchische Kennzahlenerfassung und -aggregation und die Verarbeitung der Daten am Ort der Aufnahme. Diese Kennzahlen (bzw. Daten und Informationen) können auf unterschiedlichen Ebenen in Echtzeit ausgetauscht werden, um Ziele sowie Materialflüsse zeitnah anpassen zu können. Dafür wird die Informationsautonomie des Managements reduziert bzw. dezentralisiert werden.⁴⁶² Der Informationsaustausch ist anforderungsabhängig zwischen allen operativen, taktischen und strategischen Systemen (technisch und menschlich) gleichverteilt, d. h. alle besitzen – wenn nötig – die gleiche Informationsbasis und erhalten dadurch Grundlagen für (teil-) autonome Entscheidungen, wie im IoE postuliert. Inwiefern Kunden und Lieferanten direkt in operative Elemente integriert werden und die Führungsebene nur auf das Einschreiten bei z. B. bedrohlichen Störungen beschränkt ist, wird von der jeweiligen Systemauslegung abhängen. Mehr Dezentralität erfordert einen höheren Datenaustausch und dies bedeutet höhere Systemkomplexität.

Die Veränderungen von Material- und Informationsflüssen in Folge der I4.0 in der Logistik ermöglichen dem Logistikmanagement vielfältige Anwendungsmöglichkeiten in der Planung, Steuerung und Kontrolle von Logistikprozessen.

⁴⁶² Im theoretischen Bezugssystem wurde die Hierarchieauflösung sowie Informationsüberwachung und -weitergabe durch untere Ebenen thematisiert.

5.4.2 Planung, Steuerung und Kontrolle

Abschnitt 5.4.2 beschreibt die Bedeutung der innerbetrieblichen taktischen und operativen Planung, Steuerung und Kontrolle in den Funktionsbereichen Vertrieb, Beschaffung, Produktion, Distribution und After-Sales für Ausrüster und Anwender des Maschinenbaus. Die folgenden Ausführungen basieren auf dem vorangegangenen Abschnitt sowie den Erkenntnissen der empirischen Analyse und beschreiben am Beispiel der verbrauchs- und bedarfsorientierten Planung und der Kundenintegration, adaptiver Logistiksysteme und der Lieferantenintegration sowie dem Entscheidungs- und Störungsmanagement zukünftige Veränderungen.

Verbrauchs- und bedarfsorientierte Planung für Produktionsprogramme, Materialdisposition und Kundenintegration

Die **verbrauchsorientierte Programmierung** basiert auf den Absatzplänen des Vertriebs, die auf Statistiken und Prognosen zukünftiger Absätze sowie periodenbezogener Verkaufspläne basieren. Genutzt werden i. d. R. Vergangenheitswerte sowie Markterwartungen, die manuell bearbeitet und in die Zukunft prognostiziert werden.⁴⁶³ Während aktuelle Prognoseverfahren die Vertriebs- bzw. Beschaffungsplanung mittels konstanter Absatzmengen der Vergangenheit händisch aufnehmen und planen, kann dieser Prozess durch das Fortschreiten der Virtualisierung papierlos, automatisierter und dynamischer erfolgen. Unternehmen A benutzt dafür eine Integrationsplattform, die Entscheidungsgrundlagen visualisiert. Durch Vernetzung, Integration und der damit verbundenen Auflösung getrennter Aufgabenbereiche stehen mehr Daten in einer höheren Frequenz in Echtzeit zur Verfügung, die für Prognoseverfahren nutzbar gemacht werden. Echtzeitdaten über produzierte Güter sowie den erwarteten Umsatz stehen kurzfristiger unterschiedlichen Akteuren zur Verfügung. Der kontinuierliche Abgleich von prognostizierten und tatsächlichen Absätzen hilft, den Prognosefehler (z. B. bei der exponentiellen Glättung 1. Ordnung) anzupassen und damit die Planungsgüte zu erhöhen. Insbesondere Unternehmen A und C betonen die Nutzung von Smart Data Analytics-Anwendungen zur Weiterentwicklung von Planungsalgorithmen und zur Unterstützung des Personals. Dies hat Einfluss auf die Parametrisierungsmöglichkeiten von Prognoseverfahren. Einerseits können Veränderungen in den betrachteten Prognosehorizonten genauer abgeschätzt und verglichen werden, andererseits können durch die Datenzunahme und innerbetriebliche Vernetzung Muster in der Datenanalyse (ebenfalls durch die Auswertung der Vergangenheitswerte) über Smart Data-Analysen die Prognosegüte weiter erhöhen. Werden zusätzlich durch Entgrenzung und Vernetzung via Internet Daten aus der Umwelt für die Marktanalyse eingesetzt, können erwartungsorientierte Prognoseverfahren weiter profitieren, um Unternehmen die notwendige Flexibilität zu ermöglichen.

⁴⁶³ Vgl. Schuh und Lassen (2006), S. 199

Die **Bedarfsorientierung** nimmt bei allen Fallstudienunternehmen infolge der erhöhten Variantenbildung zu, um z. B. das Absatzrisiko der Prognoseverfahren gering zu halten. Allerdings ist die Bearbeitung der Kundenaufträge zeitintensiv, individuell und verbraucht intern Ressourcen. Die noch am Beginn stehende horizontale und vertikale Integration äußert sich in den Unternehmen in der fehlenden Integration der Kunden unter 14.0-Gesichtspunkten. Dadurch kommt es nach wie vor zu einer inadäquaten Nutzung von Kundeninformationen für Planungs- und Steuerungsprozesse. In den Fallstudien konnte die Kundenintegration nicht in Form von intelligenten Produkten oder anderweitiger direkter Integration in innerbetriebliche Prozesse festgestellt werden. Unternehmen D integriert Kunden zur Erhöhung von Prognosegüte und Bedarfsorientierung durch Online-Konfigurationssysteme (B2C-Lösung) für Ad hoc-Bestellungen in kleinen Mengen und via Kundenaufträge (B2B) für automatisierte, standardisierte Bestellvorgänge. Kein Vertrieb oder Konfigurator ist hier aktiv. Dadurch können administrative Aufgaben der Kundenbearbeitung reduziert und kundenspezifische Angaben wie die Abstimmung der Liefertermine automatisiert werden. Zusätzlich wird durch die Kundenintegration eine neue Datenquelle geschaffen, die verbrauchs- und bedarfsorientierte Verfahren unterstützt und Planungsaufgaben z.T. obsolet werden lässt. Werden Kunden vollständig in die Prozesse integriert, werden nach Aussage der Unternehmen Bereiche der Absatzplanungsaufgaben automatisiert und wegfallen. Nimmt in Folge der Auflösung der Unternehmensgrenzen die Kundenintegration zu, müssen Regeln über die Eingriffsmöglichkeiten der Kunden festgelegt werden, um interne Prozesse nicht zu destabilisieren. Der „*Point of no Return*“ muss dem Kunden transparent gemacht und als mögliches Geschäftsmodell für kurzfristige Anpassungen zugänglich werden. Für die Planung kann das bedeuten, dass kurzfristige Anpassungsplanungen bei jedem neuen Kundenauftrag die Folge wären, Planung auf Planung folgt und die Datenzunahme die Infrastruktur überfordert. Plan- und Kundenaufträge müssen demnach unterscheidbar, geregelt und koordiniert sein, um z. B. Kundenaufträge in tatsächlich gewünschte Planaufträge zu übersetzen.

Deterministische (bedarfsorientierte) Verfahren der **Materialdisposition** kommen bei der Bestandsplanung zum Einsatz, um u. a. Lagerbestände und Kapitalbindung zu reduzieren. Ihre Datengrundlage liegt u. a. in Vorlaufzeit, Bestell- und Sicherheitsbeständen, Kanbanlosgröße, -karten und -pufferbeständen oder Beschaffungsrhythmen. Um den Bedarf ermitteln zu können, werden Bestandsdaten (Planzu/-abgänge, Reservierungen etc.) zur Kontrolle der Bestandsentwicklung aufgenommen. Die Bedarfsplanung ist mit einer Datenunschärfe konfrontiert, die auf nicht standardisierten Prozessen beruht.⁴⁶⁴ Folge ist die Unkenntnis über die tatsächlichen Bestände aufgrund asynchroner Daten der Feldebene und des ERP (z. B. Zeitverzug). Dieser Umstand mindert die Planungsqualität, so dass die Prozesse auf Schwankungsspitzen ausgelegt werden müssen. Die Virtualisierung und Vernetzung unterschiedlicher (interner/externer) Läger unterstützt

⁴⁶⁴ Vgl. Schuh und Lassen (2006), S. 203 ff.

die Bedarfs- bzw. Bestandsplanung durch eine lückenlose, dezentrale Datengenerierung. Unternehmen B realisiert dies durch die Integration und Vernetzung aller relevanten internen Akteure. In die RFID-Infrastruktur sind die Warenein- und -ausgänge der Fertigungsbereiche, Transportfahrzeuge sowie neben den Supermärkten weitere dezentrale Lager eingebettet. Dadurch ist es dem Unternehmen möglich, Informationen über un-/geplante Ab- und Zugänge zu erhalten sowie verfügbare Bestände für die Bedarfsermittlung mit realeren Daten zu kalkulieren. Die Planungsebenen wurden somit auf die operative Ebene an den Ort des Verbrauchs und der Entscheidung verlagert. Die Materialbeschaffung wird im dezentralen Lager (Supermarkt) durch einen eKanban ausgelöst, dessen Bedarf durch Meldebestände zuvor festgelegt wurde. Die Informationen über Art, Menge, Zeitpunkte und Orte lösen dezentral bei Fahrern der Transportfahrzeuge sowie den Lagermitarbeitern automatisiert Aufträge aus. Die Automatisierung eliminiert Buchungsaufwände und entlastet die Mitarbeiter von nicht wertschöpfenden Routinetätigkeiten. Die erzeugte Datentransparenz in Echtzeit macht durchgängig den Lagerstatus für die Bestandsplanung einsehbar. Dadurch konnte eine Ad hoc-Planung realisiert werden. Zusätzlich ist in Abhängigkeit von der gewünschten Echtzeitfähigkeit und des Automatisierungsgrades der Planungsrhythmus veränderbar.

Nimmt in Folge von Virtualisierung und Entgrenzung die Kundenzentrierung und -integration zu, werden dezentrale I4.0-Techniken unter Systemrestriktionen Daten in Echtzeit auswerten und durch die Anbindung an das Internet bei geänderten Kundenanforderungen in einer adäquaten Zeitspanne reagieren können. Diese Veränderung entwickelt die gängigen taktgetriebenen deterministischen Systeme zu nicht-deterministischen Systemen, in denen die Planungen von logistischen Abläufen nicht wie bisher bei Programm- und Bedarfsplanung auf Durchschnittswerten basieren, sondern synchronisierte Material- und Informationsflüsse die Aufgaben des Logistikmanagements auf Basis von Echtzeitdaten unterstützen.

Adaptive Logistiksysteme und Lieferantenintegration zur Kontrolle und Steuerung der bedarfsorientierten Materialbereitstellung

Materialbereitstellungs- und Transportprozesse zwischen Logistik und Montage werden ohne IT auf Basis von Lean-Prinzipien wie dem Pull-Prinzip mittels (e)Kanban (B) oder via stündlicher Routenzüge (A, C) organisiert. Die Intransparenz sowie Variantenvielfalt erschwert die synchrone Taktung von Produktions- und Logistikprozessen, was u. a. zu einer Minderauslastung des Milkrun führt und unnötige Transportaufwände generiert. Ziel der bedarfsorientierten Materialbereitstellung ist die Reduzierung von Verschwendungen, die Erhöhung der Transparenz sowie die Automatisierung von Abläufen zwischen Montage und Logistik, um erstens die bedarfsorientierte (interne) kundenzentrierte Materialversorgung sicher zu stellen und zweitens Montage- und Logistikprozesse zu synchronisieren. In den Fallstudien wird mit I4.0 die Reduzierung der Medienbrüche durch eine zunehmende Virtualisierung der Abläufe realisiert, um die manuelle Bearbeitung zu reduzieren. Die Virtualisierung basiert bei den Unternehmen auf dem

Ausbau der IDT-Infrastruktur. Während Unternehmen A und C manuelle Lösungen bevorzugen, nutzen B und D halb- bzw. vollautomatische Lösungen, um die Datenaufnahme zu dynamisieren und ein echtzeitfähiges Abbild der Abläufe zu ermöglichen. Zeitliche Vorgaben für die Transportversorgung mittels Routenzüge wurden in allen Unternehmen aufgelöst. Damit konnte eine bedarfsorientierte Versorgung im Sinne einer Pull-Steuerung innerbetrieblich erreicht werden. Realisiert wurde dies z. B. bei Unternehmen C durch die Vernetzung und Schließung von Medienbrüchen zwischen Anlagen, Werkstückträgern und Handarbeitsplätzen.

Für die Erweiterung auf externe Akteure integrieren Unternehmen B und D die Lieferanten vollautomatisiert in die Materialversorgungsprozesse. Dadurch rückt die Beschaffungsplanung mit operativen Steuerungsprozessen der Materialversorgung zusammen. Die Materialbeschaffungsplanung ordnet Mengen und Zeitpunkte aus der Bedarfsermittlung, Bestellmengen und -zeitpunkte unter Kostenrestriktionen zu. Grundsätzlich kann über Eigenfertigung oder Fremdbezug entschieden werden, die z. B. durch Kostenvergleichsrechnungen, definierte kostenunabhängige Regeln sowie Kapazitätsprofile von Arbeitsplätzen oder -gruppen unterstützt werden.⁴⁶⁵ Bei Unternehmen D werden Verbräuche in der Montage erfasst und bei Erreichen eines Meldebestandes wird der Bedarf an das Lager und an den innerbetrieblichen Transport gemeldet. Die durch den Lieferanten vorkommissionierten Behälter werden automatisch aus dem Lager ausgeschleust und stehen zur Ablieferung bereit. Ist ebenfalls im Lager ein Meldebestand erreicht, wird diese Information vollautomatisch an den Lieferanten weitergegeben.

Die Dezentralisierung von Entscheidungen wird in Zukunft den assistierten Entscheider sowie intelligente Objekte dazu befähigen, selbstständig ad hoc zwischen Eigenfertigung oder Fremdbezug zu entscheiden. Dazu bedarf es neben der weiteren Integration von internen/externen Akteuren eine höhere Leistungsfähigkeit bzgl. der Intelligenz von I4.0-Techniken. Einfache technische Regelkreise kommen in allen Fallstudien zum Einsatz. Der Selbststeuerung wurde ebenfalls in der Gruppenbefragung Relevanz zugeordnet, wird aber im Rahmen der Arbeitsverteilung, (Ergebnis-) Verantwortung und Entscheidungshoheit Zielkonflikte auslösen. Infolge der Verlagerung von Zielen und Aufgaben werden Objekte, wie Transportfahrzeuge oder Behälter, im technischen Regelkreis automatisiert die Selbststeuerung und -kontrolle – als Entscheidungsinstanz der Kybernetik 2. Ordnung – durchführen. Unternehmen B steuert und kontrolliert den gesamten innerbetrieblichen Transport für die Rohmaterialversorgung mittels RFID, die in technische Regelkreise eingebettet sind. Erfolgt am Verbrauchsort eine Materialentnahme, die via RFID-Scannung erfasst wird, wird automatisch ein Transportauftrag im Logistikzentrum für die Nachlieferung ausgelöst. Nach der Auslagerung wird das Material routengerecht auf den Milkrun mittels RFID kommissioniert. Die Anlieferung wird wiederum durch RFID durchgeführt und als Event dokumentiert. Diese Event-

⁴⁶⁵ Vgl. Schuh und Roesgen (2006), S. 48 ff.

Dokumentation erfolgt jedes Mal, wenn das Transportfahrzeug ein RFID-Gate passiert, so dass kontinuierlich Informationen über den Transportstatus vorhanden sind.

In einem CPLS integrieren die intelligenten logistischen Objekte Daten über Kunde, Produkt, Menge etc. eines Auftrages, um in einem dynamischen Umfeld selbststeuernd im Erstellungsprozess Entscheidungen fällen zu können. Dazu werden Ziele dezentral und individuell festgelegt, die aus der strategischen und operativen Ebene des Unternehmens resultieren. Für die Fähigkeit eines intelligenten Objektes, seinen eigenen Status (die Zuteilung eines Kundenauftrages zu jedem Element ist abhängig vom spezifischen Auftrag) hinsichtlich der Zielerreichung bzw. -abweichung im Regelkreis zu überprüfen und somit Einfluss auf die Selbststeuerung zu nehmen, müssen intelligente Objekte Eigenschaften wie (Teil-) Autonomie, Adaptivität, Reaktivität und Selbstmanagement nutzen können, um heterarchisch und nicht-deterministisch zu handeln.⁴⁶⁶ Durch die vertikale Integration mit anderen Systemen werden Objekte zusätzlich mit dem Personal im Austausch stehen. Die Ausstattung mit Funktionen und Eigenschaften wird das Aufgabenfeld der I4.0-Techniken erweitern und in die Freiheitsgrade des Personals eingreifen. Die entstehenden Zielkonflikte müssen für die Anpassungsfähigkeit in der Systemauslegung berücksichtigt werden. Ziel ist die Vermeidung von Konflikten zwischen Mensch-Maschine sowie zwischen strategischen/operativen Leistungskennzahlen. Der konsequente Abgleich operativer, taktischer und strategischer Zielgrößen sichert die effiziente Maßnahmenergreifung durch den technischen Regelkreis der Kybernetik.

Aktuell sind die Unternehmen noch nicht soweit, dass Entscheidungsprozesse in Gänze an Objekte delegiert werden. Daher wird neben dem Aufbau einer Infrastruktur zur Erhöhung der Datentransparenz und -qualität für die Planung, die Entwicklung von Integrationsplattformen zur Vernetzung aller Akteure für die Steuerung unter einem Gesamtsystemverständnis, die Integration der Mitarbeiter durch Partizipation an Entscheidungsprozessen durch Assistenzsysteme vorangetrieben.

Visuelles Entscheidungs- und Störungsmanagement durch Assistenzsysteme

Alle Unternehmen nutzen die Visualisierung und damit die Transparenz über den Status von Fertigungsaufträgen sowie die Feinterminierung (Bearbeitungs-, Rüst-, Transport- oder Liegezeiten), um Anpassungen zeitnah vornehmen zu können. Aufgrund der Medienbrüche durch manuelle Strichlisten, Telefonate, Emails oder Excel-Listen kommt es zu einer kontinuierlichen Abweichung zwischen Planung und realer Auftragsbearbeitung. Für die Optimierung von Planung und Steuerung bildet die informationstechnische Transparenz der Abläufe für einen umfassenden Zugriff auf aktuelle und hochauflösende Informationen und die Assistenz für Mitarbeiter eine Herausforderung. Verstärkt wird dieser Umstand durch eine heterogene Systemlandschaft sowie die Stammdaten-, Infrastruktur- sowie Prozessqualität. Lokale Teilplanungen, die Asymmetrie in der Qua-

⁴⁶⁶ Vgl. Windt (2006), S. 284 ff.

lität von Planungs- und Steuerungsparametern, die Fehleranfälligkeit bei der Übertragung von Daten über unterschiedliche Medien sowie die häufig nicht ausreichende Dokumentation beeinträchtigen die Genauigkeit der Planung. Zudem herrscht Intransparenz im operativen Bereich über den aktuellen Status der Auftragsabwicklung. Die Integration und Vernetzung aller Akteure wurde bereits als adäquates Mittel beschrieben, um Medienbrüche zu reduzieren und die Abläufe zu virtualisieren.

Zur Steigerung der Transparenz kennen die Behälter von Unternehmen D in der Beschaffungslogistik ihr transportiertes Produkt, die Menge, den dazugehörigen Lieferant, den Qualitäts- und Bearbeitungsstatus. Mitarbeiter können diese Informationen via Smart Phone in Echtzeit abrufen und zusätzlich Produktabbildungen aktueller Arbeitsanweisungen mit Fotos etc. einsehen. Unternehmen A entwickelte in diesem Kontext Lösungen für Routineentscheidungen und Nicht-Routineentscheidungen. Existieren vordefinierte Maßnahmen, die in Szenarien abgebildet sind, agieren Objekte mit einer automatischen Entscheidung. Die Ad hoc-Planung wurde zu einer Ad hoc-Steuerung und -Kontrolle erweitert. Für nicht eindeutige Entscheidungen existieren vordefinierte Dialoge, die bei einem spezifischen Event Handlungsalternativen auf dem Terminal oder mobilem Endgerät visualisieren, um die Entscheidungsqualität sowie die Reaktionsfähigkeit zu erhöhen und zu beschleunigen. Der Befüllstand von Behältern z.B. wird kontrolliert und dem assistierten Entscheider bei einem vordefinierten Stand gemeldet. Der assistierte Entscheider übernimmt die Auftragsveranlassung via mobilem Endgerät für die An- und Ablieferung. Gleichzeitig erhält die Logistik die Information über den Bedarf der Behältereinheit. Der assistierte Entscheider wird in seiner Entscheidungsfunktion unterstützt und von Routineentscheidungen entlastet. Für Nicht-Routinetätigkeiten wird aktuell situativ entschieden. Unternehmen C betreibt die Automatisierung der Entscheidungen sukzessive weiter, indem kognitive, nicht ausgesprochene Denkprozesse des Personals in die technische Sprache übersetzt werden.

Assistierten Entscheidern werden Prognosen und aktuelle Störungen in Echtzeit auf dem mobilen Endgerät visualisiert und als Advanced Data Analytics-Dienste zur Verfügung stellen. Nicht nur der Status quo der Abläufe wird dargestellt werden. Planungsalgorithmen werden in Echtzeit Entscheidungsempfehlungen generieren und die Auswirkungen auf Logistikkosten und -zeit darstellen, um dem assistierten Entscheider die Entscheidungshoheit überlassen zu können. Werden Intelligenz, Leistungsfähigkeit und die Vernetzung über Integrationsplattformen von intelligenten Objekten sukzessive zunehmen, wird dies Konsequenzen für die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine haben. Neben der ergonomischen Gestaltung der Schnittstelle werden I4.0-Techniken in die traditionellen Tätigkeitsbereiche der Menschen vordringen. Aktuell spielen Eigenschaften wie Kognition und künstliche Intelligenz in der Empirie keine Rolle. Durch I4.0 werden Planungsprozesse flexibilisiert und automatisiert. Werden Anlagen, Läger und Transportfahrzeuge intelligenter und durchgängig in die virtuelle Umgebung eingebettet (nicht nur an definierten Orten), werden diese befähigt, unvor-

hergesehene Ereignisse auf einer breiten Datenbasis bewerten zu können. Entscheidungen werden durch vorgefertigte Handlungsalternativen von Planungsalgorithmen Entscheidungsfreiheitsgrade der assistierten Entscheider innerhalb von definierten Toleranzgrenzen beschränken. Im Rahmen der technischen Entwicklung werden intelligente Objekte Nicht-Routinetätigkeiten in ihre Entscheidungen inkludieren und die Logistik nicht-deterministische Lösungen entwickeln. Die Auswirkungen werden extern u. a. die kundenzentrierte Anpassung und Informationsbereitstellung sowie die adäquate Reaktion auf Änderungen beschleunigen. Intern werden in Abhängigkeit von Standardisierung und Regelwerk Prozesse zur Stabilität beitragen und das Personal entlasten und flexibilisieren.

Das Ziel der angewandten Wissenschaften besteht darin, die praktische Problemlösungskraft von Gestaltungsmodellen und Regeln (Kapitel 1) für die Praxis zugänglich zu machen. In Anlehnung an den siebten und letzten Schritt des Forschungsprozesses nach *ULRICH* folgt im nächsten Abschnitt die *Beratung der Praxis* durch die Beantwortung der letzten sekundären Forschungsfrage mit der Erschließung von Handlungsempfehlungen.

5.5 Handlungsempfehlungen

Cyber-physische Logistiksysteme sind infolge des Technologieeinsatzes Veränderungen ausgesetzt, die sowohl ausrüster- sowie anwenderseitig relevant sind.

Platformaufbau zur Kundenintegration für die Datengenerierung und Entwicklung neuer Geschäftsmodelle

Integrationsplattformen dienen neben der **Integration und Vernetzung von internen Elementen der Anbindung der Kunden**. Mittels Online-Konfiguratoren oder intelligenten Produkten können Kunden in innerbetriebliche Abläufe integriert und deren Daten auf Plattformen zentralisiert gesammelt, ausgewertet und verteilt werden. **Konfiguratoren** schränken die Kunden in einer vordefinierten Variantenvielfalt ein und ermöglichen zugleich, das Einpflegen von Daten an die Kunden auszulagern und den Vertrieb zu entlasten. Als **zusätzliche Informationsquelle** können äußere Einflüsse besser abgeschätzt werden, um planbare Prozesse zu gestalten. Die **Kombination interner und externer Daten erhöht die Planungsgüte** für verbrauchs- und bedarfsorientierte Verfahren der Programm-, Mengen- und Kapazitätsplanung. Die auf **intelligenten Produkten** gespeicherten Kundendaten können durch die Anbindung an das Internet die Individualisierung der Kundenwünsche in kürzeren Zeitintervallen durch Entgrenzung, Virtualisierung und Service-Orientierung verstärken. Um auf kundenzentrierte kurzfristige Änderungswünsche adäquat reagieren zu können, kann der Eingriff der Kunden durch einen *point of no return* begrenzt und als zusätzliches Geschäftsmodell vergütet werden. Der Austausch der Planungsdaten unterschiedlicher Produkte, Anlagen, Läger etc. auf Plattformen hilft, die Effizienz in der Smart Factory zu steigern sowie die Entschei-

dungsqualität zu beschleunigen. Zusätzlich bietet die **Übertragung interner Betreibermodelle plattformbasierter Kunden-Lieferanten-Netzwerke auf externe Kunden-Lieferanten-Netzwerke** die Möglichkeit zur Kommerzialisierung interner Lösungen zur Erschließung neuer Kundengruppen.

Zielkonflikte lösen und Systemdenken fördern

Die Zunahme der einflussnehmenden Akteure infolge von Entgrenzung und Virtualisierung führt zu organisatorischen und logistischen **Zielkonflikten**. Organisatorisch wurde in den Fallstudien das fehlende **bereichsübergreifende Prozess- und Gesamtsystemverständnis** sowie die **Auflösung von Bereichszielen** thematisiert. Die Strukturen bisheriger Unternehmen sind mehrheitlich auf die Erfüllung der (dezentralen Bereichs-) Ziele des eigenen Einflussraumes ausgerichtet, der Systemansatz also Barrieren unterworfen. Infolge der Vernetzung rücken die strategische und operative Ebene zusammen. Dafür sollten Führungskräfte und Mitarbeiter unterschiedlicher Ebenen sich auf gemeinsame Systemziele in Abhängigkeit von der Befriedigung der Kundenbedürfnisse verständigen, auch wenn dies temporär zu Lasten lokaler Optima einzelner Bereiche geht. Ziel- und Kennzahlensysteme unterstützen die Operationalisierung und Transparenz durch die sachlogische **Verknüpfung der strategischen und operativen Ebene**. Kennzahlenbasierte logistische Zielkonflikte können durch die Integration der Kunden individualisiert und transparenter gestaltet werden. Dafür können **Entscheidungs- und Zielhierarchien** entwickelt werden, die klaren Regeln, d.h. **Standards** für die Entscheidungsfindung folgen, inwiefern z.B. welcher Kunde und somit welches Produkt auf welchem Transportfahrzeug Vorrang in der Bearbeitung besitzt.

Für die Erhöhung und Beschleunigung der Entscheidungsqualität ist ein Denken und Gestalten der Entscheidungspfade in Szenarien notwendig. Diese sollten in technische Spezifikationen übersetzt werden. Für intelligente Objekte und assistierte Entscheider bedeutet dies die klare Abgrenzung der „**Entscheidungshoheit**“ für Routine- und Nicht-Routineentscheidungen bei un-/vorhergesehenen Störungen. Wie beschrieben, ändern sich in I4.0 nicht die Optimierungsbereiche oder die Ziele, sondern die Instrumente der Zielerreichung. In den Fallstudien konnte übergreifend ein positiver Beitrag zur u.a. Verbesserung von Logistikleistung und -kosten sowie zur Entlastung von Logistikmitarbeitern von Routinetätigkeiten auf der operativen Ebene festgestellt werden. Da I4.0 von der Praxis „*als Mittel zum Zweck*“ betrachtet wird, ist es zielführend, sich im Kontext von I4.0-Projekten zunächst auf klassische **operative Optimierungsgrößen** zu konzentrieren. Realisiert wird dies durch neue Projektinstrumente wie z. B. die Vernetzung von Objekten und Subjekten oder die Schließung von Medienbrüchen. In diesem Kontext betonen Vertreter aus der Praxis die Notwendigkeit der **anwendungsgetriebenen, kundenorientierten, nicht „effekthaschenden“ und schrittweisen Realisierung** von Projekten. Lösungen sollten aus operativen Fragestellungen erarbeitet werden, den Prozesseignern dienen und mit ihnen in enger Abstimmung am Ort des Geschehens koordiniert werden. Dafür sollte intern Wissen über Technologien aufgebaut

oder extern mit dem Ziel zugekauft werden, die aktuelle **Angebotskomplexität zu reduzieren** und die **Leistungsfähigkeit** eigener und extern verfügbarer Technologien transparenter zu machen und diese in eine zeitliche sowie fachliche Abfolge mittels Technologie-Portfolio-Analysen zu überführen.

Medienbrüche auflösen und in Echtzeit planen, steuern und kontrollieren

Um für das Logistikmanagement in der Smart Factory Planungs-, Steuerungs- und Kontrollaufgaben zielgerichtet nutzbar zu machen, kann die **Abweichung zwischen geplanter und realer (Daten-) Welt** reduziert werden. Ziel ist die digitale Durchgängigkeit mit der **Schließung aller Medienbrüche**. Neben der Zielformulierung sind standardisierte, d. h. planbare, vorhersagbare und robuste Prozesse für die Verhinderung einer intransparenten, **isolierten und zeitversetzten Planung, Steuerung und Kontrolle** zwingende Voraussetzung. Fallstudienübergreifend wurde die Prozessauslegung nach Lean-Prinzipien thematisiert. Sind die Ziele bekannt und gewährleisten standardisierte Prozesse genügend Transparenz über die Auftragsabwicklung, kann die **Virtualisierung der Prozesse** angestrebt werden. Für die Virtualisierung bzw. den Aufbau der IT-Infrastruktur können logistische Objekte und Subjekte mit manueller/automatischer IDT ausgestattet werden. Bei manuellen Vorgängen bildet das Personal den Engpass, um echtzeitfähige Abbilder der Realität zu schaffen. Um diesen Engpass abzubauen, können Auto-ID-Verfahren über RFID Verwendung finden. Die Entlastung der Mitarbeiter von Routinebuchungen steigerte in den Fallstudien die Wertschöpfung. Ist die „Buchungsinfrastruktur“ aufgebaut, werden Material- und Informationsflüsse sukzessive synchronisiert. Resultat ist eine echtzeitfähige und genaue Planung und Steuerung. Zu beachten ist in diesem Kontext die **Definition von „Echtzeitfähigkeit“**. Die genaue Bestimmung sollte in enger Abstimmung mit den Anforderungen der Anwender einhergehen, da höhere Echtzeitfähigkeit i. d. R. mehr Datenvolumen und somit eine leistungsfähigere Infrastruktur nötig macht. Die Genauigkeit der virtuellen Abbildung korreliert demnach direkt mit der Prozess- und Stammdatenqualität, die in den Fallstudien vielfach als Barriere thematisiert wurde. Entspricht die Echtzeitfähigkeit den Prozessanforderungen, kann die Auslegung der Prozesse nach Lastspitzen infolge des Bullwhip aufgelöst und z. B. Bestände abgebaut werden. Ist die „Buchungsinfrastruktur“ aufgebaut, können **Objekte und Subjekte über Integrationsplattformen in die Materialflüsse integriert und miteinander vernetzt** werden.⁴⁶⁷ Für die Materialversorgung in den Fallstudien z. B. wurden das Personal und Transportfahrzeuge sowie Läger, Behälter und Anlagen in die Infrastruktur vernetzt und integriert. Die Auswahl zu vernetzender Elemente sowie der IDT kann demnach in Anlehnung an den jeweiligen Prozess erfolgen. Die Integration von intelligenten Objekten erfolgt einerseits durch eingebettete Systeme (über smarte Sensoren/Aktoren der CPS) und andererseits durch Buchungsvorgänge. Assistierte Entscheider werden über Assistenzsysteme (Smart Phones, Tablets)

⁴⁶⁷ Wie beschrieben lehnt die Praxis die 1:1-Vernetzung von innerbetrieblichen Akteuren zu Gunsten einer zentralen Integrationsplattform ab, um das Datenvolumen gering zu halten.

integriert. Dadurch wird die **Entscheidungsfähigkeit** dynamisiert, automatisiert und in der Qualität erhöht. Sind Objekte, Subjekte und Kunden vernetzt und integriert, kann die durchgängige Datenaufnahme für ein echtzeitfähiges Abbild der Abläufe genutzt und können Daten zielgerichtet ausgewertet werden. Um aus Daten Informationen zu machen, können Advanced Data Analytics zur Verbesserung von Prognosen sowie der Abmilderung oder Vermeidung von Störungen genutzt werden. Nach Virtualisierung, Vernetzung und Integration ist der **Ausbau der Service-Orientierung** infolge der Dezentralisierung anzustreben. Neben der Entscheidung über den Ort der Informationsverarbeitung ist der Ort der angebotenen Dienste relevant. Werden z. B. Software-Module von einer Vielzahl von intelligenten Objekten genutzt, kann es zielführend sein, diese zentral auf der Integrationsplattform anzubieten. Wird ein Dienst nur von einem Objekt genutzt, kann dieser Dienst direkt im CPS integriert werden. Kriterien können Lizenzierungsfragen sowie das entstehende Datenvolumen sein.

Logistik Anforderungen befriedigen und in technische Eigenschaften übersetzen

In der Smart Factory müssen einerseits die Anforderungen des Logistikmanagements berücksichtigt werden und andererseits diese in technische Eigenschaften zur Steigerung der Leistungsfähigkeit übersetzt werden. In dieser Arbeit konnte die Priorisierung der zu berücksichtigenden Anforderungen und Eigenschaften erarbeitet werden. Zunächst sollten die **Basisanforderungen** Anpassungsfähigkeit, Transparenz der Informationsbereitstellung, standardisierte Lean-Prozesse, Echtzeitfähigkeit sowie die Automatisierung berücksichtigt werden. Anschließend ist Datenschutz und -sicherheit, Ergonomie, Internet- bzw. Intranetfähigkeit, standardisierte Konnektivität sowie die Identität von Relevanz. Um das Potenzial von CPLS auszuschöpfen, kann neben dem Infrastrukturaufbau, der Vernetzung und Integration die technologische Leistungsfähigkeit von intelligenten Objekten und assistierten Entscheidern gefördert werden. Zielführende **Eigenschaften**, die insbesondere Zielkonflikten und der Entgrenzung Rechnung tragen, sind Adaptivität, Reaktivität, Entscheidungsfähigkeit der assistierten Entscheider sowie die Selbststeuerung. Zweitens werden Dezentralität, Individualisierung, Vernetzung, Arbeitsteilung sowie die Verlagerung der Verantwortung von Zielen und Aufgaben durch Integrationsfähigkeit, (Teil-) Autonomie, Selbstplanung und die Entscheidungsfähigkeit von intelligenten Objekten gestärkt. Wie empirisch belegt wurde, besitzen kognitive Fähigkeiten und die künstliche Intelligenz aktuell kaum Relevanz in der Smart Factory. Um zusätzliche Optimierungspotenziale zu generieren sowie die Auswirkungen auf die Mitarbeiter sozial verträglich zu gestalten, sollten Unternehmen diese Entwicklungen aktiv projektieren.

Änderungen in Verhalten und Einstellungen von Mitarbeitern vorbereiten

Die Unternehmen der empirischen Analyse streben im Rahmen der Auflösung der Automatisierungspyramide eine direkte Verknüpfung der strategischen mit der operativen Ebene an. Dieser Vorgang hat für Führungskräfte die Auflösung von Bereichsebenen

und -zielen sowie eine Flexibilisierung ihres Aufgabenspektrums zur Konsequenz. Dies bedeutet die sukzessive Auflösung von Hierarchien, die Reduzierung von Leitungsspannen sowie eine sinkende Informationsautonomie. Der notwendige Veränderungsprozess macht die Entwicklung **adaptiver Managementkonzepte** notwendig, die szenarienbasierte Entscheidungsunterstützung bieten sollten.

In Zukunft werden Entscheidungssituationen entstehen, die heute noch nicht absehbar sind. Kurz- bis mittelfristig werden Mitarbeiter in der Rolle als **Entscheidungsinstanz** gestärkt werden, gleichzeitig müssen jedoch die **(Entscheidungs-) Freiheitsgrade** über alle Ebenen eingeschränkt werden, um die Ziele der Gesamtunternehmung nicht zu gefährden. Dafür ist es notwendig, dass Mitarbeiter eine ganzheitliche Systemsicht einnehmen, um sich der **Verbindlichkeit und Kontinuität der Zielverfolgung** zu verpflichten. Dies ist insbesondere notwendig, wenn lokale Optima zu Gunsten des Systemoptimums aufgegeben werden müssen.

Mittel- bis langfristig wird der Anpassungsdruck für die Mitarbeiter infolge der Digitalisierung weiter zunehmen. Ursächlich ist das sukzessive Vordringen intelligenter Objekte in den Tätigkeitsbereich der Mitarbeiter. Diese Entwicklung wird durch die Zunahme von Kognition und künstlicher Intelligenz beschleunigt werden. Konsequenz sind **Zielkonflikte** in der **Mensch-Maschine-Interaktion** in einem kollaborativen Umfeld. Zusätzlich erzeugt die zunehmende Transparenz Vorbehalte aufgrund direkter Leistungsmessung sowie der möglichen Verletzung der **Privatsphäre**. Die Visualisierung durch **Assistenzsysteme** kann die Prozess- und Informationskomplexität reduzieren sowie die Entscheidungsqualität und -geschwindigkeit erhöhen. Um den zukünftigen Anforderungen an die Arbeitsorganisation und -gestaltung gerecht zu werden, haben sich **Lernfabriken** als Werkzeug bewährt. In einem geschützten Umfeld kann der Einsatz von neuen Technologien und die Kollaboration zwischen Mensch und Maschine erprobt und in den Alltag transferiert werden. Dies steigert die Benutzerakzeptanz und reduziert Überforderungen infolge der Informationszunahme. Neu zu entwickelnde **Didaktikkonzepte** mit praktischen und theoretischen Inhalten können alltägliche Routinen in cyber-physischen Logistiksystemen unterstützen.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das letzte Kapitel der vorliegenden Arbeit nimmt in Abschnitt 6.1 eine Zusammenfassung anhand der primären und sekundären Forschungsfragen vor. Abschnitt 6.2 reflektiert die Ergebnisse und Methoden der vorliegenden Ergebnisse. Der letzte Abschnitt 6.3 dient dem Ausblick sowie dem zukünftigen Forschungsbedarf.

6.1 Zusammenfassung

Für die Zielsetzung dieser Arbeit, ein cyber-physisches Logistiksystem im Kontext der 14.0 zu gestalten und dessen Beitrag zur Unterstützung des Logistikmanagements in einer Smart Factory zu untersuchen, wurden sechs sekundäre Forschungsfragen formuliert und sukzessive beantwortet.

F.1 Welche Auswirkungen im Kontext von Industrie 4.0 können für das Logistikmanagement festgestellt werden?

Auf Basis der Literaturanalyse wurden Auswirkungen auf das Logistikmanagement in Form logistischer und technologische Trends, Herausforderungen und Potenziale untersucht. Als **logistische Trends** konnten die steigende Individualisierung der Kundenwünsche, die zunehmende Vernetzung der Wirtschaft sowie der Kostendruck und Zielkonflikte identifiziert werden. **Technologische Trends** sind die Virtualisierung und Digitalisierung, die Auflösung der Automatisierungspyramide und die Dezentralisierung, die Vernetzung von Objekten und Subjekten via Internet sowie die zunehmende Integration von Daten, Diensten, Objekten und Subjekten durch (Cloud-) Plattformen. **Herausforderungen** sind Zielkonflikte, intransparente, isolierte, zeitversetzte Planungs-, Steuerungs- und Kontrollprozesse sowie die inadäquate Nutzung von Kundeninformationen. Zudem stellen das Bereichsdenken sowie die Anpassungen im Führungsverhalten eine Herausforderung dar. Technische Herausforderungen sind heterogene Systemlandschaften, Standards und die Datensicherheit. **Anwendungspotenziale** liegen in neuen Geschäftsmodellen, monetären Einsparungen sowie der Synchronisation von Material- und Informationsflüssen. Die Vernetzung und Integration der Wirtschaft soll eine flexible, echtzeitnahe Produktionsplanung und -steuerung ermöglichen und die Transparenz über die gesamte Wertschöpfung unterstützen sowie zur Befriedigung kundenindividueller Erwartungen beitragen. Smart Data-Anwendungen und Assistenzsysteme ermöglichen Entscheidungsunterstützung bei logistischen Zielkonflikten und Aufgaben.

F.2 Welche Konzepte können im Kontext von Industrie 4.0 beschrieben und abgegrenzt werden?

In Wissenschaft und Praxis existiert kein einheitliches Verständnis über Begriffe, Konzepte oder Technologien, die im Kontext von 14.0 Verwendung finden. Mittels systematischer Literaturanalyse konnten 14.0 die Konzepte **cyber-physische Systeme** (technische Basis), das **Internet of Everything** (nicht-industrielle Anwendung), die **Smart**

Ecosystems (industrielle Ökosysteme) sowie die **Smart Factory** (Anwendung in Produktion und Logistik) zugeordnet werden. **CPS** stellen dezentrale, autonome eingebettete Systeme dar, die miteinander vernetzt das Internet der Dinge, Daten, Dienste und Menschen (IoE) durch kurz-, mittel- oder langfristige virtuelle oder physische Netzwerke formen. Das **IoE** bildete den Rahmen des konzeptionellen Bezugssystems dieser Arbeit. Die **Smart Ecosystems** sind industrielle Ökosysteme des IoE, durch die die **Smart Factory** das industrielle Ökosystem für Produktion und Logistik darstellt. Via Inter- oder Intranet formen kurz-, mittel- oder langfristige unternehmensinterne oder -externe Netzwerke aus intelligenten Objekten und Subjekten cyber-physische Logistik- und Produktionssysteme. CPS befähigen diese Subjekte, Objekte und Systeme dezentral und autonom zu planen, zu steuern, zu kontrollieren, zu organisieren und zu lernen. Die wesentliche Neuerung der Smart Factory liegt in der Integration externer Kunden (via intelligenter Produkte oder Materialien) in interne Abläufe. **I4.0** ist die industrielle Anwendung des IoE und hat die digitale Durchgängigkeit vertikal und horizontal integrierter Wertschöpfungssysteme zur Reduzierung von Medienbrüchen in einer oder einem Netzwerk von Smart Factories zum Ziel. In I4.0 werden Subjekte, intelligente Objekte und Produkte auf Basis von CPS mit Funktionen und Eigenschaften ausgestattet, die sie in die Lage versetzen, selbstständig zu planen, zu steuern, zu kontrollieren, zu organisieren und zu lernen. Über Integrationsplattformen werden Subjekte und Objekte via Inter- oder Intranet zu cyber-physischen Logistik- und Produktionssystemen vernetzt und in den gesamten Produktlebenszyklus integriert. I4.0 stellt eine Evolution vorhandener Technologien dar, die durch neue Anwendungsfelder revolutionären Charakter aufweisen kann.

F.3 Welche Technologien und Techniken können der Industrie 4.0 zugeordnet werden und welche Eigenschaften und Anforderungen existieren prinzipiell?

In einer Smart Factory werden **assistierte Entscheider** (Internet der Menschen), **intelligente Objekte und Produkte** (Internet der Dinge) über **Integrationsplattformen** (Internet der Daten und Dienste) via Inter- oder Intranet vernetzt und integriert. Assistierte Entscheider werden durch Assistenzsysteme (z. B. Mobile Computing) und intelligente Objekte durch CPS-Komponenten (z. B. smarte Sensoren/Aktoren) in Material- und Informationsflüsse integriert. Integrationsplattformen dienen als Infrastruktur (z. B. via Cloud Computing) der Integration und Vernetzung und stellen Dienste wie Advanced Data Analytics zur Verfügung, so dass aus Daten (Big Data) Informationen (Smart Data) werden.

Mittels der systematischen Literaturanalyse konnten 52 **Eigenschaften** erarbeitet werden, von denen 50 Eigenschaften (CPS mit 23, I4.0 mit 11, IoE mit 9 und Smart Factory mit 7) dem konzeptionellen Bezugssystem zugeordnet wurden. Die Ergebnisse zeigten ein fragmentiertes Bild innerhalb der Konzepte und kaum Auseinandersetzung mit der Logistik. 133 **Anforderungen** wurden ermittelt, von denen 108 (CPS mit 49, Smart Factory mit 22, IoE mit 20 und I4.0 mit 17) dem konzeptionellen Bezugssystem zuge-

ordnet wurden. Literaturbasierte Anforderungen konnten in der Mehrheit für Ausrüster ermittelt werden. Logistikanforderungen konnten in Bezug auf klassische Zielgrößen festgestellt werden.

F.4 Warum und wie wird Industrie 4.0 in der industriellen Logistik eingesetzt und welche Anforderungen und Eigenschaften präferiert das Logistikmanagement?

Diesbezügliche Aktivitäten wurden seit dem Jahr 2012 durch die Bundesregierung beschleunigt, in dem erstmalig der Begriff I4.0 präsentiert wurde. In den vier Fallstudien hat sich gezeigt, dass die Unternehmensleitung die treibende Kraft für Aktivitäten ist. I4.0 stellt in den Unternehmen ein Werkzeug dar, um **die klassischen Zielgrößen** Kosten, Zeit und Qualität u. a. in der Logistik weiter zu verbessern. Zudem werden die Steigerung der Transparenz sowie die Komplexitätsbeherrschung angestrebt. Realisiert wird dies auf taktischer Ebene durch neue Projektinstrumente wie z. B. die Virtualisierung der Prozessabläufe oder die Vernetzung von Objekten und Subjekten mit dem Ziel der Reduzierung von Medienbrüchen. Die positivsten Effekte konnten im taktisch/ operativen Bereich bei Logistikleistung und -kosten, wertschöpfenden Tätigkeiten, der Entscheidungsqualität sowie der bereichsübergreifenden Optimierung generiert werden. Auf der strategischen Ebene sind Geschäftsmodelle eher als „Zufallsprodukt“ entstanden. Die Unternehmen betonen, dass die neuartigen Projekte keine abschließende Aussage über die Vor- und Nachteile zulassen, der Trend aber positiv verlaufe. **Herausforderungen** für die Praxis liegen u. a. im bereichsübergreifenden Gesamtsystemverständnis, der Mitarbeiterakzeptanz sowie der Stammdaten-, Infrastruktur- und Prozessqualität.

Die Empirie diene zudem der Identifizierung und Priorisierung von **Eigenschaften und Anforderungen** aus der Perspektive des Logistikmanagements. Als Basisanforderungen erwiesen sich Anpassungsfähigkeit, Transparenz der Informationsbereitstellung, standardisierte Lean-Prozesse, Echtzeitfähigkeit sowie die Automatisierung. Leistungsanforderungen sind Datensicherheit und -schutz, Ergonomie, Internet- und Intranetfähigkeit, standardisierte Konnektivität sowie die Identität. Begeisterungsanforderungen sind dem Kunden i. d. R. nicht bekannt und stellen in dieser Arbeit die Eigenschaften dar. Eigenschaften mit höchster Priorität sind Adaptivität, Reaktivität, Entscheidungsfähigkeit für Subjekte sowie die Selbststeuerung. An zweiter Stelle stehen Integrationsfähigkeit, (Teil-) Autonomie, Selbstplanung sowie Entscheidungsfähigkeit für Objekte. Mit geringer Relevanz wurden die Kognition sowie die künstliche Intelligenz bewertet, deren Wichtigkeit für die Zukunft allerdings die Praxis betonte.

Eine Diskrepanz zwischen theoretischen Möglichkeiten und der praktischen Umsetzung konnte u. a. bei Funktionen und Eigenschaften wie der künstlichen Intelligenz festgestellt werden. Zudem weichen Forderungen der vollständigen Dezentralisierung durch eine 1:1-Vernetzung und der damit verbundenen umfassenden Verlagerung der Intelligenz auf operative Elemente von den Anforderungen der Praxis ab. Die Nutzung von

Integrationsplattformen zur Reduzierung der Infrastrukturkomplexität sowie die Kombination der de-/zentralen Daten- und Dienstenutzung wird anvisiert.

F.5 Wie können cyber-physische Logistiksysteme gestaltet werden?

Cyber-physische Logistiksysteme sind (innerbetriebliche) Netzwerke in einer Smart Factory, die aus Produkt-, Objekt- und Subjektsystemen bestehen, die über Integrationsplattformen miteinander vernetzt sind. Die Gestaltung von CPLS ist durch die Konzeptionierung und Entwicklung determiniert. Vorab erfolgte die Systematisierung auf Basis des theoretischen Bezugssystems durch die Gestaltungsebenen System-, Netzwerk- und Technologieebene. Die Erkenntnisse des konzeptionellen Bezugssystems sowie der empirischen Analyse lieferten Merkmale und Ausprägungen aus der Perspektive des Logistikmanagements für diese Gestaltungsebenen.

Die **Konzeptionierung** leitet sich aus Veränderungsdimensionen ab, die auf der Systemebene z.B. in Virtualisierung und Entgrenzung, auf der Netzwerkebene z.B. in Arbeitsteilung und Kundenzentrierung und auf der Technologieebene z.B. Service-Orientierung und Intelligenz bestehen. Daraus abgeleitet wurden Gestaltungsempfehlungen für die Ebenen. Auf der Systemebene bedeutete dies die Definition von Zielen, Grenzen, Funktionen und Elementen. Auf der Netzwerkebene wurden die Merkmale auf die Elemente verteilt sowie deren Zusammenhänge beschrieben. Die Gestaltungsmerkmale von System- und Netzwerkebene flossen als Anforderungen des Logistikmanagements in die Technologieebene ein. Auf dieser Ebene erfolgte die Auswahl geeigneter Komponenten für intelligente Objekte, Assistenzsysteme für assistierte Entscheider, Anwendungen für Integrationsplattformen sowie die Auswahl geeigneter Eigenschaften.

Analog wurden für die **Entwicklung** von CPLS Gestaltungsfelder aus der empirischen Analyse wie die Fokussierung auf (klassische) Zielgrößen, die Standardisierung der Prozesse, die Technologieauswahl zur Virtualisierung der Prozesse sowie Einstellung und Verhalten der Mitarbeiter abgeleitet und für die Auswahl von Methoden und Instrumenten benutzt. Auf der Systemebene bedeutete dies die Nutzung von KANO-Modell, Wertstromdesign sowie Kennzahlensystemen. Auf der Netzwerkebene kommen Einfluss-Matrix, System-Grid, Relationen-Diagramm, SCEM und Qualifikationsmatrix zum Einsatz. Balanced Scorecards erweitern und individualisieren das Kennzahlensystem für intelligente Objekte und Subjekte. Auf der Technologieebene wurden die Technologie-Portfolio-Analyse, der Virtualisierungsprozess sowie die Darstellung in einer Referenzarchitektur empfohlen. Die Ergebnisse flossen in die Finalisierung der „cyber-physischen“ Soll-Prozesslandschaft ein. Als letzter Schritt wurde die Implementierung über Pilotierung und der Einsatz von Lernfabriken empfohlen. Das Logistikmanagement gewährleistet durch kontinuierliche Erfolgskontrolle, Mitarbeiterführung und -befähigung die zielorientierte Umsetzung.

F.6 Welche Handlungsempfehlungen können für das Logistikmanagement im Kontext von Industrie 4.0 abgeleitet werden?

Auf Basis der Erkenntnisse aus Wissenschaft, Praxis sowie der Gestaltung konnten fünf wesentliche Handlungsempfehlungen abgeleitet werden: (1) **Plattformaufbau zur Kundenintegration für die Datengenerierung und Entwicklung neuer Geschäftsmodelle** zur Verbesserung von Planungsgüte, Entscheidungsqualität sowie der Erschließung neuer Kundengruppen. (2) Die **Lösung von Zielkonflikten** sowie die **Förderung des Systemdenkens** durch die Auflösung von Bereichszielen, die Verknüpfung der strategischen und operativen Ebene, der Entwicklung von Standards für Entscheidungs- und Zielhierarchien sowie der Reduzierung der Angebotskomplexität für Transparenz über die Leistungsfähigkeit von I4.0 in der Logistik. (3) Die **Reduzierung von Medienbrüchen** und die **Planung, Steuerung und Kontrolle in Echtzeit** durch die Virtualisierung der Prozesse, die Vernetzung von Elementen über Integrationsplattformen, deren Integration in Materialflüsse sowie der Ausbau der Service-Orientierung. (4) **Logistikanforderungen befriedigen und in technische Eigenschaften übersetzen** durch die Berücksichtigung der Priorisierung von Anforderungen und Eigenschaften im Zusammenhang der hier generierten Potenziale. (5) Als letzte Handlungsempfehlung sind **Änderungen in Verhalten und Einstellungen von Mitarbeitern** durch adaptive Managementkonzepte, Verbindlichkeit und Kontinuität in der Zielverfolgung, Assistenzsysteme sowie Lernfabriken vorzubereiten.

6.2 Kritische Würdigung und Grenzen der Gestaltung

Die wissenschaftliche und praktische Untersuchung von I4.0 in der Logistik einer Smart Factory lieferte ein fragmentiertes bzw. fehlendes Verständnis über Konzepte, Herausforderungen, Potenziale und Anwendungsmöglichkeiten. Wissenschaftliche Beiträge thematisieren überwiegend Visionen, Potenziale und Demonstratoren im Produktionsumfeld. Praktische Anwendungsfälle stehen zumeist am Beginn der Umsetzung.

Die vorliegende Arbeit konnte mit der Gestaltung cyber-physischer Logistiksysteme und der Untersuchung des Beitrags zur Unterstützung des Logistikmanagements in der Smart Factory das Forschungsziel erreichen und dadurch einen wissenschaftlichen und praktischen Beitrag im logistischen Kontext der I4.0 leisten. Durch die systematische Literaturanalyse konnte der wissenschaftliche Status quo anhand von Konzepten, Technologien, Techniken, Anforderungen und Eigenschaften systematisiert, beschrieben, abgegrenzt und in ein konzeptionelles Bezugssystem überführt werden. Diese Erkenntnisse wurden auf Basis der empirischen Analyse mit dem Status quo des I4.0-Einsatzes in der Logistik abgeglichen. Dadurch konnte ein differenziertes Bild über Forderungen der Wissenschaft und der praktischen Anwendbarkeit im Kontext von I4.0 gewonnen werden.

Die Praxis hat begonnen, die Digitalisierungsaktivitäten unter dem Konzept I4.0 neu zu bündeln. In der Anwendung dient I4.0 der Praxis als Werkzeug, die klassischen Ziele zu

erreichen. Dass dies zunehmend gelingt, konnte in den Fallstudien bestätigt werden. Zusätzlich sind mit I4.0 neue Instrumente für die Zielerreichung hinzugekommen, die Anwendungspotenziale hinsichtlich einer flexiblen, kurzfristigen Planung, Steuerung und Kontrolle adaptiver Logistiksysteme schaffen. Die kommerzielle Verwertung von internen Lösungen als neue Geschäftsmodelle konnte ebenfalls festgestellt werden. Dennoch sollten Projekte anwendungsorientiert initiiert werden, da aktuell industrielle Lösungen im Umfeld der Digitalisierung zunehmend mit „Industrie 4.0“ etikettiert werden. Dies führt bei Anwendern durch intransparente Angebotskomplexität sowie fehlender Erfahrung über die Leistungsfähigkeit und das Kosten-Nutzen-Verhältnis zur Verunsicherung. Dafür nötige Anforderungen an I4.0 sowie die technischen Eigenschaften für die Leistungsfähigkeit waren nur fragmentiert und kaum für die Logistik existent. Diese konnten in der vorliegenden Arbeit sukzessive ausdetailliert und aus der Logistikperspektive heraus bewertet werden. Es konnten nicht-/technische Anforderungen aufgenommen werden, in denen z. B. die Rolle des Menschen betont, der Schutz der Privatsphäre allerdings nicht explizit adressiert wurde. Während die Eigenschaft der Adaptivität, Selbststeuerung und Entscheidungsfähigkeit des Personals im Fokus steht, kommen kognitive Fähigkeiten sowie die künstliche Intelligenz nicht über das Forschungsstadium hinaus. Ähnlich verhält es sich mit der Integration des Kunden durch intelligente Produkte. Stellt diese eine wesentliche Neuerung in der Smart Factory dar, konnten in den Fallstudien sowie in der Gruppenbefragung keine konkreten Aktivitäten diesbezüglich festgestellt werden. Grund ist die Konzentration auf die Integration innerbetrieblicher Systemelemente wie den assistierten Entscheider, der in wissenschaftlichen Beiträgen sowie der Empirie fokussiert wird. Die Lehren aus dem „Computer Integrated Manufacturing“ scheinen hier Einzug zu halten, auch wenn die Auseinandersetzung mit der Privatsphäre bisher nicht ausreichend thematisiert wird.

Aus Wissenschaft und Praxis konnten Gestaltungsanforderungen für die Gestaltung cyber-physischer Logistiksysteme für einen I4.0-Einsatz in der Logistik formuliert werden. Die Erkenntnisse wurden nach Gestaltungsebenen und -merkmalen systematisiert und in die Konzeptionierung und Entwicklung der CPLS überführt, um für das Logistikmanagement einen Unterstützungsbeitrag zu leisten. Die gestellten Anforderungen konnten berücksichtigt werden, können in dieser Arbeit allerdings nicht auf ihre organisatorische und technologische Realisierbarkeit hin überprüft werden.

Methodisch bedingt, besitzt die Arbeit Stärken und Schwächen. Aufgrund der Aktualität wurde das Schneeballverfahren im Rahmen der systematischen Literaturanalyse gewählt, um eine breite wissenschaftliche Basis zu erarbeiten. Konsequenz war die Konzentration auf den deutschen Sprachraum. Dieser Schwäche wurde durch die Anreicherung von wissenschaftlichen Beiträgen und aktueller Literatur über die Basisliteratur hinaus Rechnung getragen. Daneben wurde in der Arbeit auf eine Mischung qualitativer Methoden gesetzt. Neben der Literaturanalyse kamen Interviews für die Ermittlung der Motivation, im Rahmen der Fallstudienuntersuchung sowie zur Validierung des Gestal-

tungsansatzes zum Einsatz. Die interviewten Experten für Motivation, Fallstudien und Validierung waren jeweils unterschiedlich. Durch Experten der Anwender- und Ausrüsterindustrie der strategischen und operativen Ebene konnte die Markt- und Technologieseite umfassend beleuchtet werden. Die Fokussierung auf interne Prozesse von Maschinenbauunternehmen resultiert aus den Auswahlkriterien, die Unternehmen mit hohen I4.0-Aktivitäten adressierten. Die Gruppenbefragung wurde zusätzlich mit Logistikmanagern durchgeführt, um der geringen Fallstudienanzahl entgegen zu wirken. Die Teilnehmer wurden vorher eingehend auf ihre Eignung hin überprüft.

6.3 Zukünftiger Forschungsbedarf und Ausblick

Die Begrenzung der hier vorliegenden Arbeit liegt an dem Untersuchungsraum, der die interne Sicht der taktischen und operativen Ebene von Beschaffungs-, Produktions- und Distributionslogistik produzierender Industrieunternehmen in Deutschland sowie fallweise dessen externe Schnittstellen zu Lieferanten und Kunden betrachtet. Zukünftige Forschung könnte die Ausdehnung auf Logistikprozesse außerhalb bzw. zwischen Fabriken über den gesamten Produktlebenszyklus untersuchen. Dieser Forschungsbedarf sollte um die Perspektive der Logistikdienstleister erweitert werden.

Darüber hinaus sollte die Erforschung und Entwicklung von Geschäftsmodellen, Technologien sowie der Rolle des assistierten Entscheiders forciert werden, da die Integration nicht-/technischer Elemente in logistische Abläufe sukzessive zunehmen wird. Intelligente Objekte werden in die klassischen Tätigkeitsbereiche der Mitarbeiter aller Hierarchieebenen vordringen. Dies erzeugt Anpassungsdruck und Vorbehalte. Anwendungsgetriebene Projekte und die Auseinandersetzung der Führungskräfte mit neuen Managementkonzepten können dem entgegenwirken und unterschiedlichen Mentalitäten das Systemverständnis näherbringen. Dies wird zudem nötig, um die Kundenintegration in Form von intelligenten Produkten zu berücksichtigen. Weitergehende Forschungsaktivitäten sollten bzgl. des Einsatzes von Eigenschaften wie der Kognition und künstlichen Intelligenz anvisiert werden, die im logistischen Umfeld Potenzial aufweisen, allerdings noch kaum adressiert werden. Simulationsmodelle könnten den „Break-Even“ des notwendigen Grades an De-/Zentralität oder des Standardisierungsgrades von Objekten, Subjekten und Prozessen sowie deren Beitrag zur logistischen Zielerreichung erforschen.

Wissenschaft und Praxis stehen in Deutschland am Anfang. Bei I4.0 handelt es sich um einen evolutionären Prozess vorhandener Technologien, der revolutionären Charakter insbesondere durch disruptive Geschäftsmodelle erreichen kann. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen auf, dass I4.0 in der industriellen Logistik eine Vielzahl an Potenzialen und Herausforderungen ermöglicht. Sollten strategische und operative Ebenen informatisch direkt miteinander verknüpft werden und in cyber-physischen Logistiksystemen Planungs-, Steuerungs-, und Kontrollentscheidungen dezentral und autonom getroffen werden, wird dies weitreichende Veränderungen zur Folge haben. Die logistische An-

wendung von Technologien der I4.0 in einer Smart Factory sollte daher keinen Selbstzweck darstellen. Auch wenn ein breites Industrieumfeld von I4.0 in der Logistik profitieren wird, sind die Analyse von Anforderungen sowie die Auswahl technischer Eigenschaften anwendungsgetrieben zu gestalten. Denn neben positiven Effekten bzgl. Produktivität und Transparenz können Unternehmensbereiche wegfallen bzw. deren Aufgabenfeld erheblich reduziert werden. Infolgedessen ist die Integration der Mitarbeiter in den Transformationsprozess zu berücksichtigen, um die gesamtgesellschaftlichen Bedeutung nicht außer Acht zu lassen.

Die Entwicklungen für die Industrie und explizit für den Wirtschaftszweig Logistik lassen Regierungen, Unternehmen und die Wissenschaft weltweit ihre Aktivitäten erhöhen, so dass es sich nicht um eine Modeerscheinung handelt. Vielmehr erfasst die Digitalisierung sukzessive alle privaten, öffentlichen und kommerziellen Lebensbereiche, weswegen sich eine moderne Informationsgesellschaft der bewussten Gestaltung dieser unabwendbaren Aufgabe nicht entziehen kann.

7. ANHANG

TECHNOLOGIEN IN DER INDUSTRIELLEN LOGISTIK

Automationstechnologien

	Beschreibung
<i>Automatisierungssysteme</i>	
<i>Auslösende Systeme</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einfachste Art der AS ▪ Für ein bestimmtes Ereignis, erfolgt eine zugeordnete Handlung oder Handlungsfolge ▪ Automatische Alarmauslösung erfolgt nach Schwellenwerterreichung
<i>Kontrollsysteme</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entlastung für den Mensch von Dauerbelastung ▪ Lediglich Resultatanzeige mit „Open-Loop-Charakter ▪ Bsp.: Prozessdiagnosesysteme, Überwachungssysteme für Anlagen
<i>Ereignisdiskrete Systeme</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Systeme, die Informationen über Ereignisse verarbeiten ▪ Bevorzugt Prozessereignisse oder manuelle Eingaben ▪ Ereignisse besitzen i. d. R. binären Charakter
<i>Regelungssysteme</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Offene Steuerung (Feed Forward Control): Jedem Wert des (sensorisch erfassten) Eingangssignals bzw. einer Bedingung wird ein bestimmtes Ausgangs-(Stell-)signal zugewiesen. Keine Kontrolle der Wirkung der beeinflussten Größe ▪ Geschlossene Steuerung (Feedback Control): Mit Kontrolle der Wirkung der beeinflussten Größe
<i>AS mit Fuzzy-Technologie</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verarbeitung und Verknüpfung unscharf formulierter (qualitativen) Aussagen ▪ Ziehen von unscharfen Schlussfolgerungen
<i>Selbstoptimierende Systeme</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine definierte Zielvorgabe/Sollwert ▪ Möglicher Extremwert muss selbsttätig gefunden werden ▪ Aufgabe liegt in der Zielsuche und -haltung ▪ Voraussetzung: Ein aktuell gemessener Qualitätswert
<i>Selbsteinstellende und adaptive Systeme</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Spezifikation des Reglers erfolgt selbsttätig ▪ Selbsteinstellende Regelungen können zu Systemen mit (quasi) Adaptivverhalten ausgebaut werden ▪ Erweiterung um einen einfachen Mechanismus, der selbsttätig periodische Wiederholungen der Selbsteinstellung veranlasst
<i>Selbstorganisierende Systeme</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Selbstentwickelnden Systeme ▪ Gemeint ist damit eine Entwicklung von einem niedrigeren zum höheren Leistungsniveau

<i>Problemlösende</i>	<i>bzw.</i>	▪ AS mit Problemlösungsverhalten
<i>Planende Systeme</i>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fähigkeit der Überführung von Problemen in eine Problemlösung ▪ Eigenständige Bestimmung und Ausführung geeigneter Handlungen ▪ Bsp.: Agenten und Agentensysteme
<i>Lernende Systeme</i>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Höchstwertigste Kategorie der AS ▪ Wesentliche Kategorie der Künstlichen Intelligenz ▪ Maschinelles lernen = Fähigkeit von Systemen, ihr Verhalten durch Erwerb oder Übermittlung von (Problem-) Wissen zielgerichtet zu verbessern ▪ Lernfähige Systeme haben die Fähigkeit auf erlerntes Wissen zurückzugreifen

Tabelle Anhang 12: Automatisierungssysteme⁴⁶⁸

⁴⁶⁸ Vgl. Weller (2008), S. 45 ff.

Informationssysteme

APS (Advanced Planning and Scheduling) und **SCM** (Supply Chain Management) haben die strategische Aufgabe Produktion und Logistik unternehmensübergreifend unter der Restriktion verfügbarer Ressourcen in Echtzeit zu optimieren sowie simultan zu planen.⁴⁶⁹ Zur Durchführung von Mengen- und Terminplanung werden Daten aus ERP (Enterprise Resource Planning) und PPS (Produktionsplanung und -steuerung) bezogen, um über die durchgehende Steuerung und Optimierung der gesamten Prozesskette das ERP zu erweitern.⁴⁷⁰ APS und SCM sind für die weitere Arbeit nicht relevant, befinden sich aber wie das **ERP** i. d. R. auf der obersten Ebene der klassischen Automatisierungspyramide.⁴⁷¹ Dieses System dient der langfristigen Grobplanung und der unternehmensweiten (i. d. R. für einen Standort), taktischen und operativen Integration von Ressourcen und Funktionen mit dem Ziel des effizienten Ressourceneinsatzes.⁴⁷² Im Fokus der Planung stehen die Produktionsprogrammplanung und -durchführungsplanung sowie die Bereitstellungsplanung.⁴⁷³ PPS und MRP können als Teilsysteme des ERP angesehen werden und werden im folgenden Verlauf unter diesem subsumiert. Funktionen und Aufgaben sind daher nicht trennscharf zu definieren. **PPS-Systeme** fokussieren im Gegensatz zu den ERP-Systemen nur den Produktionsprozess eines Unternehmens. Die Aufgaben von PPS-Systemen liegen in der Planung, Steuerung und Überwachung des Produktionsprozesses vom Angebot bis zum Versand unter Mengen-, Termin- und Kapazitätsrestriktionen.⁴⁷⁴ Angestrebt wird die Synchronisierung von Produktionsbeginn und Ende sowie dem prognostizierten Bedarf, um die Zielgrößen Auslastung sowie Bestandskosten zu optimieren. Die Materialbedarfsplanung durch die Auflösung von Primärbedarfen unter Betrachtung von Stücklisten und Lagerbeständen zu Sekundärbedarfen erledigt das *MRP-I* (Material Requirements Planning). Das MRP-I erfährt durch das *MRP-II* (Manufacturing Resources Planning) eine Erweiterung mit weiteren Planungsebenen. Die Planung erfolgt sequentiell und iterativ.⁴⁷⁵ Das **MES** (Manufacturing Execution Systems) kann Synonym als Fertigungsmanagementsystem bezeichnet werden und befindet sich auf der Betriebsleitebene. Die Feinplanung einzelner Produktionsprozesse, die (Betriebsdaten-) Überwachung von Kennzahlen sowie das Material- und Qualitätsmanagement werden durch das MES gewährleistet.⁴⁷⁶ Durch die Vernetzung mit Produktions- und Logistiktechnik wird die Echtzeitkontrolle von Logistik- und Produktionsprozessen ermöglicht.⁴⁷⁷ MES fungieren somit als Mittler zwischen Planung (ERP) und Produktion (Materialflussrechner). Die Steuerung, Kontrolle und

⁴⁶⁹ Vgl. Straube (2013), S. 34 f.

⁴⁷⁰ Vgl. Straube (2012), S. 17; Straube (2014b), S. 22

⁴⁷¹ Vgl. Kropik (2009), S. 63; Stich et al. (2013), S. 271

⁴⁷² Vgl. Fallenbeck und Eckert (2014), S. 404 ff.; Straube (2013), S. 34 f.; Straube (2014b), S. 22

⁴⁷³ Vgl. Straube (2012), S. 17

⁴⁷⁴ Vgl. Stich et al. (2013), S. 260

⁴⁷⁵ Vgl. Straube (2012), S. 17

⁴⁷⁶ Vgl. Fallenbeck und Eckert (2014), S. 404 ff.

⁴⁷⁷ Vgl. Straube (2013), S. 34 f.

Optimierung von Lager- und Distributionssystemen ist die Aufgabe des **WMS** (Warehouse Management System). Das Aufgabenfeld kann sich auf die Mengen- und Lagerverwaltung sowie auf die Steuerung oder Disposition von Fördermitteln beziehen.⁴⁷⁸ MES und WMS befinden sich i. d. R. auf der Betriebsleiteben der Automatisierungspyramide.⁴⁷⁹ WMS und MFR übernehmen die Zuteilung von Transportaufträgen und -mitteln. **TMS** (Transport Management System) übernehmen die Aufgaben der Planung und Steuerung von Transportvorgängen, wie dem Transport via Land oder See. Darüber hinaus können sie für das Fuhrparkmanagement, die Routenplanung oder der Planung von Wartungen zum Einsatz kommen.⁴⁸⁰ Das **SCEM** (Supply Chain Event Management) kann als Managementkonzept, als Softwarelösung oder als Softwarekomponente eingesetzt werden.⁴⁸¹ Als proaktives Management- und Informationssystem liegen die Hauptaufgaben in der operativen Steuerung und Kontrolle von Wertschöpfungsprozessen.⁴⁸² Erweitert durch informatorische Funktionen überwacht, meldet, simuliert, eskaliert und steuert das SCEM sogenannte Events (Störungen im Ablauf) und generiert neue oder verbesserte Maßnahmen.⁴⁸³

⁴⁷⁸ Vgl. Stich et al. (2013), S. 260; Straube (2013), S. 34 f.

⁴⁷⁹ Vgl. Kropik (2009), S. 63; Stich et al. (2013), S. 271

⁴⁸⁰ Vgl. Straube (2013), S. 34 f.

⁴⁸¹ Vgl. Otto (2003), S. 1 ff.

⁴⁸² Vgl. Nissen (2002), S. 477 ff.

⁴⁸³ Vgl. Bensel et al. (2008), S. 8

SYSTEMATISCHE LITERATURANALYSE

Iterativer Auswahlprozess der systematischen Literaturanalyse

1. Auswahl Basisliteratur		Bauernhansel et al.	Spath et al.	Kagermann et al.	Summe
Anzahl Beiträge (Seiten)		33 (648)	1 (155)	1 (116)	35
2. Analyse Literaturverzeichnisse					
Anzahl Referenzen		463	33	43	539
3. Auswahl Inklusion/Exklusion					
Exklusion	3.1 Filter durch Jahreszahl				
	Anzahl Referenzen	293	25	33	351
	Filter durch Literaturqualität				
Exklusion	3.2 Anzahl Referenzen	175	16	24	215
	Filter durch Stichwort				
	a) Titel				
Inklusion	3.3 Anzahl Referenzen	148	11	14	173
	b) Abstract/Zusammenfassung				
	Anzahl Referenzen	45	6	6	57
	c) Text				
	Anzahl Referenzen	40	6	6	52
4. Referenzen zugänglich (Ja) + Doppelnennung					
Anzahl Referenzen		12	2	1	15
5. Anzahl Beiträge Basisliteratur		32	1	1	49
Anzahl Referenzen		12	2	1	

Tabelle Anhang 13: Iterativer Auswahlprozess der systematischen Literaturanalyse

Basisliteratur: Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J. (2013): Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern - Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0.

Autor	Jahr	Titel	Grundlagen	Produktion	Logistik	Technologien	I 4.0	CPS	IoT/IIoT	Smart** Produktion, Logistics	IKT	Automaten	Fokus
Bundesministerium für Bildung und	2013	Zukunftsbild „Industrie 4.0“. HIGHTECH-STRATEGIE	x				x						I 4.0

Tabelle Anhang 14: Referenzen Basisliteratur Kagermann et al. (2013)

Basisliteratur: Spath, D. (Hrsg.) (2013): Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

Autor	Jahr	Titel	Grundlagen	Produktion	Logistik	Technologien	I 4.0	CPS	IoT/IIoT	Smart** Produktion, Logistics	IKT	Automaten	Fokus	Unternehmensinstitution	Industrie/Wissenschaftsinstitut
Schlick, Achten, Starke, Peter		Produktion 2020 – Auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution		x			x						I 4.0	Wittenberg AG	Industrie
Tarbo, Gerd	2012													DFK center	Industrie
Spath, Dörler, Schindl, Sebastian; Gatsch, Stefan; Hämmerle, Morte; Krause, Tobias	2012	Produktionsprozesse in Jahr 2020		x			x						I 4.0	Fraunhofer-Institut für Arbeitswissenschaft und Organisation (IOI)	Industrie

Tabelle Anhang 15: Referenzen Basisliteratur Spath (2013)

Basisliteratur: Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.) (2014): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.

	Grundlagen	Produktion	Logistik	Technologien	I.4.0	CPS	IoT/705	Smart** (Factory, Logistics)	KIT	Automation	Fokus	Unternehmen/institution	Industrie/Wissenschaft/Institut
1	Bauernhansl, T.										I.4.0	Fraunhofer IPA, Universität Bayern, Institut für Produktion und Management München	Industrie
2	Vogelheiser, B.	x									CPS	Winterslag AG	Industrie
3	Schick, J., Stephan, P.	x			x							BFA GmbH	Industrie
4	Leskylä, M.	x			x						I.4.0	BIBA – Bremer Institut für Industrie	Industrie
5	Lappe, D.	x			x						I.4.0	Siemens AG	Industrie
6	Staber, J., Schmitt, M., Schmitt, M., Zühlke, M., Wenzel, H., Pantoflet, D., Meyer, F., Vogelheiser, B.	x			x						I.4.0	Technische Universität München	Wissenschaft
7	Pantoflet, D., Meyer, F., Vogelheiser, B.	x			x						Smart*	Technische Universität München	Wissenschaft
8	Diethrich, C.	x									Smart*	Universität Magdeburg	Wissenschaft
9	Evolution statt Revolution	x										Technische Universität Stuttgart	Wissenschaft
10	Palmer, T., Weyrich, M.	x			x						I.4.0	Bayer Technology Services	Industrie
11	Förster, J., Vogelheiser, B., Wenzel, H., Lappe, D., Lagatzke, J.	x									Smart*	Technische Universität München	Wissenschaft
12	Vokonasarav, A.	x										Brand GmbH, Bremen	Industrie
13	Hoffmann, F.-J.		x								I.4.0	Wurth Electronics CS, Inc.	Industrie
14	Wiedenhart, F.		x								I.4.0	Fraunhofer IPA	Industrie
15	Witt, A., A.										I.4.0	Technische Universität München	Industrie
16	Witt, A., A.										I.4.0	Fraunhofer IPA, ISW, Universität Bayern, Institut für Produktion und Management München	Industrie
17	Hoyer, G.										I.4.0	Robert Bosch GmbH	Industrie
18	Hauptvogel, A.										I.4.0	Robert Bosch GmbH	Industrie
19	Günther, W., Klein, E.										CPS	Technische Universität München	Wissenschaft
20	Tenenowicz-Wirth, P.										I.4.0	Technische Universität München	Wissenschaft
21	Hippel, S.	x									I.4.0	Langhain AG	Industrie
22	Hippel, S.	x									I.4.0	President DPC Foundation	Industrie
23	Kayam, D.	x									I.4.0	Siemens AG	Industrie
24	Kayam, D.	x									I.4.0	Siemens AG	Industrie
25	Kayam, D., Förster, L.	x									I.4.0	Siemens AG	Industrie
26	Oberst, J.	x									I.4.0	HEWLETT Packard GmbH	Industrie
27	Faloutsos, N., Eckert, C.	x									I.4.0	Technische Universität München	Wissenschaft
28	Schickelmann, A.	x									Smart*	FORCAM GmbH	Wissenschaft
29	Weyer, F., Pantoflet, D.	x									CPS	Technische Universität München	Wissenschaft
30	Luder, A.	x									I.4.0	Onirov-Genetec Universität, Bayern, Institut für Produktion und Management München	Wissenschaft
31	Nurmann, M., Dietz, T., Kuss, A.	x									I.4.0	Fraunhofer IPA	Industrie
32	Conroy, D., Schmitt, M., Leskylä, M.	x									I.4.0	BFA GmbH	Industrie
33	Schönung, H., Dorchain, M.	x									I.4.0	Software AG	Industrie
34	Birger, T., Triegl, K.	x									I.4.0	Boch Rexroth AG	Industrie
35	Witzmann, M.	x									I.4.0	Siemens AG	Industrie
36	Witzmann, M., Schickelmann, J.	x									I.4.0	Fraunhofer IPA	Industrie
37	Witzmann, M., Schickelmann, J.	x									I.4.0	Fraunhofer IPA	Industrie
38	Kogermann, H.	x									I.4.0	Fraunhofer – Deutsche Akademie für Produktion und Management München	Industrie
39	Ben-Haim, M., Henkel, M.	x									I.4.0	Fraunhofer IML	Industrie
40	Ben-Haim, M., Henkel, M.	x									I.4.0	Robert Bosch Industrie Treuhand	Industrie

Tabelle Anhang 16: Beiträge Basisliteratur Bauernhansl et al. (2014)

	Autor	Jahr	Titel	Grundlagen	Produktion	Logistik	Technologien	14.0	CPS	IoT/IS	Smart**	Factory Production (Logistics)	IKT	Automation	Fokus	Unternehmen/Institution	Industrie/Wissenschaft/Institut
1	Manj-Hanser, B., Broy, M., Ditsch, C., Gatzberger, E.	2013	Infrastruktur für CPS aus Sicht der Automatisierungstechnik						x					x	CPS	Technische Universität München	Wissenschaft/ Institut
2	Broy, M.	2012	Agenda CPS: Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems	x					x						CPS	Technische Universität München	Wissenschaft
3	Manj-Hanser, B., Frank, U., Bayrak, G.	2011	Agenda CPS-Scenario Smart Factory												CPS	Technische Universität München	Wissenschaft
4	Broy, M.	2010	Cyber-Physical Systems. Innovation durch Software-Engineering	x					x		(x)				CPS	Technische Universität München	Wissenschaft
4	Liess, S., Chisu, R., Keszner, K.	2010	Ein Cyber-Physical System für die Produktion			x									b7/RS	Technische Universität Dortmund	Wissenschaft
5	Kuznetsov, F., Luft, A., Chisu, R.	2010	Die Bausteine des Internets der Dinge			x									b7/RS	Technische Universität Dortmund	Wissenschaft
7	Neilschläger, A.	2010	Rechenplattformen und RFID für das Internet der Dinge	x	(x)		(x)								b7/RS	Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik	Institut
8	Kuznetsov, F.	2013	Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus der Sicht der Produktion						x					x	CPS	VDI, VDE, GMA	Wissenschaft
9	VDI, DIN	2013	Die Deutsche Normung: Roadmap Industrie 4.0	x			x								14.0	VDI, DIN	Institut
10	Westkamper, E.	2013	Zukunftsperspektiven der digitalen Produktion								x				Smart**	Fraunhofer IPA	Institut
11	Isenack	2011	Cyber-Physical Systems. Innovationsmotor für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion	x					x						CPS	Technische Akademie der Technikwissenschaften e. V.	Institut
12	Manj-Hanser, M.	2010	Internet der Dinge in der IntraLogistik			x									b7/RS	Technische Universität München	Wissenschaft/ Institut

Tabelle Anhang 17: Referenzen Basisliteratur Bauernhansl et al. (2014)

Industrie 4.0-Techniken

Autor	Subjekt	Objekt						Plattform
		Betriebsmittel	Ladungsträger	Transportfahrzeug	Produkt	Material	Lager	
Bauer et al. (2014)		✓						✓
Bauernhansl (2014)			✓	✓				
BMBF (2013)		✓	✓			✓		✓
Bubeck et al. (2014)				✓				✓
Büttner, Brück (2014)	✓							
Diemer (2014)								✓
Fallenbeck, Eckert (2014)								✓
Geisberger, Broy (2012)	✓							✓
Gorecky et al. (2014)	✓							✓
Günthner et al. (2014)	✓	✓						
Heisterhagen (2014)						✓		
Hoffmann (2014)	✓		✓					
Kagermann et al. (2013)	✓	✓			✓			✓
Kleinemeier (2014)		✓						
Kuzmany et al. (2010)			✓	✓				✓
Naumann et al (2014)	✓	✓						
Pantförder et al. (2014)	✓							✓
Schlick et al. (2014)	✓	✓			✓			
Schließmann (2014)	✓	✓						
Schuh et al. (2014)	✓	✓						
Spath (2013)	✓							
Vogel-Heuser (2014)					✓			
Vogel-Heuser et al. (2013)								✓
Wegener (2014)	✓							✓
Westkämper (2013)	✓							✓

Tabelle Anhang 18: Ergebnis syst. Literaturanalyse: Industrie 4.0-Techniken

Anforderungen

Quelle	Jahr	Anforderung	I4.0	CPS	Internet of Everything	Smart Factory
Broy, M.	2010	Netzzugriff überregional, ortsungebunden Weiche bis harte (Echt-) Zeitanforderungen Netze von Sensoren/Aktuatoren Vernetzung inner-/außerhalb der Systeme Dedizierte Nutzerschnittstellen: Starke Integration in Handlungsabläufe Langzeitbetrieb Funktionale Sicherheit Zugriffssicherheit und Datenschutz Zuverlässigkeit		x		
Fallenbeck, N.; Eckert, C.	2014	Ressourcenbeschränktheit, Realzeitfähigkeit und Verfügbarkeit	x			
Geisberger, E.; Broy, M.	2012	Qualität, Zeit und Kosten		x		
		Echtzeitfähigkeit		x		
		Mensch-Maschine-Interaktion und -Kooperation		x		
		Geteilte Kontrolle und Koordination in komplexen Handlungssituationen		x		
		Handlungs- und Interaktionskonzepte für Mensch- Maschine-Koordination		x		
		Semantische Aggregation großer Datenmengen in Echtzeit		x		
		Verbesserung der Verarbeitungs- und Kommunikationsgeschwindigkeit		x		
		Vertrauenswürdigkeit von CPS-Komponenten		x		
		Schutzziele Transparenz, Intervenierbarkeit und Nichtverkettbarkeit sowie der IT-Sicherheitsschutzziele Vertraulichkeit, Integrität und Verfügbarkeit		x		
Wandlungsfähigkeit		x				
Günthner, W.	2010	Flexibilität			x	
		Wandelbarkeit			x	
		Minimale Lieferzeiten			x	
		Günstige Preise			x	
		Güter und Informationen zur richtigen Zeit am richtigen Ort verfügbar			x	
		Dezentrales und wandelbares Materialflusssystem			x	
Hahn-Woernle, C.	2010	Standardisierung			x	
Hoppe, G.	2014a	Flexibilität	x			

Spath, D.	2013	»On Demand« (nach Kundenauftrag)	x		
		Hohe Lieferfähigkeit mit kurzen Lieferzeiten bei geringen Beständen	x		
		Schnelle Reaktion auf Kundenanforderungen	x		
		Volatilität beherrschen	x		
		Transparenz in Echtzeit	x		
		Flexibilität	x		
		Wandelbarkeit	x		
VDI; VDE	2013	IT-Sicherheit und funktionale Sicherheit (Anlagen- und Arbeitssicherheit)		x	
		Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit		x	
		Sicherstellung der Wartbarkeit aller Systeme über lange Produktionszeiträume		x	
		Durchgängig modellbasiertes Engineering		x	
		Kosteneffizienz und Wiederverwendbarkeit von Lösungsmustern		x	
		Reproduzierbarkeit von Produktionsbedingungen und durchgängige Dokumentation (Qualitätssicherung)		x	
Vogel-Heuser, B.	2014	Kommunikation		x	
		Datendurchgängigkeit		x	
		Datenaufbereitung für den Menschen		x	
		Assistenzsysteme für das Engineering		x	
		Datenaufbereitung, Datenintegration für den Menschen		x	
		Bereitstellung notwendiger Daten für Konfiguration, Produktion, Verhandlung		x	
		Weltweite Verteilung von Daten, hohe Verfügbarkeit, Zugriffsschutz		x	
		Datendurchgängigkeit über verschiedene "Stakeholder"		x	
		Digitale Netze und Schnittstellen für die Kommunikation (zwischen Geräten, Mensch und Anlage)		x	
Beschreibung von Produkt- und Betriebsmitteln (Ontologien)		x			
Vogel-Heuser, B.; Bayrak, G.	2011	Interoperabilität zwischen Hardware und Software			x
Vogel-Heuser, B.; Diedrich, C.; Broy, M.	2013	Flexible Produktionseinheiten		x	
		Unterschiedliche QoS (Quality of Service) der Kommunikation		x	
		Konkurrierender Zugriff auf gleiche Funktion von verschiedenen Hosts		x	
		Bedienung unterschiedlicher Funktionalitäten durch Bediener mit unterschiedlichen Rechten und unterschiedlicher Qualifikation		x	
		Bewahrung der Konsistenz der Funktionsparametrierung		x	
		Sicherheit bei unvorhersehbaren Ereignissen für Mensch und Umwelt		x	

Eigenschaften

Quelle	Jahr	Eigenschaft	I4.0	CPS	Internet of Everything	Smart Factory
Broy, M.	2010	Direkte Verbindung zwischen physikalischer Welt und digitaler Welt (Netzwerkfähigkeit)		x		
		Neuartige Systemfunktionen durch Informations-, Daten- und Funktionsintegration		x		
		Umfangreiche Interaktion		x		
		Adaptivität		x		
		Autonomie		x		
Bürger, T.; Tragl, K.	2014	Selbstorganisation	x			
		Autonomie	x			
		Anpassung je nach Kontext flexibel an Rahmenbedingungen	x			
Geisberger, E.; Broy, M.	2012	Integration und Interoperabilität in der produktionsnahen IT erfordern		x		
		Netzwerkfähigkeit		x		
		Kontexterfassung und -verarbeitung		x		
		Verfahren der Konflikterkennung und -auflösung		x		
		Selbstanalyse und -diagnose		x		
		Entscheidungskonzepte und -mechanismen		x		
		Selbstreflexion, -dokumentation und -heilung		x		
Günthner, W.	2010	Dezentrales und wandelbares Materialflusssystem			x	
		Spontane Vernetzungsfähigkeit			x	
		Adaptivität			x	
		Dezentraler Aufbau			x	
		Netzwerkrouter und Switches koordinieren sich selbständig			x	
		Autonome Einheiten			x	
		Entscheidungskompetenzen			x	
Selbstplanung/-steuerung			x			
Hompel, M.; Henke, M.	2014	Knoten müssen sich kontinuierlich den Gegebenheiten anpassen	x			
Hoppe, G.	2014a	Selbstoptimierung	x			
		Autonom zusammenzuarbeiten		x		
Kaufmann, T.	2014	Integration				x
		Echtzeit-Verhandlungsfähigkeit				x
		Integration des gesamten Produktionsnetzwerks				x
Nettsträter, A.; Kuzmany, F.	2010	Adaptivität			x	

Pantförder, D.; Mayer, F.; Diedrich, C.; Göhner, P.; Weyrich, M.; Vogel-Heuser, B.	2014	Reaktivität bei Änderungen von Kundenwünschen					x
		Verhandlungsfähigkeit des Produktionsnetzwerkes					x
Schlick, Jochen; Stephan, Peter; Loskyll, Matthias; Lappe, Dennis	2014	Künstliche Intelligenz	x				
Spath, D.	2013	Vollständige Autonomie dezentraler, sich selbst steuernder Objekte	x				
VDI; VDE	2013	Ressourcen- und kostenoptimierte Steuerung von komplexen Produktionsanlagen Integration von technischen Prozessen und Geschäftsprozessen	x	x			
Vogel-Heuser, B.	2014	Adaptivität		x			
Vogel-Heuser, B.; Bayrak, G.	2011	Integration von Produkt- und Produktionsgestaltung					x
		Horizontale und vertikale Vernetzung					x
Vogel-Heuser, B.; Diedrich, C.; Broy, M.	2013	Autonome Steuerung		x			
		Autonome Diagnose		x			
		Autonome Neukonfiguration		x			
		Interaktionsfähigkeit mit der realen und digitalen Welt		x			
		Autonome Handeln und Verhandeln		x			
		Kognitive Fähigkeiten		x			
		Lernfähigkeit		x			
Offenheit bzw. Datendurchgängigkeit von CPS		x					
Wegener, D.	2014	Selbstorganisation	x				
		Entscheidungsfähigkeit	x				
		Kognition	x				

Tabelle Anhang 20: Ergebnis syst. Literaturanalyse: Eigenschaften

KONZEPTE IM KONTEXT VON INDUSTRIE 4.0

Internet of Everything

Ansatz	Beschreibung
<i>Ubiquitous Computing</i> (1990)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Allgegenwärtigkeit (Ubiquität, engl. ubiquity) der rechnergestützten Informationsverarbeitung ▪ Voraussetzung ist die Öffnung und Verbindung unterschiedlicher IT- und Managementsysteme sowie eingebetteter Systeme und Geräte
<i>Pervasive Computing</i> (1990)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alles durchdringende Vernetzung durch „intelligente“ Gegenstände ▪ Ausstattung von Objekten mit technischer Logik und der (dezentralen) Verarbeitung akquirierter Umgebungsdaten
<i>Sonstige</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Nomadic Computing</i>: Standortunabhängige Berechnungskonzepte ▪ <i>Organic Computing</i>: Systeme mit Komponenten zur Reaktion auf unvorhergesehene Situationen, die ihr Verhalten aufeinander und mit der Umgebung abstimmen können, sich anpassen und selbst organisieren ▪ <i>Systems of Systems</i>: Hierarchische Vernetzung und Integration von Systemen zu immer umfassenderen Systemen ▪ <i>Self-X-Systems</i>: Systeme mit Fähigkeit der Adaption und Selbstorganisation

Tabelle Anhang 21: IoE-Ansätze⁴⁸⁴

⁴⁸⁴ In Anlehnung an Broy (2010), S. 25 f.; Geisberger und Broy (2012), S. 19; Günthner et al. (2014), S. 319 f.

8. LITERATURVERZEICHNIS

DIN 19233 (1972): Automat, Automatisierung, Begriffe.

DIN 6763 (1985): Nummerung. Grundbegriffe.

DIN EN 62264-1 (2014): Integration von Unternehmensführungs- und Leitsystemen - Teil 1: Modelle und Terminologie.

DIN EN 61069-1 (2014): Leittechnik für industrielle Prozesse.

DIN EN ISO 9000 (2014): Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe.

DIN EN 1325 (2014): Value Management – Wörterbuch – Begriffe.

VDI/VDE 2653 (2010): Agentensysteme in der Automatisierungstechnik Grundlagen.

VDI 2206 (2004): Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme.

Alpar, P.; Alt, R.; Bensberg, F. (2014): Anwendungsorientierte Wirtschaftsinformatik. Strategische Planung, Entwicklung und Nutzung von Informationssystemen. 7 Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K. (2008): Handbuch Logistik. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

Bähring, K.; Hauff, S.; Sossdorf, M.; Thommes, K. (2008): Methodologische Grundlagen und Besonderheiten der qualitativen Befragung von Experten in Unternehmen: Ein Leitfaden. In: Die Unternehmung 62, 2008 (1), S. 90–112.

Bauer, W.; Schlund, S.; Marrenbach, D.; Ganschar, O. (2014): Industrie 4.0 - Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland. Studie. Berlin, Stuttgart.

Bauernhansl, T. (2014): Die Vierte Industrielle Revolution. Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 3–35.

Baumgarten, H. (2002): Prozesskettenmodell. Vorlesungsunterlagen. Berlin: Technische Universität Berlin.

Baumgarten, H.; Darkow, I.-L. (2000): Management von Logistikprozessen. In: Baumgarten, H. et al. (Hrsg.): Logistik-Management. Strategien - Konzepte - Praxisbeispiele. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, S. 1–18.

Baums, A.; Schlössler, M.; Scott, B. (2015): Kompendium Industrie 4.0. Wie digitale Plattformen die Wirtschaft verändern - und wie Politik gestalten kann. Kompendium Digitale Standortpolitik (2).

- Beer, S. (1962): *Kybernetik und Management*. Frankfurt am Main: S. Fischer Verlag.
- Beer, S. (1979): *The Heart of Enterprise*. Chichester: Wiley.
- Bensel, P.; Fürstenberg, F.; Vogeler, S. (2008): *Supply Chain Event Management. Entwicklung eines SCEM-Frameworks*. In: *Digitale Schriftenreihe Logistik der Technischen Universität Berlin*, 2008 (3).
- Benz, C. (2008): *Qualitätsplanung. Operative Umsetzung strategischer Ziele*. München: Carl Hanser Verlag.
- Bertalanffy, L. von (1969): *General System Theory. Foundations, Development, Applications*. 2. Aufl. New York: GEORGE BRAZILLER.
- Bicheno, J.; Holweg, M. (2009): *The Lean Toolbox. The Essential Guide to Lean Transformation*. 4. Aufl. Buckingham: PICSIE Books.
- Bienzeisler, B.; Schletz, A.; Gahle, A.-K. (2014): *Industrie 4.0 Ready Services. TechnologieTrends 2020. Ergebnisse einer Kurzbefragung auf der Messe MAINTAIN 2014*. Stuttgart.
- Bildstein, A.; Seidelmann, J. (2014): *Industrie 4.0-Readiness: Migration zur Industrie 4.0-Fertigung*. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration*. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 581–597.
- Bitkom (2012): *Der Staat als Gestalter der digitalen Welt. Industriepolitisches Grundsatzzpapier*. Berlin.
- Bitkom (2014): *IT-Strategie – Digitale Agenda für Deutschland. Deutschland zum Digitalen Wachstumsland entwickeln*. Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (Bitkom). Berlin. Online verfügbar unter http://www.bitkom.org/files/documents/BITKOM_IT-Strategie.pdf.
- BMBF (2013): *Zukunftsbild „Industrie 4.0“*. HIGHTECH-STRATEGIE Bundesministerium für Bildung und Forschung. Bonn. Online verfügbar unter http://www.bmbf.de/pubRD/Zukunftsbild_Industrie_40.pdf, zuletzt geprüft am 20.08.2014.
- BMWi (2016): *Monitoring-Report Wirtschaft DIGITAL 2016*. Berlin.
- Bogon, T. (2013): *Agentenbasierte Schwarmintelligenz*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Bortz, J.; Döring, N. (2006): *Forschungsmethoden und Evaluation. Für Human- und Sozialwissenschaftler*. 4. Aufl. Hamburg: Springer Verlag.
- Bothof, A.; Bovenschulte, M.; Domröse, W.; Gaßner, K.; Hartmann, E.; Wessels, J. (2009): *Das Internet der Dinge – ein Überblick*. In: Bothof, A. und Bovenschulte, M.

- (Hrsg.): Das „Internet der Dinge“. Die Informatisierung der Arbeitswelt und des Alltags. Erläuterungen einer neuen Basistechnologie, S. 7–14.
- Brand, L.; Hülser, T.; Grimm, V.; Zweck, A. (2009): Internet der Dinge. Übersichtsstudie. 80 Bände. Düsseldorf.
- Brock, D. L. (2001): The Electronic Product Code (EPC). A Naming Scheme for Physical Objects Januar, 2001, S. 1–21.
- Brosze, T. (2011): Kybernetisches Management wandlungsfähiger Produktionssysteme. Aachen: Edition Wissenschaft Apprimus (104).
- Broy, M. (2010): Cyber-Physical Systems - Wissenschaftliche Herausforderungen bei der Entwicklung. In: Broy, M. (Hrsg.): Cyber-Physical Systems. Innovation durch softwareintensive eingebettete Systeme (acatech Diskutiert). Heidelberg: Springer Verlag, S. 17–31.
- Bruhn, M. (2012): Unternehmens- und Marketingkommunikation. Handbuch für ein integriertes Kommunikationsmanagement. Basel: Vahlen.
- Bubeck, A.; Gruhler, M.; Reiser, U.; Weißhardz, F. (2014): Vom fahrerlosen Transportsystem zur intelligenten mobilen Automatisierungsplattform. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 221–233.
- Bullinger, H.-J. (1996): Technologiemanagement. In: Eversheim, W. und Schuh, G. (Hrsg.): Betriebshütte Produktion und Management (1). 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, S. 4-26 – 4-54.
- Bürger, T.; Tragl, K. (2014): SPS-Automatisierung mit den Technologien der IT-Welt verbinden. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 559–569.
- Busse, J.; Humm, B.; Lübbert, C.; Moelter, F.; Reibold, A.; Rewald, M. et al. (2014): Was bedeutet eigentlich Ontologie? Ein Begriff aus der Philosophie im Licht verschiedener Disziplinen. In: Informatik Spektrum 37, 2014 (4), S. 286–297.
- BVL.de (2014): Bedeutung für Deutschland Bundesvereinigung Logistik. Online verfügbar unter http://www.tag-der-logistik.de/26_1, zuletzt geprüft am 02.02.2015.
- Capgemini (2014): Industry 4.0. The Capgemini Consulting View. Sharpening the Picture Beyond the Hype.
- Cisco Systems Inc. (2014): Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2013–2018 Cisco Systems Inc. San Jose (February 5, 2014).

- Dais, S. (2014): Industrie 4.0 – Anstoß, Vision, Vorgehen. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 625–634.
- Deindl, M. (2013): Gestaltung des Einsatzes von intelligenten Objekten in Produktion und Logistik. Aachen: Apprimus Verlag.
- Deloitte & Touche GmbH (2013): Digitalisierung im Mittelstand. Aus der Studienserie „Erfolgsfaktoren im Mittelstand“.
- Dennis, P. (2007): Lean Production Simplified. A Plain-Language Guide to the World's Most Powerful Production System. 2. Aufl. New York: Productivity Press.
- Diemer, J. (2014): Sichere Industrie 4.0-Plattformen auf Basis von Community-Clouds. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 369–396.
- Duden (2015): Die Deutsche Rechtschreibung Duden. Online verfügbar unter <http://www.duden.de/rechtschreibung/Objekt>, zuletzt geprüft am 10.12.2015.
- Duffy, P. (1984): Cybernetics. In: International Journal of Business Communication 21, Januar 1984 (1), S. 33–41. Online verfügbar unter <http://job.sagepub.com/content/21/1/33.full.pdf+html>.
- Durach, C. F. (2016): A Theoretical and Practical Contribution to Supply Chain Robustness. Developing a Schema for Robustness in Dyads. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin (Schriftenreihe Logistik der Technischen Universität Berlin).
- Eisenhardt, K. (1989): Building Theories from Case Study Research. In: Academy of Management Review 14 (4), S. 532–550.
- Fallenbeck, N.; Eckert, C. (2014): IT-Sicherheit und Cloud Computing. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 397–431.
- Frazziona, E. M.; Dutraa, M. L.; Viannaa, W. B. (2015): Big Data Applied to Cyber-Physical Logistics Systems: Conceptual Model and Perspectives. In: Brazilian Journal of Operations & Production Management 12, 2015, S. 330–337.
- Füllbier, U. (2004): Wissenschaftstheorie und Betriebswirtschaftslehre. In: WiSt 5, 2004 (33), S. 266–271.
- Gabler Wirtschaftslexikon (2015): Kognition Gabler Wirtschaftslexikon. Online verfügbar unter <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/9957/kognition-v8.html>, zuletzt geprüft am 10.12.2015.

- Geisberger, E.; Broy, M. (2012): Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems. München, Berlin (acatech STUDIE).
- Gerpott, T. J. (2005): Strategisches Technologie- und Innovationsmanagement. 2. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag.
- Gläser, J.; Laudel, G. (2009): Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse. 3. Aufl. Wiesbaden: Verlag für Sozialwissenschaften.
- Golicic, S.; Davis, D.; McCarthy, T. (2005): A Balanced Approach to Research in Supply Chain Management. In: Kotzab, H. et al. (Hrsg.): Research Methodologies in Supply Chain Management. Heidelberg, New York: Physica-Verlag, S. 15–30.
- Göpfert, I. (2005): Logistik Führungskonzeption. 2. Aufl. München: Vahlen.
- Gorecki, P.; Pautsch, P. (2010): Lean Management. Auf den Spuren des Erfolges der Managementphilosophie von Toyota und Co. München: Carl Hanser Verlag.
- Gorecky, D.; Schmitt, M.; Loskyll, M. (2014): Mensch-Maschine-Interaktion im Industrie 4.0-Zeitalter. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 525–542.
- Gudehus, T. (2010): Logistik. Grundlagen, Strategien, Anwendungen. 4. Aufl. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag.
- Günthner, W. (2010): Fazit. In: Günthner, W. und ten Hompel, M. (Hrsg.): Internet der Dinge in der Intralogistik. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, S. 349–351.
- Günthner, W.; Klenk, E.; Tenerowicz-Wirth, P. (2014): Adaptive Logistiksysteme als Wegbereiter der Industrie 4.0. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 297–323.
- Haehnel, H. (2010): Kommunikation. In: Langmann, R. (Hrsg.): Taschenbuch der Automatisierung. 2. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, S. 309–393.
- Handfield, R.; Straube, F.; Pfohl, H.-C.; Wieland, A. (2013): Trends und Strategien in Logistik und Supply Chain Management. Vorteile im Wettbewerb durch Beherrschung von Komplexität. Hamburg: DVV Media Group GmbH.
- Heisterhagen, N. (2014): Radikale Veränderungen. Welche Chancen hat die Industrie 4.0. In: Wirtschaftswoche 2014, 20.08.2014, S. 1–6. Online verfügbar unter <http://www.wiwo.de/unternehmen/industrie/radikale-veraenderungen-welche-chancen-die-industrie-4-0-bietet/> 10358054.html, zuletzt geprüft am 03.09.2014.

- Hermann, M.; Pentek, T.; Otto, B. (2015): Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. Working Paper.
- Hoffmann, F.-J. (2014): iBin – Anthropomatik schafft revolutionäre Logistik-Lösungen. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 207–220.
- Hofmann, J. (2015): Auf dem Weg zur digitalen Fabrik. Vortrag auf dem Deutschen Logistikkongress 2015. Berlin.
- Hoppe, G. (2014a): High-Performance Automation verbindet IT und Produktion. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 249–275.
- Hoppe, S. (2014b): Standardisierte horizontale und vertikale Kommunikation: Status und Ausblick. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 325–341.
- Hungenberg, H.; Wulf, T. (2011): Grundlagen der Unternehmensführung. 4. Aufl. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag.
- IBSG (2011): The Internet of Things. How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything Cisco Internet Business Solutions Group. San Jose (April 2011).
- IDC (2014): Industrie 4.0 durchdringt verarbeitendes Gewerbe in Deutschland, Investitionen für 2015 geplant International Data Corporation. Frankfurt am Main (31. Juli 2014). Online verfügbar unter <http://idc.de/de/ueber-idc/press-center/59106-idc-studie-industrie-4-0-durchdringt-verarbeitendes-gewerbe-in-deutschland-investitionen-fur-2015-geplant>, zuletzt geprüft am 14.08.2014.
- Isermann, R. (2008): Mechatronische Systeme. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Jochem, R.; Giebel, M.; Geers, D. (2010): Was kostet Qualität? Wirtschaftlichkeit von Qualität ermitteln. München: Carl Hanser Verlag.
- Jochem, R.; Menrath, M.; Meentken, F. (2015): Organisation der Wertschöpfung in globalen Unternehmen. In: Jochem, R. und Menrath, M. (Hrsg.): Globales Qualitätsmanagement. Basis für eine erfolgreiche internationale Unternehmensführung. 1. Aufl. Düsseldorf: Symposium Publishing GmbH, S. 75–119.
- Jochem, R.; Seiffert, K.; Drange, P. (2016): Qualität 4.0 am Beispiel Katapult Quality Science Lab. Kollegium 2016. Berlin: Technische Universität Berlin.

- Kagermann, H. (2014): Chancen von Industrie 4.0 nutzen. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration*. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 603–614.
- Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J. (2013): Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern - Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0.
- Kano, N.; Seraku, N.; Takahashi, F.; Tsuji, S.-i. (1984): Attractive Quality and Must-be Quality. In: *Journal of the Japanese Society for Quality Control* 14, 1984 (2), S. 147–156.
- Kaplan, R. S.; Norton, D. P. (1992): The Balanced Scorecard. Measures That Drive Performance. In: *Harvard Business Review* 1992, 1992 (Januar/Februar), S. 70–79.
- Kaufmann, T. (2014): Die horizontale Integration der Wertschöpfungskette in der Halbleiterindustrie – Chancen und Herausforderungen. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration*. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 359–367.
- Kittel-Wegner, E.; Meyer, J.-A. (2002): Die Fallstudie in der betriebswirtschaftlichen Forschung und Praxis. In: *Schriften zu Management und KMU* 2002, 2002 (Schrift Nr. 3/2002).
- Kleinemeier, M. (2014): Von der Automatisierungspyramide zu Unternehmenssteuerungsnetzwerken. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration*. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 571–579.
- Klinkner, R. (2015): *Produktionslogistik I. Vorlesungsunterlagen* (1).
- Kornmeier, M. (2006): *Wissenschaftstheorie und wissenschaftliches Arbeiten. Eine Einführung für Wirtschaftswissenschaftler*. Heidelberg: Physica-Verlag.
- Krallmann, H.; Frank, H.; Gronau, N. (2002): *Systemanalyse im Unternehmen. Vorgehensmodelle, Modellierungsverfahren und Gestaltungsoptionen*. 4. Aufl. München, Wien: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Kropik, M. (2009): *Produktionsleitsysteme in der Automobilfertigung*. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag.
- Kuzmany, F.; Luft, A.; Chisu, R. (2010): Die Bausteine des Internet der Dinge. In: Günthner, W. und ten Hompel, M. (Hrsg.): *Internet der Dinge in der Intralogistik*. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, S. 53–64.

- Lamnek, S. (2005): *Qualitative Sozialforschung*. 4. Aufl. Weinheim, Basel: Beltz Verlag.
- Litz, L. (2012): *Grundlagen der Automatisierungstechnik. Regelungssysteme - Steuerungssysteme - Hybride Systeme*. 2. Aufl. Oldenbourg: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Lloyd, S. (2011): Applying the Nominal Group Technique to Specify the Domain of a Construct. In: *Qualitative Market Research: An International Journal* 14, 2011 (1), S. 105–121.
- Lüder, A. (2014): Integration des Menschen in Szenarien der Industrie 4.0. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration*. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 493–507.
- Malik, F. (2005): Was ist richtiges und gutes Management? Teil I. In: *Management Zentrum St.Gallen* 13, März 2005 (3/05), S. 38–54.
- Martin, H. (2014): *Transport- und Lagerlogistik. Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik*. 9. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Mayer, H. (2002): *Interview und schriftliche Befragung. Entwicklung, Durchführung und Auswertung*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Mayring, P. (2002): *Einführung in die qualitative Sozialforschung. Eine Anleitung zu qualitativem Denken*. 5. Aufl. Weinheim, Basel: Beltz Verlag.
- McKinsey & Company (2015): *Industry 4.0. How to Navigate Digitization of the Manufacturing Sector*. München (McKinsey Digital).
- Meyer, A. (2007): *Modularisierung der Logistik. Ein Gestaltungsmodell zum Management von Komplexität in der industriellen Logistik*. Berlin: Universitätsverlag der Technischen Universität Berlin (1).
- Meyer, J.-A. (2003): Die Fallstudie in der betriebswirtschaftlichen Forschung und Lehre. In: *Wirtschaftswissenschaftliches Studium* 32 (8), S. 475–479.
- Miles, R.; Snow, C. (1986): Organizations: New Concepts for new Forms. In: *California Management Review* 28, 1986 (3), S. 62–73.
- Nettsträter, A.; Kuzmany, F. (2010): Rechenplattformen und RFID für das Internet der Dinge. In: Günthner, W. und ten Hompel, M. (Hrsg.): *Internet der Dinge in der Intralogistik*. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, S. 107–118.
- Niggemann, O.; Jasperneite, J.; Vodencarevic, A. (2014): Konzepte und Anwendungsfälle für die intelligente Fabrik. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Pro-*

- duktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 173–190.
- Nissen, V. (2002): Supply Chain Event Management. In: Wirtschaftsinformatik 44, 2002 (5), S. 477–480.
- Otto, A. (2003): Supply Chain Event Management: Three Perspectives. In: The International Journal of Logistics Management 14, 2003 (2), S. 1–13.
- Oxford Press (2005): Oxford Advanced Learned Dictionary. In: Oxford Press (Hrsg.): Oxford Advanced Learned Dictionary. 7. Aufl. Oxford: Cornelson.
- Pantförder, D.; Mayer, F.; Diedrich, C.; Göhner, P.; Weyrich, M.; Vogel-Heuser, B. (2014): Agentenbasierte dynamische Rekonfiguration von vernetzten intelligenten Produktionsanlagen – Evolution statt Revolution. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 145–158.
- Pfeiffer, W.; Metze, G.; Schneider, W.; Amier, R. A. (1982): Technologie-Portfolio zum Management strategischer Zukunftsgeschäftsfelder. 4. Aufl. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht.
- Pfohl, H.-C. (2010): Logistiksysteme. Betriebswirtschaftliche Grundlagen. 8. Aufl. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag.
- Pfohl, H.-C.; Zöllner, W. (1991): Effizienzmessung der Logistik. In: Die Betriebswirtschaft 51, 1991 (3), S. 323–339.
- Porter, E. M.; Heppelmann, J. E. (2014): Wie smarte Produkte den Wettbewerb verändern. Sonderdruck. In: Harvard Business Manager 12, 2014, S. 1–18.
- Pritschow, G.; Duelen, G.; Bender, K. (1996): Steuerung von Produktionssystemen. In: Eversheim, W. und Schuh, G. (Hrsg.): Betriebshütte Produktion und Management (1). 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, S. 10–73.
- PWC; Strategy& (2014): Industrie 4.0. Chancen und Herausforderungen der vierten industriellen Revolution.
- Quentin, H. (2008): Statistische Prozessregelung. SPC. München: Carl Hanser Verlag.
- Reibnitz, U. (1992): Szenario-Technik. Instrumente für die unternehmerische und persönliche Erfolgsplanung. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler.
- Roidl, M. (2010): Kooperation und Autonomie in selbststeuernden Systemen. In: Günthner, W. und ten Hompel, M. (Hrsg.): Internet der Dinge in der Intralogistik. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, S. 65–78.

- Roland Berger Strategy Consultants (2015): Die digitale Transformation der Industrie. Was sie bedeutet. Wer gewinnt. Was jetzt zu tun ist. München.
- Rother, M.; Shook, J. (2000): Sehen lernen. Mit Wertstromdesign die Wertschöpfung erhöhen und Verschwendung beseitigen. Stuttgart: LOG_X Verlag GmbH.
- Schlick, J.; Stephan, P.; Loskyll, M.; Lappe, D. (2014): Industrie 4.0 in der praktischen Anwendung. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 57–84.
- Schließmann, A. (2014): iProduction, die Mensch-Maschine-Kommunikation in der Smart Factory. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 451–480.
- Scholz, P. (2005): Softwareentwicklung eingebetteter Systeme. Grundlagen, Modellierung, Qualitätssicherung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag.
- Scholz-Reiter, B.; Höhns, H. (2006): Selbststeuerung logistischer Prozesse mit Agentensystemen. In: Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, S. 745–780.
- Schöning, H.; Dorchain, M. (2014): Data Mining und Analyse. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 543–554.
- Schuh, G.; Klappert, S. (2011): Technologiemanagement. Handbuch Produktion und Management 2. In: Schuh, G. et al. (Hrsg.): Technologiemanagement. 2. Aufl. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag.
- Schuh, G.; Klappert, S.; Schubert, J.; Nollau, S. (2011): Grundlagen zum Technologiemanagement. In: Schuh, G. und Klappert, S. (Hrsg.): Technologiemanagement. Handbuch Produktion und Management 2. 2. Aufl. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, S. 33–54.
- Schuh, G.; Lassen, S. (2006): Funktionen. In: Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, S. 195–295.
- Schuh, G.; Potente, T.; Thomas, C.; Hauptvogel, A. (2014): Steigerung der Kollaborationsproduktivität durch cyber-physische Systeme. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 277–295.

- Schuh, G.; Roesgen, R. (2006): Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung. Aufgaben. In: Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, S. 28–80.
- Schuh, G.; Stich, V. (2013): Logistikmanagement. Handbuch Produktion und Management 6. In: Schuh, G. et al. (Hrsg.): Logistikmanagement. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Schwaninger, M. (1994): Managementsysteme. Frankfurt am Main: Campus Verlag.
- Schwaninger, M. (2004): Systemtheorie. Eine Einführung für Führungskräfte, Wirtschafts- und Sozialwissenschaftler. Diskussionsbeitrag. 3. Aufl.
- Seiffert, K.; Pasch, F.; Schober, J.; Ziegler, M.; Jochem, R. (2016): Traditionelles neu gedacht: Das Katapult als Lernzeug für die Qualität in der Industrie 4.0. In: Reffinghaus, R. et al. (Hrsg.): Qualitätsmanagement 4.0. Status Quo! Quo vadis? Bericht zur Gesellschaft für Qualitätswissenschaft-Jahrestagung 2016 in Kassel (Kasseler Schriftenreihe Qualitätsmanagement, 6). Kassel: Kassel University Press GmbH, S. 43–60.
- Simon, F. B. (2013): Einführung in Systemtheorie und Konstruktivismus. Heidelberg: Carl-Auer-Systeme Verlag.
- Spath, D. (2013): Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0. Studie. In: Spath, D. (Hrsg.): Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Spens, K. M.; Kovács, G.: A Content Analysis of Research Approaches in Logistics Research. In: *Int Jnl Phys Dist & Log Manage* 36 (5), S. 374–390.
- Steffens, A. (2014): Logistische Wandlungsbefähiger. Entwicklung eines kontextbasierten Gestaltungsmodells für die industrielle Logistik. Berlin: Universitätsverlag der Technischen Universität Berlin (27).
- Stegbauer, C. (2010): Netzwerkanalyse und Netzwerktheorie. Ein neues Paradigma in den Sozialwissenschaften. 2. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Stich, V.; Oedekoven, D.; Brosze, T. (2013): Informationssysteme für das Logistikmanagement. In: Schuh, G. und Stich, V. (Hrsg.): Logistikmanagement. Handbuch Produktion und Management 6. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 257–304.
- Straube, F. (2014a): Grundlagen der Logistik WS 1415. Vorlesungsunterlagen. Berlin: Technische Universität Berlin (1).
- Straube, F. (2014b): Grundlagen der Logistik WS 1415. Vorlesungsunterlagen. Berlin: Technische Universität Berlin (2).
- Straube, F. (2014e): Grundlagen der Logistik WS 1415. Vorlesungsunterlagen. Berlin: Technische Universität Berlin (7).

- Straube, F. (2014f): Informations-, Identifikations- und Automatisierungstechnologien. Einführung und Grundlagen. Vorlesungsunterlagen. Berlin: Technische Universität Berlin (1).
- Straube, F. (2004): e-Logistik. Ganzheitliches Logistikmanagement. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag.
- Straube, F. (2012): Informationstechnologie in der Logistik. Vorlesungsunterlagen. Berlin: Technische Universität Berlin.
- Straube, F. (2013): Einführung in die Logistik - Grundlagen der technischen Logistik. Vorlesungsunterlagen. Berlin: Technische Universität Berlin (1).
- Straube, F. (2014): Angewandte Logistikforschung WS 1415. Vorlesungsunterlagen. Berlin: Technische Universität Berlin.
- Straube, F.; Bensel, P.; Vogeler, S. (2007): RFID-Standardisierungslandkarte. In: PPS Management 12, 2007, S. 20–23.
- Sydow, J. (1993): Strategische Netzwerke: Evolution und Organisation. Wiesbaden: Springer Verlag.
- Sydow, J. (2003): Management von Netzwerkorganisationen. Beiträge aus der Managementforschung. 3. Aufl.: Gabler.
- Sydow, J.; Windeler, A. (1997): Management interorganisationaler Beziehungen. Opladen: Westdeutscher Verlag.
- ten Hompel, M. (2010): Individualisierung als logistisch-technisches Prinzip. In: Günthner, W. und ten Hompel, M. (Hrsg.): Internet der Dinge in der Intralogistik. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, S. 3–7.
- ten Hompel, M.; Henke, M. (2014): Logistik 4.0. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 615–624.
- Thom, A. (2007): Entwicklung eines Gestaltungsmodells zum Management von Risiken in Produktionsnetzwerken. Ein Beitrag zum Risikomanagement in der Logistik. Berlin: Universitätsverlag der Technischen Universität Berlin (Schriftenreihe Logistik der Technischen Universität Berlin, 2).
- Trage, S. (2012): Das Internet der Dinge als wichtiger Wachstumsmarkt. In: Picture of the Future, 2012, S. 47.
- Ulrich, H. (1984): Management. Bern, Stuttgart: Verlag Paul Haupt.
- Ulrich, H. (1998): Praxisbezug und wissenschaftliche Fundierung einer transdisziplinären Managementlehre. In: Spoun, S. et al. (Hrsg.): Universität und Praxis. Tendenzen

und Perspektiven wissenschaftlicher Verantwortung für Wirtschaft und Gesellschaft. Zürich: Verlag Neue Zürcher Zeitung, S. 159–168.

Ulrich, H. (2001): Systemorientiertes Management. Studienausgabe. Bern, Stuttgart, Wien: Verlag Paul Haupt.

VDE und DIN (2013): Die Deutsche Normungs-Roadmap Industrie 4.0. 1. Aufl. Frankfurt.

VDI und VDE (2013): Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation Verein Deutscher Ingenieure e.V. VDI/VDE Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA). Düsseldorf (April 2013). Online verfügbar unter http://www.vdi.de/uploads/media/Stellungnahme_Cyber-Physical_Systems.pdf, zuletzt geprüft am 17.12.2014.

VDI und VDE (2014): Industrie 4.0. Gegenstände, Entitäten, Komponenten. Statusreport Verein Deutscher Ingenieure e.V. VDI/VDE Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA). Düsseldorf (April 2014). Online verfügbar unter http://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/gma_dateien/VDI_Industrie_4.0_Komponenten_2014.pdf, zuletzt geprüft am 20.08.2014.

Verl, A.; Lechler, A. (2014): Steuerung aus der Cloud. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 235–247.

Vogel-Heuser, B. (2014): Herausforderungen und Anforderungen aus Sicht der IT und der Automatisierungstechnik. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 37–48.

Vogel-Heuser, B.; Diedrich, C.; Broy, M. (2013): Anforderungen an CPS aus Sicht der Automatisierungstechnik. In: at – Automatisierungstechnik, 2013 (10), S. 669–676.

Wahlster, W. (2014): Industrie 4.0: Künstliche Intelligenz in der Produktion.

Weber, J. (1993): Logistik-Controlling. 3. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag.

Weber, J.; Wallenburg, C. M. (2010): Logistik- und Supply Chain Controlling. 66. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag.

Wegener, D. (2014): Industrie 4.0 – Chancen und Herausforderungen für einen Global Player. In: Bauernhansl, T. et al. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 343–358.

- Weiser, M. (1991): The Computer for the 21st Century. In: Scientific American, 1991 (September), S. 94–104.
- Weller, W. (2008): Automatisierungstechnik im Überblick. Was ist, was kann Automatisierungstechnik? 1. Aufl. Berlin, Wien, Zürich: Beuth.
- Westkämper, E. (2013a): Integration in der digitalen Produktion. In: Westkämper, E. et al. (Hrsg.): Digitale Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, S. 133–143.
- Westkämper, E. (2013b): Zukunftsperspektiven der digitalen Produktion. In: Westkämper, E. et al. (Hrsg.): Digitale Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, S. 309–327.
- Windt, K. (2006): Selbststeuerung intelligenter Objekte in der Logistik. In: Vec, M. et al. (Hrsg.): Selbstorganisation – Ein Denksystem für Natur und Gesellschaft. Köln: Böhlau Verlag, S. 271–314.
- Womack, J.; Jones, D. (2003): Lean Thinking. Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation. New York, London, Sydney, Tokio: Simon & Schuster.
- Yin, R. (2003): Case Study Research. 3. Aufl. Kalifornien: Sage Publications, Inc. (Applied Social Research Methods Series).
- Zahn, E. (1995): Gegenstand und Zweck des Technologiemanagements. In: Zahn, E. (Hrsg.): Handbuch Technologiemanagement. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag, S. 3–32.
- ZVEI (2013): Industrie 4.0. Wenn das Werkstück die Fabrik steuert Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. Frankfurt am Main (2013).

- 01: Mayer, Axel: Modularisierung der Logistik.** Ein Gestaltungsmodell zum Management von Komplexität in der industriellen Logistik. - 2007. - XVIII, 264 S., zahlr. Abb.
ISBN 978-3-7983-2054-3 EUR 14,90
- 02: Thom, Alexander: Entwicklung eines Gestaltungsmodells zum Management von Risiken in Produktionsnetzwerken.** Ein Beitrag zum Risikomanagement in der Logistik. - 2008. - XX, 239 S., zahlr. Abb.
ISBN 978-3-7983-2975-8 EUR 13,90
- 03: Bogatu, Christian: Smartcontainer als Antwort auf logistische und sicherheitsrelevante Herausforderungen in der Lieferkette.** Auswirkungen und Handlungsempfehlungen für die Wertschöpfungskette der Logistik. - 2008. - XXIV, 286 S., zahlr. Abb.
ISBN 978-3-7983-2074-1 EUR 19,90
- 04: Beckmann, Thomas: Emerging Market Sourcing.** Eine empirische Untersuchung zu Erfolgsfaktoren in der Beschaffung aus Wachstumsmärkten. - 2008. -XI, 221 S.
ISBN 978-3-7983-2096-3 EUR 13,90
- 05: Dietman, Nils von: Airport Performance Measurement.** Kennzahlensystem zur Analyse und Bewertung von Flughafenprozessen. - 2008. - XXI, 204 S., zahlr. Abb. u. Tab.
ISBN 978-3-7983-2103-8 EUR 12,90
- 06: Hildebrand, Wolf-Christian: Management von Transportnetzwerken im containerisierten Seehafenhinterlandverkehr.** - 2008. - XVI, 234 S., zahlr. Abb.
ISBN 978-3-7983-2102-1 EUR 14,90
- 07: Wilmking, Niklas: Logistikmanagement in China.** Eine empirische Untersuchung zur Strategieentwicklung von Logistikdienstleistern. - 2009. - VIII, 247 S., zahlr. Abb.
ISBN 978-3-7983-2130-4 EUR 15,90
- 08: Vogeler, Stefan: Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Implementierung der RFID-Technologie in logistischen Systemen am Beispiel der Bekleidungsindustrie.** - 2009. - XI, 227 S., zahlr. Abb.
ISBN 978-3-7983-2156-4 EUR 14,90
- 09: Doch, Stefan Alexander: Logistische Leistungsdifferenzierung im Supply Chain Management.** Theoretische und empirische Entwicklung eines Gestaltungsansatzes für die Differenzierung der logistischen Leistungserstellung produzierender Unternehmen zur Erfüllung individueller Kundenwünsche. - 2009. - X, 271 S., zahlr. Abb.
ISBN 978-3-7983-2157-1 EUR 19,90
- 10: Bensel, Philipp: Geschäftsmodelle von Logistikdienstleistern im Umfeld des Ubiquitous Computing.** - 2009. - XIV, 247 S.
ISBN 978-3-7983-2166-3 EUR 19,90
- 11: Bohn, Michael: Logistik im Kontext des ausländischen Markteintritts.** Entwicklung von Gestaltungsempfehlungen für den ausländischen Markteintritt unter besonderer Berücksichtigung der Erfolgskomponente Logistik. - 2009. - XVIII, 334 S., zahlr. Abb. u. Tab.
ISBN 978-3-7983-2179-3 EUR 21,90
- 12: Sommer-Dittrich, Thomas: Wandlungsfähige Logistiksysteme in einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft.** - 2010. - 215 S., zahlr. Abb. u. Tab.
ISBN 978-3-7983-2200-4 EUR 14,90
- 13: Kerner, Jürgen Andreas: Beschaffung im Eigenmarkengeschäft des Bekleidungshandels.** Ein theoretischer und fallstudienbasierter Beitrag zur Lösung ausgewählter Probleme der Prozessplanung. - 2010. - XX, 207 S..
ISBN 978-3-7983-2212-7 EUR 16,90
- 14: Fürstenberg, Frank: Der Beitrag serviceorientierter IT-Architekturen zu integrierten Kontraktlogistikdienstleistungen.** - 2010. - XVIII, 244 S., zahlr. Abb.
ISBN 978-3-7983-2227-1 EUR 19,90
- 15: Fendt, Thomas: Introducing Electronic Supply Chain Collaboration in China – Evidence from Manufacturing Industries.** - 2010. - XII, 219, 53 S., Anh.
ISBN 978-3-7983-2243-1 EUR 21,90

- 16: Franke, Peter D.: Internationalisierung der Kontraktlogistik.** Entwicklung eines Instrumentariums zur Länderselektion. - 2011. - XV, 217 S., zahlr. Abb. u. Tab.
ISBN 978-3-7983-2296-7 EUR 19,90
- 17: Tentrop, Friedrich: Entwicklung eines integrierten Gestaltungsansatzes der Produktionslogistik.** - 2011. - XV, 227 S., zahlr. Abb.
ISBN 978-3-7983-2317-9 EUR 19,90
- 18: Nagel, Arnfried: Logistik im Kontext der Nachhaltigkeit.** Ökologische Nachhaltigkeit als Zielgröße bei der Gestaltung logistischer Netzwerke. - 2011. - XV, 228 S., zahlr. Abb. u. Tab.
ISBN 978-3-7983-2383-4 EUR 19,90
- 19: Grig, Roman: Governance-Strukturen in der maritimen Transportkette.** Agentenbasierte Modellierung des Akteursverhaltens im Extended Gate. - 2012. - XVI, 373 S.
ISBN 978-3-7983-2384-1 EUR 29,90
- 20: Kefler, Martin: Gestaltung von Logistiknetzwerken für die humanitäre Versorgung in Entwicklungsländern Afrikas.** - 2012. - XIV, 355 S.
ISBN 978-3-7983-2426-8 (print) EUR 20,90
ISBN 978-3-7983-2427-5 (online)
- 21: Schwarz, Jennifer Rebecca: Humanitäre Logistik für die Versorgungsproblematik in Subsahara-Afrika.** Aufbau von Logistikkapazität durch Wissenstransfer. - 2012. - XVIII, 336 S.
ISBN 978-3-7983-2444-2 (print) EUR 21,90
ISBN 978-3-7983-2445-9 (online)
- 22: Rief, Daniel: Markteintritt in China.** Flexibilität und Integration als Erfolgsfaktoren in einer dynamischen und komplexen Marktumgebung. - 2013. - XIX, 235 S.
ISBN 978-3-7983-2482-4 EUR 20,90
- 23: Richter, Markus: Nutzenoptimierter RFID-Einsatz in der Logistik.** Eine Handlungsempfehlung zur Lokalisierung und Bewertung der Nutzenpotenziale von RFID-Anwendungen. - 2013. - XIX, 235 S.
ISBN 978-3-7983-2523-4 (print) EUR 21,90
ISBN 978-3-7983-2524-1 (online)
- 24: Huynh, Thu Hang: Beitrag zur Systematisierung von Theorien in der Logistik.** - 2013. - XVII, 429 S.
ISBN 978-3-7983-2610-1 (print) EUR 21,90
ISBN 978-3-7983-2611-8 (online)
- 25: Fontius, Jörn: Megatrends und Ihre Implikationen für die Logistik.** Ableitung von Wirkungszusammenhängen. - 2013. - XVII, 217 S.
ISBN 978-3-7983-2634-7 (print) EUR 12,50
ISBN 978-3-7983-2635-4 (online)
- 26: Ouyeder, Ouelid: Strategien für eine nachhaltige Lieferantentwicklung für die Beschaffung aus Emerging Markets.** - 2013. - X, 279 S.
ISBN 978-3-7983-2658-3 EUR 21,50
- 27: Steffens, Anja: Logistische Wandlungsbefähiger.** Entwicklung eines kontextbasierten Gestaltungsmodells für die industrielle Logistik. - 2014. - XIII, 284 S.
ISBN 978-3-7983-2682-8 EUR 15,50
- 28: Siegmann, Julian B.: Prozessinnovationen bei Logistikdienstleistungsunternehmen.** - 2015. - xxxviii, 245 S.
ISBN 978-3-7983-2737-5 (print) EUR 15,50
ISBN 978-3-7983-2738-2 (online)
- 29: Keitel, Sebastian: Auswirkungen disaggregierter Regulierung auf die Kapazität von Verkehrssektoren.** Eine wettbewerbstheoretische und empirische Untersuchung am Beispiel des Luftverkehrssektors. - 2015. - IX, 252 S.
ISBN 978-3-7983-2749-8 (print) EUR 15,50
ISBN 978-3-7983-2750-4 (online)
- 30: Campos, Juliana Kucht: Integrated Framework for Managing Sustainable Supply Chain Practices.** - 2015. - xii, 121 S.
ISBN 978-3-7983-2783-2 (print) EUR 10,50
ISBN 978-3-7983-2784-9 (online)
- 31: Spiegel, Timo U.: Technologieorientiertes Service Engineering in der Kontraktlogistik.** Konzeption eines Gestaltungsmodells für die systematische Entwicklung technologiebasierter Logistikdienstleistungen. - 2016. - x, 295 S.
ISBN 978-3-7983-2807-5 (print) EUR 15,50
ISBN 978-3-7983-2808-2 (online)
- 32: Figiel, Anna: Transportmanagement in der schnelldrehenden Konsumgüterindustrie.** Entwicklung eines Gestaltungsansatzes zur Integration von Transport und Logistik. - 2016. - XVIII, 227 S.
ISBN 978-3-7983-2816-7 (print) EUR 14,50
ISBN 978-3-7983-2817-4 (online)

33: Durach, Christian F.: A Theoretical and Practical Contribution to Supply Chain Robustness. Developing a Schema for Robustness in Dyads. - 2016. - viii, 183 S.
ISBN 978-3-7983-2812-9 (print) EUR 13,50
ISBN 978-3-7983-2813-6 (online)

34: Blome, Hendrik: Logistische Optionen für eine nachhaltige Versorgung von Subsahara-Afrika. Ein Beitrag zur Humanitären Logistik. - 2016. - XVII, 315 S.
ISBN 978-3-7983-2840-2 (print) EUR 16,50
ISBN 978-3-7983-2841-9 (online)

35: Kucht Campos, Juliana: A methodology for planning sustainable supply chain initiatives. - 2016. - xviii, 326 S.
ISBN 978-3-7983-2860-0 (print) EUR 16,50
ISBN 978-3-7983-2861-7 (online)

36: Wutke, Sebastian: Entwicklung eines Gestaltungsmodells zur Berücksichtigung von Nachhaltigkeit bei der Ausschreibung und Vergabe logistischer Leistungen im Straßengüterverkehr. - 2017. - X, 299 S.
ISBN 978-3-7983-2862-4 (print) EUR 15,50
ISBN 978-3-7983-2863-1 (online)

37: Schöder, Dustin: Technisch-wirtschaftliche Bewertung des Einsatzes von batterieelektrischen Nutzfahrzeugen in der Distribution von Konsumgütern. - 2017. - XV, 287 S.
ISBN 978-3-7983-2920-1 (print) EUR 15,50
ISBN 978-3-7983-2921-8 (online)

Industrie 4.0 – Gestaltung cyber-physischer Logistiksysteme zur Unterstützung des Logistikmanagements in der Smart Factory

„Industrie 4.0“ steht für die vierte industrielle Revolution, die durch die sukzessive Vernetzung von physischer und digitaler Welt gekennzeichnet ist. Diese soll vergleichbare Auswirkungen auf die gesellschaftliche, technologische und wirtschaftliche Entwicklung haben, wie die vorangegangenen industriellen Revolutionen. Davon profitiert ebenfalls der Wirtschaftszweig Logistik, in dem die Anwendungsmöglichkeiten beispiellos und ohne den Einbezug cyber-physischer Logistiksysteme nicht möglich sein sollen. Die am Anfang befindliche wissenschaftliche und unternehmerische Diskussion macht demnach eine Auseinandersetzung mit Logistiksystemen auf Basis cyber-physischer Systeme im Kontext von Industrie 4.0 nötig.

Mit der Bündelung wissenschaftlicher und praktischer Erkenntnisse in der interdisziplinären Gestaltung eines cyber-physischen Logistiksystems der Industrie 4.0, bietet diese Dissertation Unternehmen einen durchgängigen Ansatz für die innerbetriebliche Industrielogistik in der Smart Factory. Die Berücksichtigung von Anforderungen und Leistungsfähigkeiten bisher eingesetzter Industrie 4.0-Lösungen bietet dem Logistikmanagement ein nützliches Werkzeug, die Trends, Herausforderungen und Anwendungspotenziale zur Erzielung von Wettbewerbsvorteilen einzuschätzen.

ISBN 978-3-7983-2944-7 (print)

ISBN 978-3-7983-2945-4 (online)



ISBN 978-3-7983-2944-7



<http://verlag.tu-berlin.de>