

Implementierungsstrategie für die Kombination aus Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien

Fabian Dillinger

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München zur Erlangung eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr. phil. Klaus Bengler

Prüfer*innen der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl

Die Dissertation wurde am 29.09.2023 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 27.12.2023 angenommen.

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes und damit die Sicherheit der Arbeitsplätze hängen entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen sowie von Nachhaltigkeitsaspekten entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in alle Planungs- und Entwicklungsprozesse spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Die Steuerung und der Betrieb von Produktionssystemen, die Qualitätssicherung, die Verfügbarkeit und die Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den Forschungsberichten des *iwb* werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des Institutes veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und den Anwendenden zu verbessern.

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM).

Ich möchte allen danken, die mich bei diesem Forschungsvorhaben unterstützt haben.

Besonderer Dank gebührt Herrn Professor Dr.-Ing. Gunther Reinhart für seine hervorragende Betreuung und sein fortwährendes Vertrauen, das mich bestärkt. Ebenso danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Michael Zäh sowie Herrn Prof. Guilherme Tortorella für deren wertvolle und weitblickende Anmerkungen und Diskussionen. Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. phil. Klaus Bengler für die Leitung der Prüfungskommission und Herrn Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl für das Korreferat.

Darüber hinaus danke ich allen Kolleginnen und Kollegen am *iwb*, die dazu beigetragen haben, dass diese Zeit zu einem unvergesslichen und prägenden Lebensabschnitt wurde. Insbesondere die fachlichen Diskussionen, Hilfsbereitschaft, Teamarbeit und gemeinsamen Erlebnisse werden mir dabei in Erinnerung bleiben.

Ein besonderer Dank gilt Barbara, Svenja, Olivia, Fabian, Quirin, Harald, Felix, Hannes, Benedikt, Clemens, Matthias und Fabian für ihre umfassende Unterstützung, kritische Reflexion und die unvergesslichen Momente. Auch allen Studentinnen und Studenten, die mich tatkräftig unterstützt haben, möchte ich danken.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich für ihren Rückhalt und die fortwährende Unterstützung.

Ein besonderer Dank richtet sich an meine Frau Julia für ihren Frohsinn, ihre aufmunternden Worte und ihr Verständnis für die vielen Arbeitsstunden. Du hast mir so vieles abgenommen, damit ich mich auf die Fertigstellung meiner Arbeit konzentrieren konnte, dafür danke ich dir von Herzen.

München im Januar 2024

Fabian Dillinger

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	V
Verzeichnis der Formelzeichen	VII
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen.....	3
1.3 Wissenschaftliches Vorgehen.....	5
1.3.1 Wissenschaftstheoretische Einordnung.....	5
1.3.2 Forschungsmethodik und Aufbau der Arbeit.....	7
2 Grundlagen	11
2.1 Lean Production	11
2.1.1 Begriffsdefinition und Grundlagen von Lean Production	12
2.1.2 Grundprinzipien von Lean Production.....	15
2.2 Industrie 4.0.....	18
2.2.1 Begriffsdefinition und Grundlagen von Industrie 4.0.....	19
2.2.2 Technologiefelder von Industrie 4.0	22
2.3 Lean 4.0.....	26
2.3.1 Begriffsdefinition und Grundlagen von Lean 4.0.....	26
2.3.2 Wechselwirkungen zwischen Lean Production und Industrie 4.0	29
2.4 Produktionsrelevante Zielgrößen	31
2.4.1 Begriffsdefinition und Grundlagen von Zielgrößen.....	31
2.4.2 Auswahl produktionsrelevanter Zielgrößen	32
2.5 Ablaufsimulation	35
2.5.1 Begriffsdefinition und Grundlagen zu Systemen, Modellen und Simulation	35

2.5.2	Grundlagen des System-Dynamics-Ansatzes.....	37
3	Stand der Forschung	41
3.1	Bewertungskriterien für den Stand der Forschung.....	41
3.2	Analyse der Wirkbeziehung zwischen Lean Production und Industrie 4.0.....	43
3.3	Implementierungsansätze	53
3.3.1	Lean-Production-Implementierungsansätze	53
3.3.2	Industrie-4.0-Implementierungsansätze	56
3.3.3	Lean-4.0-Implementierungsansätze	60
3.4	Ableitung des Handlungsbedarfs.....	66
4	Anforderungen und Grundstruktur der Methode	71
4.1	Anforderungen an die Methode	71
4.1.1	Allgemeine Anforderungen	71
4.1.2	Inhaltliche Anforderungen	72
4.2	Grundstruktur der Methode	73
5	Konkretisierung und Entwicklung der Methode.....	75
5.1	Lösungsbaustein 1 Auswahl und Spezifizierung.....	75
5.1.1	Auswahl und Strukturierung der Lean-Production-Methoden	76
5.1.2	Auswahl und Strukturierung der Industrie-4.0-Technologien	80
5.1.3	Morphologischer Kasten zur Spezifizierung der Elemente.....	87
5.1.4	Spezifizierung der Lean- und Industrie-4.0-Elemente.....	91
5.2	Lösungsbaustein 2 Interdependenzanalysen.....	94
5.2.1	Interdependenzanalyse von Lean-Production-Methoden	97
5.2.2	Interdependenzanalyse von Industrie-4.0-Technologien.....	99
5.2.3	Interdependenzanalyse von Lean- und Industrie-4.0-Elementen.....	104
5.3	Lösungsbaustein 3 Simulation der Lean-4.0-Implementierungsstrategien.....	109
5.3.1	Modellparameter	110
5.3.2	Wirkbeziehungen und Modellstrukturen.....	118
5.3.3	Simulationsablauf und Simulationsergebnisse.....	124

5.3.4	Anwendungsmethode des Lean-4.0-Simulationsmodells	127
6	Anwendung und Evaluation	131
6.1	Ableitung einer Lean-4.0-Referenzstrategie.....	132
6.1.1	Phase 1 Vorbereitung der Lean-4.0-Referenzstrategie	132
6.1.2	Phase 2 Bewertung und Auswahl für die Lean-4.0-Referenzstrategie.....	133
6.1.3	Phase 3 Simulation der Lean-4.0-Referenzstrategie.....	135
6.2	Industrielle Anwendung der Methode.....	141
6.2.1	Phase 1 Vorbereitung	142
6.2.2	Phase 2 Bewertung und Auswahl.....	144
6.2.3	Phase 3 Simulation der Lean-4.0-Implementierungsstrategie	146
6.3	Evaluation und Diskussion der Forschungsergebnisse.....	151
6.3.1	Feedback durch Industrieunternehmen.....	151
6.3.2	Wirtschaftlichkeitsbewertung.....	153
6.3.3	Validierung der Methode	156
6.3.4	Kritische Reflexion	160
7	Zusammenfassung und Ausblick	163
	Literaturverzeichnis	165
	Studienarbeitsverzeichnis	190
	Vorveröffentlichungsverzeichnis.....	192
	Anhang.....	194

Abkürzungsverzeichnis

5S	Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu, Shitsuke (dt. Sortieren, Systematisieren, Säubern, Standardisieren und Selbstdisziplin)
AF	Additive Fertigung
AGV	Autonomous Guided Vehicles (dt. fahrerlose Transportsysteme)
AR	Augmented Reality
BITKOM	Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
CAX	Computer Aided X
CPPS	Cyber-physisches Produktionssystem
CPS	Cyber-physisches System
DRM	Design Research Methodology
ERP	Enterprise Resource Planning
FF	Forschungsfrage
FTS	Fahrerlose Transportsysteme
GPS	Ganzheitliche Produktionssysteme
H	Hilfsmittel
I 4.0	Industrie 4.0
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IoT	Internet of Things (dt. Internet der Dinge)
<i>iwb</i>	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften

JiT	Just in Time
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LB	Lösungsbaustein
LP	Lean Production
MES	Manufacturing Execution System
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MMI	Mensch-Maschine-Interaktion
MTO	Mensch Technik Organisation
PDCA	Plan Do Check Act
PLM	Product-Lifecycle-Management
SMED	Single Minute Exchange of Die (dt. Werkzeugwechsel im einstelligen Minutenbereich)
TPM	Total Productive Maintenance
TPS	Toyota-Produktionssystem
TRL	Technology Readiness Level
U	Unterstützende Wirkbeziehung
V	Voraussetzende Wirkbeziehung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
VDU	Veränderungsbereitschaft des Unternehmens
VR	Virtual Reality
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie

Verzeichnis der Formelzeichen

A	Anfangszustand
E	Ergebnis
IF	Implementierungsfortschritt
KPL	Fachkompetenz der projektleitenden Personen
KOM	Fachkompetenz der operativen mitarbeitenden Personen
m	Steigung
R	Relevanz des Lean- oder Industrie-4.0-Elements für das Unternehmen
TES	Technologie-Entwicklungsstufe
UF	Unterstützungsfaktor
VF	Verkürzungsfaktor

1 Einleitung

„Progress cannot be generated when we are satisfied with existing situations.“
(Taiichi Ōno, 1912–1990)

Dieses Zitat nach Taiichi Ōno, einem Mitbegründer des Toyota-Produktionssystems (TPS), adressiert ein stetiges Streben nach Verbesserung. Um Verbesserungen gezielt und effizient voranzutreiben, muss der Ist-Zustand bewertet werden und eine Zielvision bekannt sein. Darauf basierend können Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet und in eine systematische und zielorientierte Implementierungsstrategie überführt werden. Die stetige Verbesserung der Produktionsprozesse sollte dabei eine der grundlegenden Maximen für Unternehmen darstellen, um die langfristige Wettbewerbsfähigkeit zu sichern. Die vorliegende Arbeit und die darin entwickelte Methode folgen diesem Leitgedanken und sollen produzierende Unternehmen in ihrem Lean-4.0-Transformationsprozess unterstützen.

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Das produzierende Gewerbe trägt mit einem Anteil von 24 % am Bruttoinlandsprodukt im Jahr 2021 wesentlich zum wirtschaftlichen Erfolg Deutschlands bei (DESTATIS 2022, S. 18). Dabei gelten insbesondere die Automobilindustrie sowie der Maschinen- und Anlagenbau als Schlüsselsegmente, die sich bislang auf ihren produktionstechnischen Vorsprung und ihre qualitativ hochwertigen Produkte stützen konnten (LIEBRECHT 2020, S. 1). Allerdings befinden sich Unternehmen dieser Segmente in einem herausfordernden Wettbewerbsumfeld, das durch steigende Qualitätsanforderungen, dynamische Produktlebenszyklen sowie einen zunehmenden Kostendruck charakterisiert ist (HERDER & AURICH 2015, S. 43 f., REINHART 2017, S. XXXV, WAGNER 2018, S. 54). Dieses hochkompetitive Umfeld erfordert eine flexible, reaktionsschnelle und resiliente Organisationsstruktur, verbunden mit einer Transformationsstrategie zur Verschlankeung und Digitalisierung der Produktionsabläufe als zentrale Effizienzfaktoren moderner Produktionssysteme (WAGNER 2018, S. 16, DOMBROWSKI & MIELKE 2015, S. 18 ff.).

Im Zentrum dieses Transformationsprozesses steht die sukzessive Verbesserung von Produktions- und Logistiksystemen im Sinne von Industrie 4.0 (I 4.0) und Lean Production

(LP) (REINHART 2017, S. XXXIV, RÖBLER & HASCHEMI 2017, S. 699). Industrie 4.0 umfasst dabei die echtzeitfähige, intelligente Vernetzung von physischen Objekten, Menschen, Maschinen und Anlagen über System- und Organisationsgrenzen hinweg (BAUER ET AL. 2014, S. 18). Das Ziel ist es, die Produktionskosten zu senken und gleichzeitig die Leistungsfähigkeit der gesamten Wertschöpfungskette zu erhöhen (DOMBROWSKI ET AL. 2017, S. 1062). Gemäß den Studienergebnissen von SCHUH ET AL. (2020, S. 11) wird das Wertschöpfungspotenzial von Industrie 4.0 in Deutschland bis zum Jahr 2025 auf etwa 70 bis 140 Milliarden Euro prognostiziert. Dieses Potenzial wird auch von deutschen Unternehmen wahrgenommen, was eine Studie der BITKOM Research GmbH aus dem Jahr 2021 belegt. Hierbei begriffen 95 % der 551 befragten Unternehmen Industrie 4.0 als Chance für den Erhalt und die Steigerung ihrer Wettbewerbsfähigkeit. Allerdings stuften sich 66 % der Unternehmen als Nachzügler oder als abgehängt bei der Implementierung von Industrie-4.0-Technologien ein (ROHLEDER 2021, S. 11). In diesem Zusammenhang weisen MÜLLER ET AL. (2018, S. 6) auf die Komplexität, Unsicherheit und den Ressourcenaufwand hin, die einem Industrie-4.0-Transformationsprozess innewohnen und Einfluss auf funktionale, organisatorische und technologische Unternehmensaspekte nehmen (ALTER 2003, S. 368 f.).

Eine notwendige Voraussetzung für diesen Transformationsprozess stellen daher schlanke, konsequent am Kundennutzen ausgerichtete Produktionsabläufe im Sinne von Lean Production dar (DOMBROWSKI & MIELKE 2015, S. 19, METTERNICH ET AL. 2018, S. 11, LERCH ET AL. 2021, S. 11). Lean Production ist ein ganzheitlicher Managementansatz, der darauf abzielt, alle Arten von Verschwendungen zu eliminieren. Als Verschwendung gelten alle Aktivitäten, die keinen Kundennutzen generieren (ŌNO 2013, S. 53). Dabei konzentriert sich der Lean-Production-Ansatz auf die systemische Anwendung von Lean-Methoden und -Prinzipien durch selbstorganisierte und befähigte Mitarbeitende. Somit handelt es sich bei Lean Production um einen Managementansatz, bei dem die Menschen und die Organisation die treibenden Kräfte zur Weiterentwicklung der Produktionsprozesse und der Unternehmenskultur darstellen (RITTBERGER & SCHNEIDER 2018, S. 1).

Erst die Verschränkung des technologischen Ansatzes Industrie 4.0 mit der mensch- und organisationsorientierten Domäne Lean Production kann eine ganzheitliche Betrachtung des Transformationsprozesses gewährleisten. Es ist daher notwendig, mögliche gegenseitige Abhängigkeiten und Voraussetzungen der beiden Produktionsansätze zu berücksichtigen (DOMBROWSKI & RICHTER 2016, S. 773, METTERNICH ET AL. 2018, S. 11). Diese Sichtweise wurde von 93 % der in einer Studie befragten Unternehmen geteilt, die eine positive Wechselwirkung zwischen den beiden Ansätzen erwarteten (DILLINGER ET AL. 2020, S. 739). Die gezielte Wirkverknüpfung von Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien in Form eines kombinierten Lean-4.0-Ansatzes verspricht zudem weitreichende

Synergiepotenziale (PRINZ ET AL. 2018, S. 23). So ist ein Kosteneinsparungspotenzial in der Produktion von bis zu 40 % zu erwarten (KÜPPER ET AL. 2017, S. 10). Auch LERCH ET AL. (2021, S. 11) identifizieren in ihrer Studie mit 1256 deutschen Unternehmen aus dem Jahr 2021 erhebliche Wettbewerbsvorteile für produzierende Unternehmen mit einem gleichermaßen hohen Lean- und Industrie-4.0-Reifegrad. Diese Unternehmen weisen im Vergleich zu Unternehmen mit einer geringen Implementierungsreife eine etwa doppelt so hohe Wertschöpfung pro Person auf. Allerdings können bisher nur circa 13 % der produzierenden Unternehmen in Deutschland diese Synergieeffekte nutzen, da die erforderliche Implementierungsreife für Lean Production und Industrie 4.0 noch nicht erreicht ist (LERCH ET AL. 2021, S. 11).

VIGNESHVARAN UND VINODH (2021, S. 504) analysierten diesbezüglich die zwölf am häufigsten in der Literatur genannten Hindernisse, die einer nachhaltigen Implementierung von Lean- und Industrie-4.0-Elementen entgegenstehen. Den Ergebnissen folgend ist für die Unternehmen eine fehlende Implementierungsstrategie ein entscheidendes Hemmnis. Dabei fehlt es ihnen an einem unternehmensspezifischen, in sich konsistenten Implementierungsvorgehen für die konsequente und nachhaltige Einführung von Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien (VIGNESHVARAN & VINODH 2021, S. 504, LANZA ET AL. 2011, S. 37). Eine Ursache dafür könnte in dem von EJSMONT ET AL. (2020, S. 21) identifizierten industrie- und forschungsseitigen Wissensdefizit bezüglich der Interdependenzen zwischen Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien liegen. Den Autoren AULL (2012) und LIEBRECHT (2020) zufolge erschwert dies die Ableitung von allgemeingültigen und unternehmensindividuellen Implementierungsreihenfolgen, die Synergieeffekte zwischen Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien berücksichtigen. Neben einer umfassenden und tiefgreifenden Darstellung der Wirkbeziehungen mangelt es den Unternehmen zudem an einer Möglichkeit, die aus der Lean-4.0-Implementierung erwartbare Zielgrößenentwicklung zu prognostizieren (LANZA ET AL. 2011, S. 37, BAKHTARI ET AL. 2020, S. 2387).

1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Die im vorherigen Abschnitt aufgeführten Herausforderungen erschweren eine systematische Einführung von Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien in produzierenden Unternehmen. Aufgrund mangelnder Nutzentransparenz und des fehlenden Wissens über komplexe produktionstechnische Wirkzusammenhänge zwischen Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien verfügen produzierende Unternehmen oftmals über keine unternehmensspezifische Lean-4.0-Implementierungsstrategie. Dies verzögert den notwendigen ganzheitlichen Transformationsprozess der Unternehmen.

Die übergeordnete Zielstellung dieser Forschungsarbeit ist daher die *Entwicklung einer Methode, die produzierende Unternehmen dazu befähigt, allgemeingültige und unternehmensspezifische Lean-4.0-Implementierungsstrategien abzuleiten, um produktionsrelevante Zielgrößen zu verbessern*. Als Strategie wird im Zuge dieser Arbeit in Anlehnung an die Richtlinie des VDI 2870-1 ein rational geplantes, in sich stimmiges, komplexes Maßnahmenbündel, bestehend aus Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien, verstanden. Die interdependenzbasierte Lean-4.0-Implementierungsstrategie soll dazu beitragen, produktionsrelevante Zieldimensionen wie Zeit, Kosten, Qualität, Flexibilität oder ökologische und soziale Nachhaltigkeit zu verbessern.

Um diese Zielsetzung zu erreichen und die drei nachstehenden forschungsleitenden Fragen beantworten zu können, ist eine umfassende Fachexpertise im Bereich Produktionstechnik erforderlich. Dabei müssen insbesondere komplexe montage- und fertigungstechnische Wirkbeziehungen von Lean-Production- und Industrie-4.0-Elementen erforscht und deren Einfluss auf produktionsrelevante Kennzahlen analysiert werden.

FF-1: Wie können für die Produktion relevante Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien *ausgewählt und spezifiziert* werden und wie lässt sich deren *Einfluss auf produktionsrelevante Zielgrößen* darstellen?

FF-2: Welche *Interdependenzen* bestehen zwischen Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien?

FF-3: Wie können allgemeingültige und unternehmensspezifische *Lean-4.0-Implementierungsstrategien* für produzierende Unternehmen abgeleitet werden?

Die drei aufgeführten Forschungsfragen dienen der Strukturierung dieser Forschungsarbeit und zielen auf die Erarbeitung einer Methode zur Entwicklung einer allgemeingültigen sowie unternehmensspezifischen Lean-4.0-Implementierungsstrategie ab. Zudem sollen die durch die Lean-4.0-Implementierung erwartbaren Entwicklungsverläufe der produktionsrelevanten Zielgrößen aufgezeigt werden.

Dabei werden zunächst ausgewählte Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien spezifiziert und deren Einfluss auf produktionsrelevante Zielgrößen wird analysiert. Dies bildet die Basis für die Erarbeitung eines strukturierten Bewertungs- und Auswahlprozesses, der es produzierenden Unternehmen ermöglicht, die für sie relevanten Technologien und Methoden zu bestimmen. Zudem werden wechselseitige Wirkbeziehungen zwischen Lean- und Industrie-4.0-Elementen erforscht, um eine ganzheitliche Betrachtung des Transformationsprozesses in der Produktion sicherzustellen. Abschließend wird eine Anwendungsmethode erarbeitet, deren Kern aus einem systemdynamischen Simulationsmodell besteht. Dieses Modell ermöglicht die Entwicklung von allgemeingültigen und unternehmensin-

dividuellen Implementierungsstrategien für Lean- und Industrie-4.0-Elemente und simuliert den Entwicklungsverlauf produktionsrelevanter Zielgrößen. Die generierten Ergebnisse unterstützen produzierende Unternehmen bei ihrem Lean-4.0-Transformationsprozess, indem unternehmensspezifische Implementierungsstrategien bereitgestellt werden, die den in Abschnitt 1.1 vorgestellten Herausforderungen entgegenwirken.

Die entwickelte Methode ist so konzipiert, dass sie von produzierenden Unternehmen in unterschiedlichen Branchen angewendet werden kann (siehe Abschnitt 6.2). Der Betrachtungsfokus liegt dabei auf der Produktion, um sicherzustellen, dass die Interdependenzen der Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien detailliert untersucht werden können. Unter dem Unternehmensbereich Produktion werden in Anlehnung an EVERSHEIM (1992, S. 2058) alle wirtschaftlichen, technologischen und organisatorischen Maßnahmen verstanden, die unmittelbar mit der Be- und Verarbeitung von Stoffen zusammenhängen.

1.3 Wissenschaftliches Vorgehen

Um die dargelegte Zielsetzung zu erreichen und die genannten Forschungsfragen zu beantworten, werden im Folgenden die wissenschaftstheoretische Einordnung sowie die dieser Arbeit zugrunde liegende Forschungsmethodik und deren Aufbau erläutert.

1.3.1 Wissenschaftstheoretische Einordnung

Eine wissenschaftstheoretische Einordnung dieser Forschungsarbeit lässt sich mithilfe der von ULRICH UND HILL (1976, S. 305) vorgestellten Wissenschaftssystematik durchführen. Dabei wird Wissenschaft in Real- und Formalwissenschaften kategorisiert. Während sich die Formalwissenschaften mit formalen, durch mathematische Wirkzusammenhänge beschriebenen Objekten auseinandersetzen, können die Realwissenschaften in die reinen Grundlagenwissenschaften sowie die angewandten Handlungswissenschaften segmentiert werden. Dabei konzentrieren sich die Grundlagenwissenschaften auf die Erklärung empirischer Ausschnitte der Wirklichkeit. Die Handlungswissenschaften hingegen fokussieren sich auf die Analyse menschlicher Handlungsalternativen und verfolgen ein praktisches Ziel in Form von neuen Entscheidungsmodellen und -prozessen (ULRICH & HILL 1976, S. 305). Aufgrund ihres Facettenreichtums können ingenieurwissenschaftliche Forschungsarbeiten sowohl den Grundlagen- als auch den angewandten Handlungswissenschaften zugeordnet werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Bearbeitung von anwendungsorientierten Fragestellungen mehrheitlich auch mit einem theoretischen Erkenntnisgewinn einhergeht. Die beschriebene wissenschaftstheoretische Einordnung ist in nachstehender Abbildung veranschaulicht (siehe Abbildung 1-1).



Abbildung 1-1: Wissenschaftstheoretische Einordnung in Anlehnung an ULRICH UND HILL (1976, S. 305)

Die dieser Arbeit zugrunde liegende Problemstellung stammt aus der Praxis und basiert auf außerwissenschaftlichen Fragestellungen. Durch die angestrebte Entwicklung einer Methode zur Ableitung allgemeingültiger und unternehmensindividueller Lean-4.0-Implementierungsstrategien kann diese Forschungsarbeit gemäß ULRICH (1982, S. 1) den angewandten Handlungswissenschaften zugeordnet werden. Allerdings ist die Erklärung empirischer Wirklichkeitsausschnitte für die Erarbeitung einzelner Lösungsbausteine – etwa bei der Lean- und Industrie-4.0-Interdependenzanalyse – essenziell, womit sich auch ein theoretischer Erkenntnisgewinn ergibt. Dieser Erkenntnisgewinn folgt dem heuristischen Forschungsdesign nach KUBICEK (1977). Dabei wird der Forschungsablauf als iterativer Lernprozess charakterisiert, bei dem der Wissenszuwachs aus einem wechselseitigen Wirken zwischen Vorerfahrungen und hinzugewonnen Erkenntnissen entsteht (KUBICEK 1977, S. 3 ff.). Die Vorerfahrungen werden dabei als heuristischer Bezugsrahmen bezeichnet, welcher beim Autor aus seiner Tätigkeit als Projekt Ingenieur sowie seiner Rolle als Trainer und Berater besteht. Insbesondere die gewonnenen Kenntnisse in den Bereichen Digitalisierung, Produktionstechnik-, -organisation, und -strategie bilden im Verbund den Bezugsrahmen dieser Forschungsarbeit und sind in Abbildung 1-2 dargestellt.

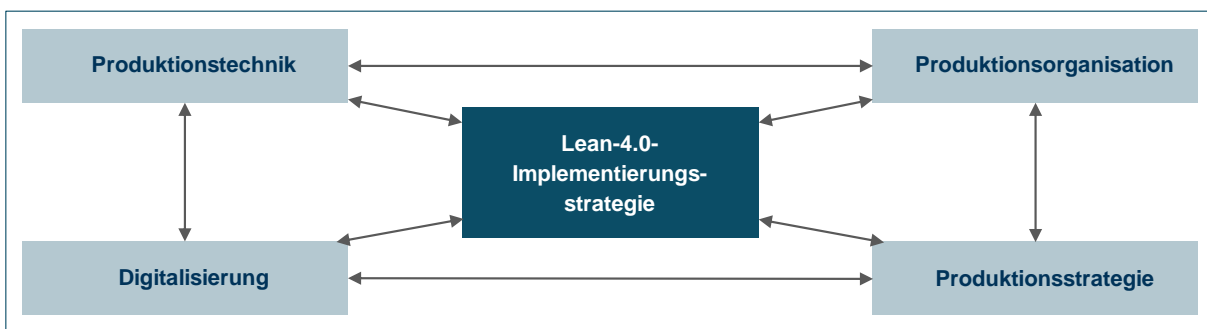


Abbildung 1-2: Heuristischer Bezugsrahmen der Forschungsarbeit

Um die wissenschaftlichen Anforderungen zu erfüllen, orientiert sich der Forschungsablauf zudem an einer strukturgebenden Forschungsmethode. Diese trägt dazu bei, wissenschaftlich valide, konsistente und relevante Forschungsergebnisse zu generieren, die nachvollziehbar und überprüfbar sind (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 13). Dabei orientiert sich die Ausarbeitung an der Design Research Methodology (DRM) von BLESSING UND CHAKRABARTI (2009), die vier Phasen umfasst: die *Klärung des Forschungsbedarfs*, die *Deskriptive Studie 1*, die *Präskriptive Studie* sowie die *Deskriptive Studie 2*. Die Phasen können beliebig kombiniert werden, was zu sieben unterschiedlichen Forschungstypen führt.

Dabei sind Dissertationsvorhaben vornehmlich den Typen 1 bis 4 zugehörig. Forschungsarbeiten des ersten Typs legen ihren Schwerpunkt auf die Ermittlung von Erfolgsfaktoren und bilden die Basis für die weiteren Forschungstypen. So zeichnet sich der zweite Typ durch seinen Fokus auf eine umfassende Studie zur gegenwärtigen Situation aus. Beinhaltet die Arbeit zudem eine konkrete Lösung für eine Problemstellung, wird sie als Typ 3 deklariert und erfüllt durch eine ergänzende fundierte wissenschaftliche Evaluation der erarbeiteten Lösung die Merkmale von Typ 4. Die Forschungstypen 5 und 6 decken zwei Phasen eingehend ab und bei Typ 7 sind drei Phasen erforderlich, die umfassend bearbeitet werden. (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 17 ff.) Basierend auf der wissenschaftstheoretischen Einordnung werden im nachfolgenden Abschnitt die Forschungsmethodik und der Aufbau dieser Forschungsarbeit beschrieben.

1.3.2 Forschungsmethodik und Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Forschungsarbeit hat die Entwicklung einer Methode zur Ableitung von allgemeingültigen und unternehmensspezifischen Lean-4.0-Implementierungsstrategien für produzierende Unternehmen zum Ziel und kann der DRM von BLESSING UND CHAKRABARTI (2009) folgend dem Forschungstyp 4 zugeordnet werden. Die nachstehende Abbildung verbindet die Phasen der DRM mit den gewählten Forschungsansätzen sowie den Kapiteln und Abschnitten dieser Forschungsarbeit (siehe Abbildung 1-3).

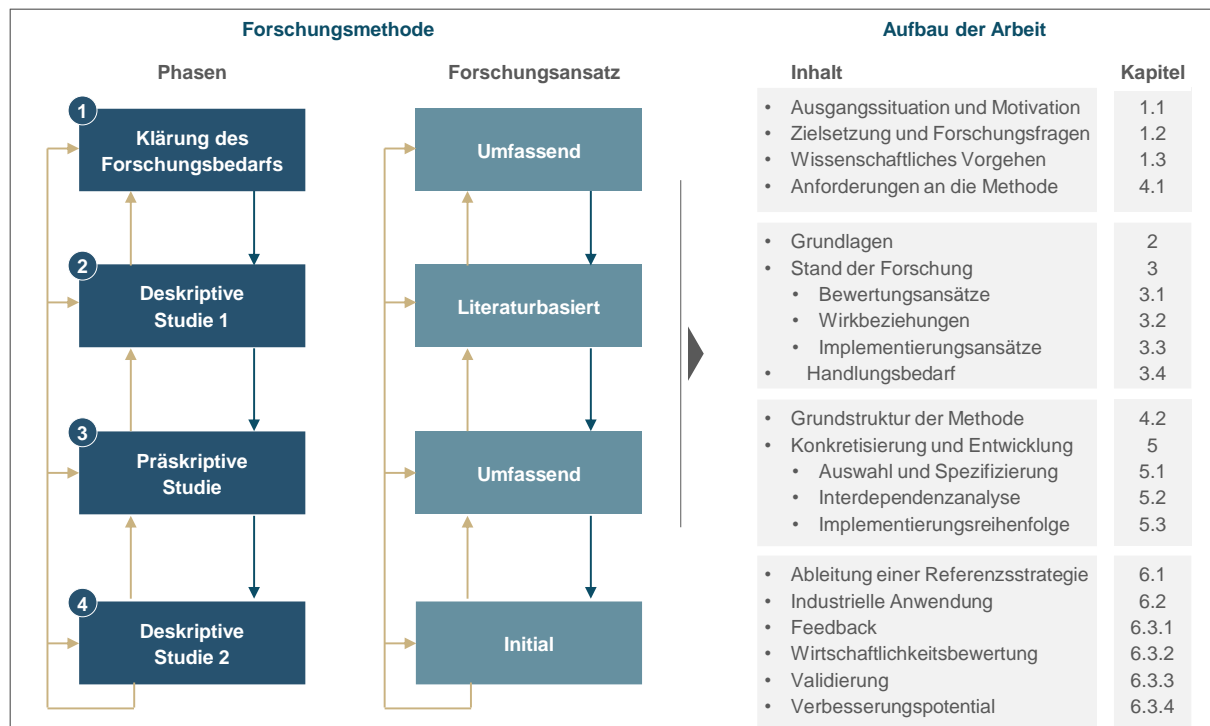


Abbildung 1-3: Aufbau der Arbeit und Einordnung der Inhalte in die angewendete Forschungsmethode nach BLESSING UND CHAKRABARTI (2009)

Wie in Abbildung 1-3 veranschaulicht, ist die Forschungsarbeit in ihrem Aufbau und ihrer Struktur am Vorgehen der DRM ausgerichtet. Dabei werden alle vier Phasen des Frameworks betrachtet.

Auf Grundlage einer Untersuchung der für die vorliegende Arbeit relevanten Forschungsbereiche dient die erste Phase zur **Klärung des Forschungsbedarfs**. Die Festlegung des Forschungsziels (siehe Kapitel 1) sowie die Definition der Anforderungen an die Methode (siehe Abschnitt 4.1) erfolgen terminologisch-deskriptiv basierend auf einer Literaturanalyse. Diese Phase dient dazu, realistische und lohnende Ziele für die eigene Forschung abzuleiten (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 30).

Die konsequente **Deskriptive Studie 1** besteht aus einer detaillierten Literaturanalyse, um ein umfassendes und tiefgehendes Verständnis des Forschungsumfelds (siehe Kapitel 3) zu generieren sowie ein potenzielles Forschungsdefizit (siehe Abschnitt 3.4) zu identifizieren (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 32). Die Erkenntnisse dieser Phase wurden folglich literaturbasiert erarbeitet und in diversen Gesprächen mit Fachleuten aus der Industrie und Forschung validiert.

In der **Präskriptiven Studie** erfolgt auf Grundlage der bisherigen Ergebnisse die systematische Konzeptionierung und Beschreibung des Methodenaufbaus. Das Ziel dieser Phase besteht in der Entwicklung konkreter Lösungen zur Erreichung der in Abschnitt 1.2 definierten Zielstellung (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 35). Dazu segmentiert sich das

Vorgehen in drei Lösungsbausteine, in denen beispielsweise Steckbriefe, Interdependenzmatrizen, Vorgehensweisen oder ein systemdynamisches Simulationsmodell erarbeitet wurden. Die Ausarbeitung der Lösungsbausteine erfolgte durch einen multiperspektivischen Lösungsansatz, der auf der bestehenden Fachliteratur, Delphi-Studien, der Befragung von Fachleuten sowie der Analyse von Anwendungsfällen beruht (siehe Kapitel 5). Somit resultierte die inhaltliche Erarbeitung sowohl aus einem empirisch-induktiven als auch analytisch-deduktiven Ansatz.

Die *Deskriptive Studie 2* dient abschließend der praxisnahen Evaluation und Validierung des Lösungsansatzes. Der Fokus liegt hierbei auf der Bewertung des Nutzens sowie der Anwendbarkeit der entworfenen Methode und des entwickelten prototypischen Simulationsmodells. Die Evaluation erfolgte durch die Analyse empirischer Daten, aus denen Verbesserungspotenziale abgeleitet werden (siehe Kapitel 6) (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 37 f.).

2 Grundlagen

Um ein einheitliches Verständnis des wissenschaftstheoretischen Rahmens sowie der Begrifflichkeiten zu generieren, werden in Kapitel 2 die Grundlagen zu den Themengebieten Lean Production (siehe Abschnitt 2.1), Industrie 4.0 (siehe Abschnitt 2.2), Lean 4.0 (siehe Abschnitt 2.3) sowie zu produktionsrelevanten Zielgrößen (siehe Abschnitt 2.4) und zur systemdynamischen Ablaufsimulation (siehe Abschnitt 2.5) vermittelt. Die beiden erstgenannten Abschnitte 2.1 und 2.2 definieren die grundlegenden Begrifflichkeiten und zeigen die Wesensmerkmale von Lean Production und Industrie 4.0. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 2.3 der übergeordnete Zusammenhang zwischen Lean Production und Industrie 4.0 im Sinne von Lean 4.0 vorgestellt. Zudem werden die Grundlagen produktionspezifischer Zielgrößen in Abschnitt 2.4 und der wissenschaftstheoretische Rahmen zur systemdynamischen Ablaufsimulation in Abschnitt 2.5 aufgezeigt.

2.1 Lean Production

Der Lean-Production-Ansatz baut auf den Überlegungen und Erkenntnissen von Frederick W. Taylor und Henry Ford auf. Dabei gilt Taylor als Begründer der wissenschaftlichen Betriebsführung, im Rahmen derer durch die systematische Analyse und Strukturierung von Arbeitsinhalten erhebliche Einsparungen in Produktionsprozessen erzielt werden können (TAYLOR 1919). Ford hingegen reduzierte aufwändige Arbeitsschritte durch die Standardisierung von Einzelteilen und erleichterte die Montagetätigkeiten in der Automobilindustrie durch die Einführung der Fließbandproduktion. Als zentrales Gestaltungsmerkmal für die Produktion benennt Ford die Fokussierung auf die Reduzierung der Produktionskosten (FORD 2018, S. 112). Taiichi Ōno adaptierte die durch Taylor und Ford gewonnenen Erkenntnisse auf die japanische Automobilproduktion und entwickelte das Toyota-Produktionssystem (TPS (DOMBROWSKI & MIELKE 2015, S. 15 f.)). Dieses gilt als Vorbild für den heute bekannten Lean-Production-Ansatz, der erstmals in der Studie „The Machine That Changed the World“ des Massachusetts Institute of Technology (MIT) einem breiten Zielpublikum zugänglich gemacht wurde (WOMACK ET AL. 1990). Lean Production beschreibt dabei die Organisation von Produktionsstätten mit einer konsequenten Ausrichtung auf die Kostensenkung durch die systematische Eliminierung von Verschwendung (WOMACK ET AL. 1990, S. 10, TEGEL 2012, S. 10).

Der nachstehende Abschnitt gibt einen Einblick in die Grundlagen von Lean Production und definiert zentrale Begrifflichkeiten (siehe Abschnitt 2.1.1). Darauf aufbauend werden die wesentlichen Grundprinzipien von Lean Production vermittelt (siehe Abschnitt 2.1.2).

2.1.1 Begriffsdefinition und Grundlagen von Lean Production

Gemäß ŌNO (2008) lassen sich die Zielsetzung und die zugrunde liegende Philosophie von Lean Production wie folgt zusammenfassen:

„All we are doing is looking at the timeline from the moment the customer gives us an order to the point when we collect the cash. And we are reducing that time line by removing the non-value adding wastes.“ (ŌNO 2008, S. XI)

Dieses Zitat unterstreicht den Kerngedanken von Lean Production, der auf einer Reduktion der Kostenstruktur eines Unternehmens durch die konsequente Eliminierung von Verschwendung basiert (WOMACK ET AL. 1990, S. 10). Als Verschwendung wird dabei jede Tätigkeit verstanden, die Ressourcen verbraucht und somit Kosten verursacht, jedoch keinen Wert aus Sicht des Kunden generiert (ŌNO 2013, S. 53). Die Eliminierung dieser nicht wertschöpfenden Tätigkeiten erfolgt durch das systematische Zusammenwirken von Lean-Production-Methoden, hervorgerufen durch einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess. Dabei schafft die Lean-Production-Philosophie ein menschenzentriertes System, das die Belegschaft dazu befähigt, als aktiv Problemlösende in einem prozessorientierten Arbeitsumfeld nach fortwährender Verbesserung zu streben (BRUNNER 2008, S. 6 ff.). Nach LIKER (1998, S. IX) geht es bei Lean Production nicht nur um einzelne Prinzipien oder Methoden, sondern um eine ganzheitliche Denkweise, die eine Kultur der kontinuierlichen Verbesserung schafft.

In der Literatur existiert für den Lean-Ansatz und dessen Methoden und Prinzipien eine Vielzahl an Definitionen (MARODIN & SAURIN 2013, S. 6663), weshalb im Folgenden die für diese Arbeit wesentlichen Elemente von Lean Production vorgestellt werden.

Das Toyota-Produktionssystem

Das TPS strebt nach verschwendungsarmen Produktionsstrukturen und wird von LIKER (1998) in Anlehnung an den Grundgedanken von ŌNO (2008) wie folgt charakterisiert:

„[Das Toyota-Produktionssystem ist] eine Fertigungsphilosophie, die durch die Beseitigung von Verschwendungen die Durchlaufzeit vom Kundenauftragseingang bis zur Auslieferung verkürzt“ (LIKER 1998, S. 7).

Dabei hat die Produktionsphilosophie des TPS die exakte Ausrichtung auf die Kundenbedürfnisse unter Berücksichtigung der zeitlichen, qualitativen, quantitativen und kostenorientierten Rahmenbedingungen zum Ziel (WOMACK ET AL. 1990, S. 10). Dies soll durch die Vermeidung von Verschwendung über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg ermöglicht werden (LIKER 1998, S. 7). Als Verschwendung gelten gemäß ŌNO (2008, S. 19) die drei aus dem Japanischen stammenden Begriffe *Muda* (jap. Eliminierung von Verschwendung), *Mura* (jap. ungleichmäßige Produktionsauslastung) und *Muri* (jap. Überbeanspruchung). Um diesen drei Verschwendungsarten entgegenzuwirken, wurde das TPS sukzessive zu einem holistischen Produktionssystem weiterentwickelt, in dem Interdependenzen zwischen Grundprinzipien, Methoden und Unternehmenszielen vorherrschen (TAKEDA 2013, S. 239). Zur Beschreibung des Produktionssystems wird oftmals die Darstellungsform eines Hauses gewählt (DOMBROWSKI ET AL. 2006, S. 555). Die beiden tragenden Säulen bilden die Prinzipien der Just-in-Time-Belieferung (JiT) sowie der Autonomation von Produktionsprozessen (jap. Jidoka), die eine prozessimmanente Qualität jeder Arbeitsstation ermöglicht (SUGIMORI ET AL. 1977, S. 557). Basierend auf den Fundamenten Produktionsnivellierung, visuelles Management, stabile und standardisierte Prozesse sowie der Toyota-Kultur befinden sich die Menschen im Zentrum des Hauses. Dabei sollen alle Personen befähigt werden, Verschwendung zu eliminieren und Arbeitsabläufe kontinuierlich zu verbessern, um die Ziele des TPS zu erreichen, die im Dach des Hauses verortet sind. Folgende Darstellung (Abbildung 2-1) zeigt das TPS in Anlehnung an LIKER (2013, S. 65).

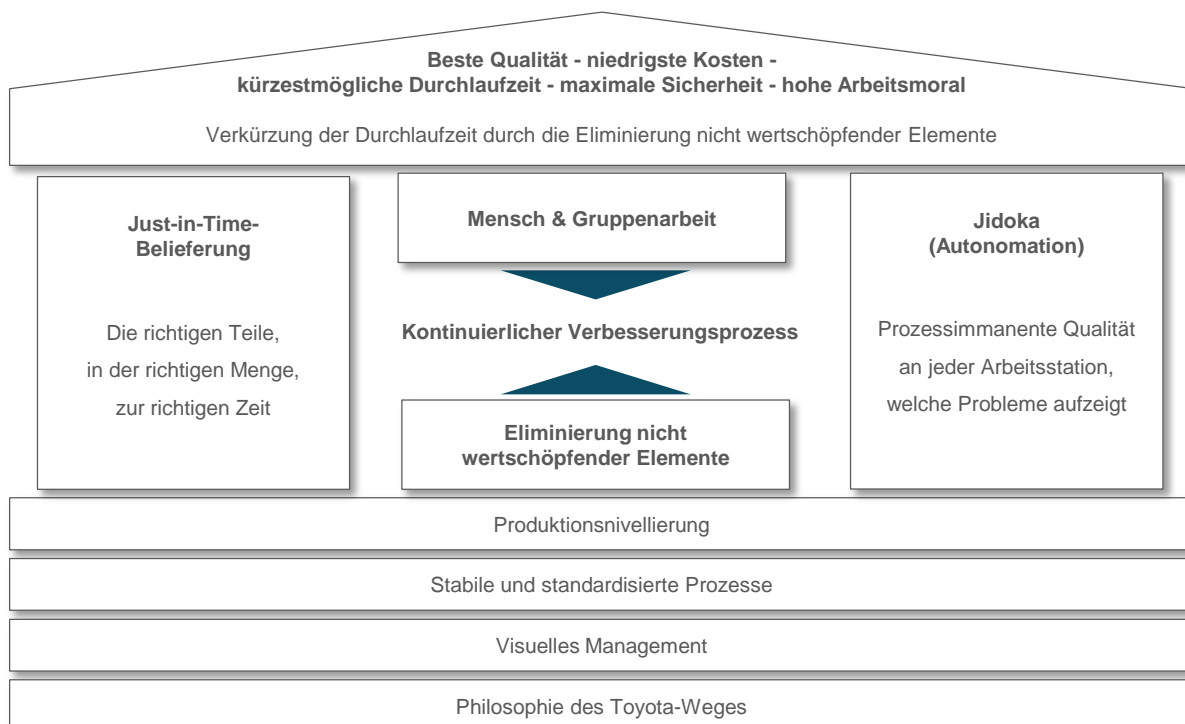


Abbildung 2-1: Das Toyota-Produktionssystem, dargestellt als Haus in Anlehnung an LIKER (2013, S. 65)

Der Begriff Lean Production

Im Kontext dieser Arbeit wird unter Lean Production der Einsatz von Methoden und Prinzipien des TPS verstanden, die auf eine Eliminierung der Verschwendung in der Produktion abzielen. WOMACK ET AL. (1990) spezifizieren die Vorteile einer nach den Lean-Production-Merkmalen organisierten Produktion folgendermaßen:

„[Lean Production] is ‚lean‘ because it uses less of everything compared with mass production – half the human effort in the factory, half the manufacturing space, half the investment in tools, half the engineering hours to develop a new product in half the time. Also, it requires keeping far less than half the needed inventory on site, results in many fewer defects, and produces a greater and ever growing variety of products.“ (WOMACK ET AL. 1990, S. 13)

Somit verfolgt Lean Production eine prozessorientierte Ausrichtung der Wertschöpfung (GROTH & KAMMEL 1994, S. 31) und strebt eine kontinuierliche Verbesserung der Produktionsabläufe durch die systematische und ganzheitliche Umsetzung von Lean-Prinzipien und -Methoden an. Die für die vorliegende Arbeit leitende Definition von Lean Production stellt die Begriffsbildung von SHAH UND WARD (2007) dar:

„Lean Production is an integrated socio-technical system¹ whose main objective is to eliminate waste by concurrently reducing or minimizing supplier, customer, and internal variability.“ (SHAH & WARD 2007, S. 791)

Synonym mit dem Lean-Production-Begriff werden im Kontext der Arbeit die Terminologien des schlanken oder des Ganzheitlichen Produktionssystems (GPS) verwendet.

Über seinen ursprünglichen Betrachtungsbereich der Fertigungs- und Montagegestaltung hinaus hat sich die Bedeutung der Lean-Philosophie auf zusätzliche Fachgebiete wie Lean-Hospital, Lean-Construction oder Lean-Start-up ausgedehnt (DOMBROWSKI & MIELKE 2015, S. 6 f.). Als eingehende Übersicht zu den Begriffsabgrenzungen und zur Übertragung von Lean Production auf weitere Bereiche und Branchen können exemplarisch die Veröffentlichungen von DOMBROWSKI UND MIELKE (2015, S. 256 ff.) oder von GRAF (1996, S. 5 ff.) dienen.

¹ Soziotechnisches System:

Die menschliche Arbeitstätigkeit findet in Arbeitssystemen statt, welche aus einem sozialen und technischen Teilsystem bestehen. Die Wechselwirkungen zwischen den sozialen und den technischen Komponenten des Arbeitssystems stehen bei soziotechnischen Systemen im Fokus. (ULICH 2013, S. 4)

2.1.2 Grundprinzipien von Lean Production

Im Laufe erster Implementierungsprojekte in unterschiedlichen Industriebereichen ist der Lean-Production-Ansatz oftmals als Rationalisierungsprojekt zur Reduzierung der Arbeitnehmer*innen fehlinterpretiert worden (DOMBROWSKI & MIELKE 2015, S. 19). Der daraus resultierende Vertrauensverlust der Belegschaft hat einen nachhaltigen Erfolg der Lean-Production-Implementierung zunächst verhindert. Erst nachdem Lean Production als ein ganzheitliches, auf die Befähigung der Mitarbeitenden ausgerichtetes Produktionssystem verstanden wurde, konnte die Lean-Production-Implementierung in produzierenden Unternehmen ihr Potenzial entfalten (KARLSSON & ÅHLSTRÖM 1996, S. 29 ff.).

Die Richtlinie VDI 2870-1 definiert ein Ganzheitliches Produktionssystem als ein „unternehmensspezifisches, methodisches Regelwerk zur umfassenden und durchgängigen Gestaltung der Unternehmensprozesse“. Darüber hinaus führt die Richtlinie Ansätze diverser Autor*innen zu einem einheitlichen Verständnis von Ganzheitlichen Produktionssystemen zusammen und spezifiziert dieses in Form der Unternehmensziele, Unternehmensprozesse, Grundprinzipien sowie Methoden und Werkzeuge (DOMBROWSKI & MIELKE 2015, S. 27). Durch die Beschreibung und Charakterisierung von acht Grundprinzipien sollen Methoden und Werkzeuge bei der Realisierung der Unternehmensziele unterstützen. Diese Prinzipien sind in Abbildung 2-2 dargestellt und werden im weiteren Verlauf des Textes beschrieben.

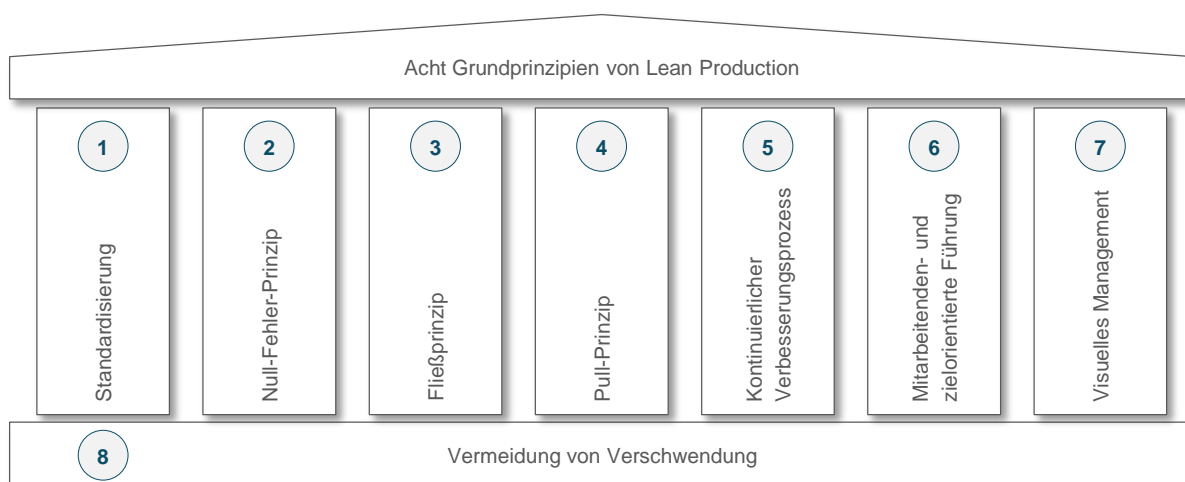


Abbildung 2-2: Die acht Lean-Grundprinzipien in Anlehnung an DOMBROWSKI UND MIELKE (2015, S. 29)

Standardisierung: Im Kontext von Lean Production ist die Standardisierung eine Beschreibung eines Ablaufs von Produktionsprozessen, der nach dem vorherrschenden Kenntnisstand die bestmögliche Ausführung der Arbeitsinhalte darstellt (REITZ 2009, S. 47). Das Prinzip sorgt für gleichbleibende, stabile Produktionsabläufe und bildet den Ausgangspunkt für kontinuierliche Verbesserungsprozesse (GÜNTNER ET AL. 2013, S. 14).

Null-Fehler-Prinzip: Das Null-Fehler-Prinzip ist eine Strategie zur Vermeidung fehlerhafter Kundenbelieferungen und zum kontinuierlichen Lernen aus aufgetretenen Fehlern durch schnelle und nachhaltige Problemlösungen (DOMBROWSKI & MIELKE 2015, S. 80 ff.). Dabei fokussiert sich das Prinzip auf die Maschinen- und Prozessfähigkeit, die Problemerkennung, die Problemlösung, die Gestaltung von Qualitätsprozessen sowie die Prozesskontrolle, um die Qualität zu steigern (VDI 2870-1, S. 13 f.).

Fließprinzip: Das Fließprinzip ist ein Gestaltungsprinzip zur Implementierung eines schnellen, durchgängigen und resilienten Material- und Informationsflusses über die gesamte Wertschöpfungskette (WOMACK & JONES 1996, S. 65 ff.). Es soll den unmittelbaren Transport der Bauteile zum nächsten Prozessschritt ohne Wartezeit ermöglichen. Das Ziel sind möglichst kleine, an den Kundenbedarf angepasste Losgrößen, um Bestände zu reduzieren und die Flexibilität zu erhöhen (DOMBROWSKI & MIELKE 2015, S. 96 ff.).

Pull-Prinzip: Das Pull-Prinzip ist ein dezentral geregeltes Produktionssteuerungsprinzip zur kundenorientierten Produktion, bei dem zwei Prozessschritte einen selbststeuernden Regelkreis bilden (GÜNTHER & TEMPELMEIER 2005, S. 336). Hierbei werden die Produktionsaufträge durch den nachgelagerten Kunden ausgelöst, um entsprechend dem Bedarf zu produzieren. Folglich werden die Bestände sowie die Durchlaufzeit reduziert und es wird eine höhere Effizienz bei gleichzeitiger Steigerung der Transparenz und Reduktion der Komplexität erreicht (DICKMANN 2015, S. 12 ff.).

Kontinuierlicher Verbesserungsprozess (KVP; jap. Kaizen): Der kontinuierliche Verbesserungsprozess ist ein Prinzip zur stetigen und nachhaltigen Verbesserung aller Unternehmensprozesse unter Einbeziehung der gesamten Belegschaft und mit geringem finanziellen Ressourceneinsatz (KRAUS ET AL. 2006, S. 33). Das Ziel ist es, eine Unternehmenskultur zu schaffen, bei der die Personen ihre persönlichen Arbeitsabläufe fortwährend reflektieren und durch einen strukturierten Verbesserungsprozess entsprechend dem Plan-Do-Check-Act-Zyklus (PDCA-Zyklus) optimieren (GÜNTHER ET AL. 2013, S. 13).

Mitarbeitenden- und zielorientierte Führung: Dieses Prinzip dient der Erschließung der Erfahrungen und des Wissens aller Personen im Unternehmen durch eine zielorientierte Führung (ŌNO 2008, S. 50). Das Prinzip fördert eine Kultur der Fehler- und Verschwendungsvermeidung sowohl auf der Führungs- als auch der Mitarbeitenebene (VDI 2870-1, S. 15). Dabei werden die Ziele der Mitarbeitenden strukturiert aus den übergeordneten Zielstellungen abgeleitet, sodass dezentrale, kohärente und kontinuierliche Verbesserungsaktivitäten möglich sind (DOMBROWSKI & MIELKE 2015, S. 129).

Visuelles Management: Das visuelle Management ist eine visuelle Darstellungsform von Prozessen, Zuständen und Entwicklungen mit dem Ziel, Transparenz für die

Mitarbeitenden zu generieren (WOMACK & JONES 1996, S. 395). Zudem erhöht dieses Prinzip die Mitarbeitendenmotivation zur Vermeidung von Verschwendung sowie zur Durchführung von kontinuierlichen Verbesserungsprozessen (LIKER 2013, S. 35 ff.).

Vermeidung von Verschwendung: Die Vermeidung von Verschwendung beschreibt die Eliminierung von nicht wertschöpfenden Tätigkeiten aller Unternehmensprozesse. Neben der bereits eingeführten Unterscheidung der Verschwendungstypologien Muda, Mura und Muri (ÖNO 2008, S. 19) definiert das TPS sieben Arten der Verschwendung (Teilaspekte von Muda), die die Grundlage jeglicher Verbesserungsinitiative von Prozessabläufen darstellen sollen und nachfolgend basierend auf ÖNO (2008, S. 44) und SHINGŌ (1989, S. 259) vorgestellt werden:

1. **Überproduktion:** Als Überproduktion wird die Herstellung von Gütern oder Zwischenprodukten bezeichnet, für die kein Kundenauftrag hinterlegt ist. Somit bindet diese Verschwendungsart Produktionsressourcen und erzeugt Bestände.
2. **Unnötige Wartezeit:** Die Wartezeit entsteht, wenn ein nachfolgender Bearbeitungsschritt beispielsweise aufgrund fehlender Bauteile, Informationen oder unzureichender Mitarbeitendenressourcen nicht gestartet werden kann. Durch die aus Sicht des Kunden nicht wertschöpfende Wartezeit erhöht sich die Durchlaufzeit.
3. **Unnötiger Transport:** Transportbedarfe resultieren aus der Weitergabe von Vor-, Zwischen- oder Endprodukten zwischen aufeinander folgenden Arbeitsstationen. Dabei gilt es, unnötige Transporte beispielsweise durch das Fließprinzip zu vermeiden.
4. **Überbearbeitung:** Die Verschwendungsart der Überbearbeitung beschreibt unnötige Prozessschritte, die durch die Verbesserung des Produkt- oder Prozessdesigns eliminiert oder reduziert werden können. Beispielsweise sind dies Arbeitsschritte, die die Qualitätsanforderungen des Kunden übersteigen.
5. **Unnötige Bestände:** Werden Bestände aufgrund von Überproduktion erzeugt, so hat dies eine unnötige Ressourcenbindung sowie einen zunehmenden Handhabungsaufwand bei Ein- und Auslagerungsprozessen zur Folge.
6. **Unnötige Bewegung:** Bewegungstätigkeiten der Mitarbeitenden, die keinen Mehrwert für Kunden erzielen, gilt es nach Möglichkeit zu vermeiden oder zu reduzieren. Zu dieser Art von Verschwendung zählen beispielsweise das Wechseln der Bearbeitungsstation, die Bereitstellung von Werkzeugen oder das Auffüllen von Beständen.
7. **Defekte:** Die Herstellung fehlerbehafteter Produkte und die zur Qualitätskontrolle und Nacharbeit anfallenden Kosten gilt es durch selbstregelnde Qualitätssicherungsmaßnahmen im Herstellungsprozess zu vermeiden.

Neben den vorgestellten Grundprinzipien des VDI 2870-1 existieren weitere Lean-Methoden und -Werkzeuge. Dabei können mehrere Werkzeuge einer Methode zugeordnet werden. Während eine Methode laut Definition als „bestimmte standardisierte Vorgehensweise, die einem Gestaltungsprinzip zugeordnet ist und zur Erreichung von Unternehmenszielen eingesetzt wird“ (VDI 2870-1, S.6) beschrieben wird, handelt es sich bei Werkzeugen um standardisierte, physisch vorhandene Mittel, die zur Umsetzung einzelner Methoden vonnöten sind. Die für diese Arbeit relevanten Lean-Elemente werden im weiteren Verlauf unter den Begriffen *Methode* oder *Lean-Element* subsumiert und sind in Abschnitt 5.1 spezifiziert.

2.2 Industrie 4.0

Basierend auf der Hightech-Strategie 2020 des deutschen Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) zur Weiterentwicklung des Produktionsstandorts Deutschland fand die vierte industrielle Revolution ihren Ausgangspunkt unter dem Begriff *Industrie 4.0* auf der Hannover-Messe im Jahr 2011 (LASI ET AL. 2014, S. 261, HUBER 2016, S. 1). Im Rahmen der vorgestellten Zukunftsinitiative sollen Unternehmen dazu befähigt werden, die Potenziale der Automatisierungs- und Informationstechnik zu verknüpfen (ROTH 2016, S. 5). Dabei charakterisiert sich Industrie 4.0 durch die fortwährende Bestrebung, das exponentielle Wachstum von Rechnerleistung, Datenübertragungsraten und Speicherkapazitäten innerhalb eines leistungsstarken, vernetzten, technologischen Systems für die Produktion nutzbar zu machen (SALKIN ET AL. 2018, S. 3, GEISBERGER & BROY 2012, S. 9, BAUERNHANSL ET AL. 2014, S. 9). Die angestrebten cyber-physischen Produktionssysteme (CPPS) zielen darauf ab, reale Objekte wie Maschinen, Produkte, Betriebsmittel oder Mitarbeitende durch das Internet der Dinge (IoT) zu vernetzen und in Echtzeit in digitale Prozesse einzubinden (BOSSE & ZINK 2019, S. 377, WEISSMANN & WEGERER 2019, S. 67). Durch eine automatisierte Informationsverarbeitung, Transparenz-erzeugung und systemübergreifende Prozessverknüpfung sollen in Unternehmen erhebliche Potenziale hinsichtlich Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerungen, Produkt- und Prozessqualität sowie innovativer Geschäftsmodelle gehoben werden (STEVEN 2019, S. 63, RÜßMANN ET AL. 2015, 1 f.).

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Begriffsdefinitionen und Grundlagen von Industrie 4.0 vorgestellt (siehe Abschnitt 2.2.1) und es wird auf die Haupttechnologiefelder von Industrie 4.0 eingegangen (siehe Abschnitt 2.2.2).

2.2.1 Begriffsdefinition und Grundlagen von Industrie 4.0

Der Betrachtungsfokus von Industrie 4.0 liegt gemäß KAGERMANN ET AL. (2013, S. 23) auf der Herstellung intelligenter Produkte (Smart Products) mithilfe innovativer und intelligenter Produktionsverfahren. Ein wichtiger Bestandteil ist die Vernetzung zwischen den Objekten mit einer intelligenten Fabrikumgebung (Smart Factory). Dieses Umfeld ist durch intelligente Prozesse (Smart Operations), Daten (Smart Data) und intelligente Systeme (Smart Systems) geprägt (HUBER 2016, S. 8, LICHTBLAU ET AL. 2015, S. 21). Für Industrie 4.0 existiert dabei eine Vielzahl an Begrifflichkeiten (HUBER 2016, 7 ff., ROTH 2016, S. 5). Im Folgenden sollen daher die Terminologien Industrie 4.0, Smart Factory und cyber-physische Produktionssysteme definiert und eingegrenzt werden.

Industrie 4.0

In der Literatur existieren verschiedene Definitionen zu Industrie 4.0. Entsprechend der Begriffsbestimmung nach BAUER ET AL. (2014) lässt sich Industrie 4.0 folgendermaßen spezifizieren:

„Im Mittelpunkt von Industrie 4.0 steht die echtzeitfähige, intelligente, horizontale und vertikale Vernetzung von Menschen, Maschinen, Objekten und IKT-Systemen [Informations- und Kommunikationstechnologien] zum dynamischen Management von komplexen Systemen.“ (BAUER ET AL. 2014, S. 18)

Ergänzend unterscheiden STEVEN UND KLÜNDER (2018, S. 203) zwei Ebenen von Industrie 4.0. Auf der organisationalen Ebene wird Industrie 4.0 durch eine vertikale und horizontale Integration der Unternehmen charakterisiert. In einer daraus resultierenden dezentral gesteuerten und autonomen Wertschöpfungskette wird unternehmensübergreifend eine individualisierte, nachhaltige, flexible und resiliente Produktion ermöglicht, sodass Zeit-, Kosten- und Qualitätsvorteile für Unternehmen erzielt werden können. Die organisationale Veränderung der Wertschöpfung wird dabei auf technologischer Ebene durch innovative Technologien beispielsweise der additiven Fertigung vorangetrieben. DOMBROWSKI ET AL. (2017, S. 1062) verzichten auf die Unterteilung in zwei Ebenen und definieren Industrie 4.0 als „die echtzeitfähige, intelligente und digitale Vernetzung von Menschen, Maschinen und Objekten für die Steuerung von Unternehmensprozessen und wertschöpfenden Netzwerken“.

Verschiedene Definitionen miteinbeziehend haben sich die drei Industrieverbände BITKOM, VDMA und ZVEI im Zuge des Projektes Plattform Industrie 4.0 auf nachfolgende Definition festgelegt. Die von BITKOM ET AL. (2015) festgehaltene Definition ist prägend für das Verständnis von Industrie 4.0 für die vorliegende Arbeit.

„Der Begriff Industrie 4.0 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 Produktes an den Endkunden bis hin zum Recycling, einschließlich der damit verbundenen Dienstleistungen [...].“
(BITKOM ET AL. 2015, S. 8)

Ausgehend von den Definitionen besitzt Industrie 4.0 drei übergeordnete Wesensmerkmale, die Einfluss auf die Prozesse eines Unternehmens ausüben (GILCHRIST 2016, S. 199, WANG ET AL. 2016, S. 5 f.). Sie bestehen aus dem End-to-End-Engineering sowie der vertikalen und der horizontalen Integration und werden nachstehend definiert:

- Vertikale Integration: Die vertikale Integration beschreibt die barrierefreie Verknüpfung unterschiedlicher hierarchischer IT-Systemebenen, beispielsweise der ERP-Systemebene (Enterprise Resource Planning), der PLM-Systemebene (Product-Lifecycle-Management) oder der MES-Ebene (Manufacturing Execution System), über geeignete Schnittstellen (WEYER ET AL. 2015, S. 581, SONY 2018, S. 419).
- Horizontale Integration: Die horizontale Integration beschreibt den Datenaustausch von Unternehmen innerhalb der Wertschöpfungskette, um die Zusammenarbeit zwischen den Unternehmen zu stärken (FOIDL & FELDERER 2016, S. 5).
- End-to-End-Engineering: Das End-to-End-Engineering ermöglicht durch den Einsatz geeigneter Software-Applikationen die Generierung kundenindividueller Produkte und Dienstleistungen (STOCK & SELIGER 2016 S. 537, WANG ET AL. 2016, S. 2).

Smart Factory

Wie eingangs aufgeführt, ist der Begriff *Smart Factory* eng mit Industrie 4.0 verknüpft. Im Zuge dieser Arbeit wird eine Smart Factory den Erkenntnissen von OSTERRIEDER ET AL. (2020) folgend als zentrales Element von Industrie 4.0 verstanden. Dabei lässt sich eine Smart Factory laut KAGERMANN ET AL. (2013) folgendermaßen definieren:

„[Ein] einzelnes oder [ein]Verbund von Unternehmen, das/der IKT zur Produktentwicklung, zum Engineering des Produktionssystems, zur Produktion, Logistik und Koordination der Schnittstellen zu den Kunden nutzt, um flexibler auf Anfragen reagieren zu können. Die Smart Factory beherrscht Komplexität, ist weniger stör anfällig und steigert die Effizienz in der Produktion. In der Smart Factory kommunizieren Menschen, Maschinen und Ressourcen selbstverständlich miteinander wie in einem sozialen Netzwerk.“ (KAGERMANN ET AL. 2013, S. 87)

Ergänzend zur aufgeführten Definition ist eine Smart Factory gemäß HUBER (2016, S. 8) durch eine wandlungsfähige Anpassung der Produktionskapazitäten, dezentrale Steuerungseinheiten, den effizienten Ressourceneinsatz sowie eine vertikale und horizontale Integration von Wertschöpfungsprozessen gekennzeichnet. Diese gilt es durch den Einsatz von Industrie-4.0-Technologien zu erreichen.

Cyber-physisches Produktionssystem

Neben der Definition und Eingrenzung der Begriffe Industrie 4.0 sowie Smart Factory soll abschließend die Terminologie eines cyber-physischen Produktionssystems näher spezifiziert werden. BAGHERI ET AL. (2015, 1622 f.) folgend ist ein CPPS in die Produktionslandschaft eingebettet und übernimmt die Koordination zwischen realen Infrastrukturobjekten und integrierten IT-Systemen. Hierzu verweisen LEE ET AL. (2015, S. 19) auf zwei zentrale funktionale Anforderungen, denen jedes CPPS gerecht werden soll:

1. Die Systemstruktur sollte einen hohen Vernetzungsgrad sowie die Echtzeitfähigkeit und Möglichkeit zu Informationsrückmeldungen der digitalen Systeme sicherstellen.
2. Die physische Infrastruktur sollte durch eine intelligente, leistungsfähige Datenverarbeitung unterstützt werden, die die Fähigkeit zur Entscheidungsfindung besitzt.

Gemäß LEE (2008) ist ein cyber-physisches Produktionssystem wie folgt definiert:

„[...] Integration von softwarebasierter Rechenleistung mit physischen Prozessen. Eingebettete IT- und Netzwerksysteme überwachen und steuern die physische Prozessgestaltung mittels Rückkopplungsschleifen, bei denen physische Prozesse die Berechnungen beeinflussen und umgekehrt.“ (LEE 2008, S. 1)

Ergänzend zu LEE (2008, S. 1) publizierten die Autoren KAGERMANN ET AL. (2013) nachfolgende Definition, die das Verständnis des weiteren Verlaufs dieser Arbeit prägt.

„[Cyber-physische Produktionssysteme umfassen] eingebettete Systeme, Produktions-, Logistik-, Engineering-, Koordinations- und Managementprozesse sowie Internetdienste, die mittels Sensoren unmittelbar physikalische Daten erfassen und mittels Aktoren auf physikalische Vorgänge einwirken, mittels digitaler Netze untereinander verbunden sind, weltweit verfügbare Daten und Dienste nutzen und über multimodale Mensch-Maschine-Schnittstellen verfügen.“ (KAGERMANN ET AL. 2013, S. 84)

Basierend auf den für die vorliegende Arbeit leitenden Begriffsdefinitionen und Wesensmerkmalen von Industrie 4.0, Smart Factory und cyber-physischen Produktionssystemen werden im nachfolgenden Abschnitt die übergeordneten Haupttechnologiefelder von Industrie 4.0 vorgestellt.

2.2.2 Technologiefelder von Industrie 4.0

Für eine erfolgreiche digitale Industrie-4.0-Transformation ist den Autor*innen BARTODZIEJ (2017, S. 35) und HORVAT ET AL. (2018, S. 421) folgend die Weiterentwicklung der Produktionsstrukturen hin zu einem offenen Ökosystem notwendig, das die Vernetzung verschiedener Technologiefelder erlaubt. SALKIN ET AL. (2018, 7 ff.) und RÜBMANN ET AL. (2015, S. 3) listen dazu neun zentrale Technologiefelder auf, die im Verbund eine Industrie-4.0-Transformation ermöglichen. Nach RÜBMANN ET AL. (2015, S. 3) bestehen die Technologiefelder aus autonomen Robotern, der Simulation, der horizontalen und vertikalen Integration, der Cyber-Security, der Cloud-Nutzung, dem Internet der Dinge, der additiven Fertigung, Big Data und Analytics sowie Augmented Reality (AR). In der nachfolgenden Abbildung 2-3 wird Augmented Reality in das Technologiefeld der Assistenzsysteme gruppiert, da es diesem als Einzeltechnologie zuordenbar ist (QUANDT ET AL. 2019, S. 921). LICHTBLAU ET AL. (2015, S. 21 f.) nennen vergleichbare Grundbausteine an Technologiefeldern und strukturieren diese in drei übergeordnete Bereiche. Dieser Systematisierung folgend und mit Verweis auf die durchgeführte Strukturierung der Industrie-4.0-Technologien in Abschnitt 5.1 werden die Technologiefelder den Bereichen Smart Data, Smart Systems und Smart Operations zugeteilt (siehe Abbildung 2-3).

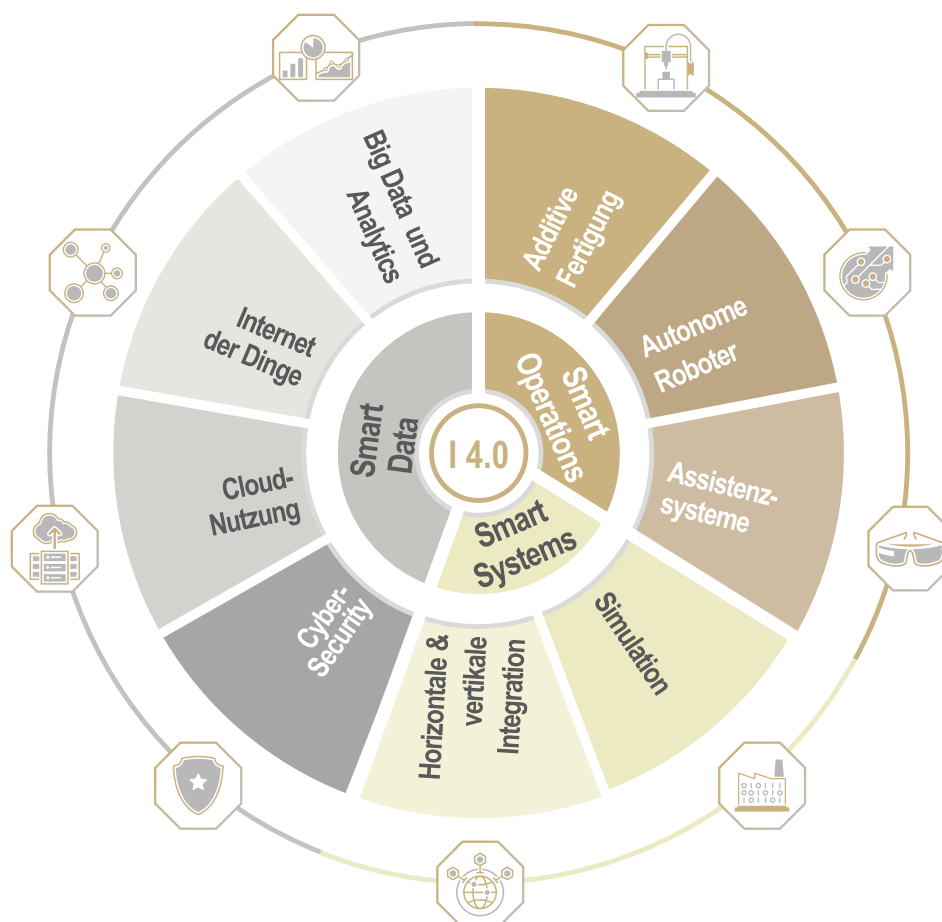


Abbildung 2-3: Übersicht der Industrie-4.0-Technologiefelder in Anlehnung an RÜBMANN ET AL. (2015, S. 3)

Big Data und Analytics: Das Big-Data- und Analytics-Technologiefeld dient dazu, die anwachsende Menge an Produktionsdaten, die durch verschiedene Quellen wie den Maschinenpark, die Prozesssensoren oder die Prozesssteuerung generiert werden, in Echtzeit verarbeiten zu können (RÜßMANN ET AL. 2015, S. 2, BLANCHET ET AL. 2014, 8 f.). Charakterisiert wird Big Data durch die nachstehend aufgeführten vier Vs:

1. Volume: bezieht sich auf die großen Datenmengen
2. Variety: bezieht sich auf die Vielfalt der Daten
3. Velocity: bezieht sich auf die Geschwindigkeit der Datenerzeugung
4. Veracity: bezieht sich auf die Unsicherheit der Daten und Datenqualität

In Kombination mit Analytics-Verfahren und den daraus abgeleiteten Erkenntnissen soll Big Data zu Wettbewerbsvorteilen führen (BITKOM 2014, WITKOWSKI 2017, S. 768, CENGİZ ET AL. 2021, S. 74 f.). Dazu werden aus den Daten durch tiefgehende Analysen Informationen gewonnen. Anwendung finden beispielsweise Deep-Learning- oder Machine-Learning-Ansätze, um Zusammenhänge aus den komplexen Datensätzen und -strukturen abzuleiten und Rückschlüsse auf zukünftiges Verhalten zu ziehen (PISTORIUS 2020, S. 28).

Assistenzsysteme: Als Assistenzsysteme werden Systeme bezeichnet, die Mitarbeitende bei der Ausführung von Arbeitsschritten unterstützen. Die Unterstützung erfolgt sowohl auf kognitiver Ebene im Bereich der Wahrnehmung oder Entscheidung als auch auf physischer Ebene (REINHART 2017, S. 57). Assistenzsysteme nehmen aufgrund der steigenden Komplexität von Produktionstätigkeiten eine tragende Rolle in der Produktion ein (BARIG & BALZEREIT 2019). Die operativ Mitarbeitenden können beispielsweise bei der Kommissionierung durch tragbare Elektroniklösungen oder in der Produktion durch personenindividuelle Arbeitsanweisungen bzw. über kollaborative Robotersysteme unterstützt werden (HUBER 2016, 78 ff.). Die kollaborativen Roboter sollen die Mitarbeitenden bei der Ausführung von physischen Routinetätigkeiten entlasten und künftig steuernde und überwachende Tätigkeiten übernehmen. Das Ziel der Mensch-Maschine-Interaktion ist eine bedarfsgerechte Steuerung oder Konfiguration beispielsweise eines Robotersystems (BAUERNHANSL ET AL. 2014, S. 451 ff.). Die mobilen Elektroniklösungen zielen im Verbund mit Lösungen der künstlichen Intelligenz (KI) auf eine Verbesserung der Entscheidungsqualität der Mitarbeitenden durch einen echtzeitfähigen und ortsunabhängigen Zugriff auf Informationen und Applikationen ab (MASAK 2009, S. 115, HARWARDT ET AL. 2020, S. 341).

Autonome Roboter: Während Roboter in der Fertigung bereits komplexe, repetitive oder für Mitarbeitende gefährliche Aufgaben übernehmen, werden sie künftig auch untereinander sowie mit ihrem Umfeld und dem Menschen interagieren (RÜßMANN ET AL. 2015, S. 2). Einzelne Roboterzellen werden folglich dazu befähigt, Aufgabenschritte autonom zu planen, indem sie mit einem virtuellen Abbild des Produktes verbunden werden, das alle

notwendigen Informationen zur Verfügung stellt (MICHNIEWICZ & REINHART 2016, S. 175). KAMARUL BAHRI ET AL. (2016, S. 138) erwarten, dass autonome Roboter die anfallenden Aufgaben im Vergleich zum Menschen präziser und intelligenter erledigen und dabei Flexibilität, Sicherheit, Vielseitigkeit und kollaboratives Arbeiten gewährleisten.

Simulation: Durch die virtuelle Abbildung existenter Vorgänge ermöglichen Simulationsmodelle, vielfältige Systemeinflussgrößen und komplexe Sachverhalte vor der realen Anwendung zu erproben, zu analysieren und in Echtzeit zu überwachen (RESCHKE 2016, S. 84). Beispielsweise lassen sich Maschineneinstellungen vor einem Werkzeugwechsel auf diese Weise validieren und dadurch kann unnötigen Maschinenstillstandszeiten vorgebeugt werden (RÜßMANN ET AL. 2015, S. 3). Weiterhin ergeben sich Anwendungsoptionen in der präventiven Erprobung von Prozessen zur Analyse der Prozessrobustheit oder potenzieller Verbesserungsmöglichkeiten (TIDEMAN ET AL. 2008, S. 196 ff.). So können Hersteller Stillstands- und Änderungszeiten verringern und gleichzeitig die Produktionsqualität steigern (RÜßMANN ET AL. 2015, S. 3, SIMONS ET AL. 2017, S. 83). KUHN (2017, S. 441) und PISTORIUS (2020, S. 41) führen als weitere Vorteile kürzere Entwicklungszeiten neuer Produkte, eine erhöhte Transparenz oder die Möglichkeit der Verbesserung von Produktionsstrukturen auf.

Horizontale und vertikale Integration: Als zentrales Wesensmerkmal bei der Einführung von Industrie 4.0 gilt, wie in Abschnitt 2.1.1 aufgeführt, die horizontale und vertikale Integration des Produktionsnetzwerks (WANG ET AL. 2016, S. 6). Die vertikale Integration koppelt hierarchische Systemebenen wie das ERP-System, das PLM-System oder das MES über geeignete Schnittstellen barrierefrei miteinander, sodass ein ungehinderter Datenfluss über die Ebenen möglich wird (HUBER 2016, S. 73 f.). Bei der horizontalen Integration steht die Verbindung unterschiedlicher IT-Systeme über diverse Geschäftsprozesse entlang der gesamten Wertschöpfungskette im Vordergrund (SONY 2018, S. 419, WANG ET AL. 2016, S. 6). Durch die unternehmensübergreifende Vernetzung entsteht eine resiliente Wertschöpfungskette, die sich durch ein herstellerübergreifendes, flexibles Entwicklungs- und Produktionsnetzwerk auszeichnet (PISTORIUS 2020, S. 11, RÜßMANN ET AL. 2015, S. 3, SIEPMANN & GRAEF 2016, S. 38).

Internet der Dinge: GIUSTO ET AL. (2010, S. V) beschreiben das IoT als „[...] eine Vielzahl von ‚Dingen‘ oder ‚Objekten‘, wie z. B. Radio-Frequency-Identification (RFID), Sensoren, Aktoren, Mobiltelefone, die durch einzigartige Adressierungsschemata in der Lage sind, miteinander zu interagieren und mit ihren benachbarten ‚intelligenten‘ Komponenten zusammenzuarbeiten, um gemeinsame Ziele zu erreichen“. Das Internet der Dinge im industriellen Kontext wird als industrielles Internet der Dinge (IIoT) bezeichnet. PISTORIUS (2020, S. 9) und KAGERMANN ET AL. (2013, S. 85) verstehen unter IIoT die Verknüpfung von

physischen Objekten mit der virtuellen Welt. Das beliebig erweiterbare IIoT bietet die Möglichkeit, reale Gegenstände und Akteure in das universale digitale Netzwerk zu integrieren (STEVEN 2019, S. 77). Alle über das IIoT kommunizierenden Objekte sind in der Lage, selbstständig mit anderen Teilnehmenden zu interagieren und somit eine leistungsfähige und intelligente Prozesssteuerung zu ermöglichen (RÜßMANN ET AL. 2015, S. 4).

Cyber-Security: Simultan zur Steigerung der Konnektivität und zur Erhöhung des Kommunikationsvolumens im Verlaufe der Implementierung von Industrie-4.0-Technologien in Unternehmen steigt die Bedrohung durch Cyber-Angriffe. Dies erfordert einen zunehmenden Schutz von Produktionslinien und kritischen Industriesystemen (RÜßMANN ET AL. 2015, S. 4). Unternehmen tragen dieser steigenden Gefahr durch zuverlässige Kommunikationskanäle, ein präventives Management der Zugangsdaten, die Sicherung von Soft- und Hardwaresystemen, Block-Chain-Ansätze oder den Datenschutz Rechnung (PISTORIUS 2020, S. 69). Gemäß HUBER (2016, S. 65 f.) sollten hierbei produktionstechnische Softwaresysteme, (Entwicklungs-)Daten, Cloud-Nutzungen und mobile Lösungen besonders sorgsam und umfassend geschützt werden.

Cloud-Nutzung: Die Autoren MELL UND GRANCE (2011, S. 2) identifizieren die Cloud-Nutzung als grundlegende Technologie für die erfolgreiche und nachhaltige Implementierung von Industrie 4.0. Dieses Haupttechnologiefeld ermöglicht es, die Computersysteme zu vernetzen und Rechenkapazitäten bedarfsgerecht über einen externen Server zur Verfügung zu stellen (LANDHERR ET AL. 2016, S. 28). Im Kontext der Cloud-Technologie wird zwischen den Modellen der Infrastructure as a Service, der Platform as a Service sowie der Software as a Service unterschieden (BAUERNHANSL ET AL. 2014, S. 587, STRADI-GRANADOS 2020, S. 1). Die Unternehmen profitieren bei jedem der Modelle von skalierbaren externen IT-Leistungen, die ressourceneffiziente Produktionsvorgänge sicherstellen (SALKIN ET AL. 2018, S. 9, THAMES & SCHAEFER 2017, S. 9 ff.). Insbesondere die Möglichkeit, Daten von Produkten und Werkzeugmaschinen zentral und echtzeitfähig in einer Cloud auszuwerten und zu speichern und so eine orts-, zeit- und geräteunabhängige Datenverfügbarkeit zu ermöglichen, ist für Unternehmen ein entscheidender Vorteil (RÜßMANN ET AL. 2015, S. 4, BAUERNHANSL ET AL. 2014, S. 402).

Additive Fertigung: Gemäß HUBER (2016, S. 33) ist die additive Fertigung „die Erzeugung eines Bauteils über das schichtweise Hinzufügen des Werkstoffes im Gegensatz zu klassischen subtraktiven Verfahren (Bohren, Fräsen, Drehen ...)“. Somit automatisieren diese Fertigungsverfahren das Schichtbauprinzip und generieren in nacheinander aufgetragenen Einzelschichten die gewünschte dreidimensionale Endgeometrie (SALKIN ET AL. 2018, S. 8 f., GEBHARDT 2016, S. 2). Diese Verfahren ermöglichen folglich die Herstellung geometrisch komplexer und funktionsoptimierter Bauteile (GIBSON ET AL. 2021, S. V). Da additive

Fertigungsverfahren dreidimensionale CAD-Daten automatisiert in ein physisches Bauteil transferieren, treten laut FASTERMANN (2016, S. 1 ff.) Personen zugleich als Entwickler und Hersteller auf, womit sich die Produktentwicklungszeiten von Musterteilen verkürzen (GEBHARDT 2016, S. 3 ff.).

Den neun Industrie-4.0-Technologiefeldern können weitere Technologien zugeordnet werden. Diese werden im Rahmen dieser Arbeit in Lösungsbaustein 1 in Abschnitt 5.1 ausgewählt, strukturiert und spezifiziert.

2.3 Lean 4.0

In den beiden vorangegangenen Abschnitten wurde der zugrunde liegende wissenschaftstheoretische Referenzrahmen für Lean Production (siehe Abschnitt 2.1) und Industrie 4.0 (siehe Abschnitt 2.2) vermittelt. Die Kombination beider Paradigmen wird durch den Begriff Lean 4.0 geprägt (MAYR ET AL. 2018, S. 622). Im Folgenden soll die Wirkbeziehung von Lean Production und Industrie 4.0 betrachtet werden. Dazu wird zunächst in Abschnitt 2.3.1 der Begriff Lean 4.0 definiert und es werden die Grundlagen vermittelt, um darauf aufbauend in Abschnitt 2.3.2 die Wechselwirkungen von Lean Production und Industrie 4.0 anhand der Erkenntnisse aus der Wissenschaft aufzuzeigen.

2.3.1 Begriffsdefinition und Grundlagen von Lean 4.0

Die Einführung von Lean Production und Industrie 4.0 im wechselseitigen Verbund wird in der Wissenschaft gemäß MAYR ET AL. (2018, S. 623) als „Lean 4.0“, „Smart-Lean-Manufacturing“ oder „Lean-Industry-4.0“ bezeichnet. Diese Begriffe stehen für ein intelligentes und gleichermaßen schlankes Produktionssystem, das durch die Kombination von Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien entsteht (METTERNICH ET AL. 2018, S. 11, RAMADAN & SALAH 2019, S. 175). Durch die Wechselwirkungen beider Paradigmen ergeben sich KÜPPER ET AL. (2017, S. 10) zufolge signifikante Kosteneinsparpotenziale für Unternehmen, hervorgerufen durch eine holistische Lean-4.0-Transformation. Analog dazu zeigt eine Studie des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung, dass sich mit steigender Lean-4.0-Orientierung der Unternehmen auch die betriebliche Performance, gemessen an der Wertschöpfung je Mitarbeitenden, erhöht (LERCH ET AL. 2021, S. 10).

Nach DOMBROWSKI UND MIELKE (2015, S. 3) sind Produktionssysteme nicht allein auf technische Fertigungsmittel zu reduzieren, sondern bestehen aus den Wirkbeziehungen von Technik, Organisation und Mensch in der Produktion. Dabei nehmen Transformationsprozesse Einfluss auf funktionale, organisationale sowie technologische Aspekte des

Produktionssystems (ALTER 2003, S. 368). Eine Vernachlässigung einer dieser Dimensionen oder ihrer Schnittstellen kann zum Scheitern des Transformationsprozesses führen (VEILE ET AL. 2020, S. 979). Die Implementierung von Lean 4.0 in der Produktion stellt dabei einen ganzheitlichen Änderungsprozess im Unternehmen dar und betrifft gemäß RITTBERGER UND SCHNEIDER (2018, S. 1) alle Dimensionen eines Produktionssystems, den Menschen, die Technik und die Organisation (REINHART 2017, S. 54 ff.). Die nachstehende Abbildung 2-4 zeigt das Mensch-Technik-Organisation-Modell (MTO-Modell), verbindet dessen Elemente mit den Ansätzen von Lean Production und Industrie 4.0 und verdeutlicht deren Potenziale.

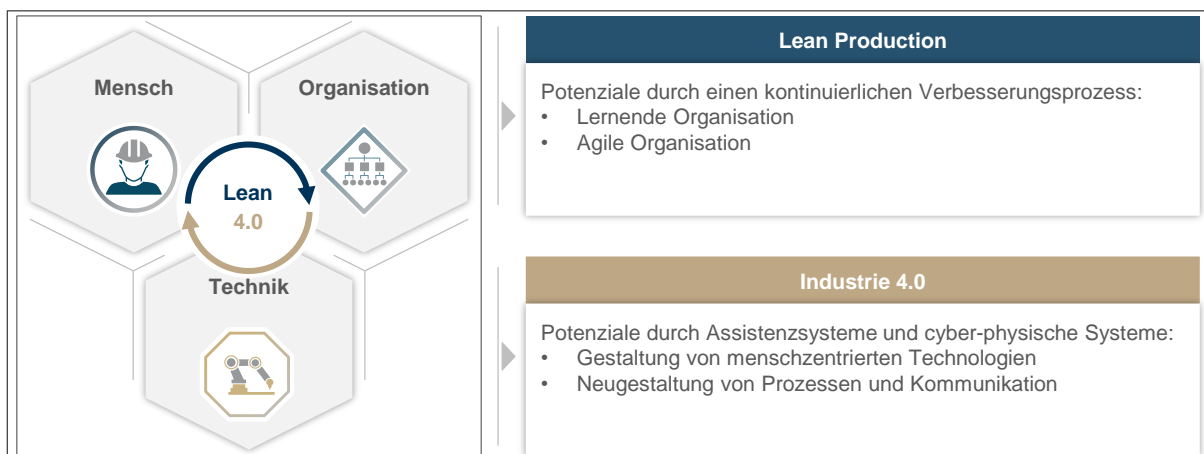


Abbildung 2-4: Lean 4.0 im MTO-Modell in Anlehnung an RITTBERGER UND SCHNEIDER (2018, S. 1)

Die in Abbildung 2-4 dargestellte Einteilung der zwei Produktionsparadigmen gemäß dem MTO-Modell weist auf deren positive Korrelation hin. So handelt es sich bei Lean Production um einen mehrheitlich menschen- und organisationszentrierten Ansatz, der durch eine Kultur der kontinuierlichen Verbesserung sowie eine wertschöpfungsorientierte, unternehmensübergreifende Prozessausrichtung geprägt ist (LIKER 1998 S. IX). Industrie 4.0 hingegen adressiert primär technologische Handlungsfelder (siehe Abschnitt 2.2). Erst die Verschränkung beider Paradigmen ermöglicht die Berücksichtigung aller Dimensionen des MTO-Modells und somit eine ganzheitliche Verbesserung.

Im Rahmen dieser Arbeit wird Lean 4.0 als synergetische Kombination der beiden komplementär wirkenden Produktionsparadigmen Lean Production und Industrie 4.0 verstanden, bei denen eine weitgehende Zielkongruenz vorherrscht. Diese basiert auf den gemeinsamen Zielen der Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerung (FRANK 2014, S. 17 ff.). Auch RÖBLER UND HASCHEMI (2017, S. 702) identifizieren acht gemeinsame Werttreiber, die mithilfe unterschiedlicher, komplementär wirkender Handlungsfelder adressiert werden. Um die Wirkverknüpfungen beider Produktionsparadigmen zu vergleichen, werden in nachfolgender Abbildung 2-5 deren Merkmale und Merkmalsausprägungen

basierend auf den Arbeiten von METTERNICH ET AL. (2017) sowie BUSCHER UND BÖGER (2017) aufgeführt und gegenübergestellt.













	Lean Production	Industrie 4.0
 Ansatz nach MTO-Modell	Ganzheitlich Fokus: Mensch und Organisation	Ganzheitlich Fokus: Technologie
 Philosophie	Respekt, Problemlösung, Mitarbeitendenentwicklung	Machbarkeit, (Selbst-)Optimierung
 Fundament	Stabilität, Standardisierung	Vernetzung, Adaptivität
 Steuerungsprinzip	Dezentral (Fließprinzip, Kanban)	Dezentral, dynamisch, situationsabhängig
 Verbesserungsprinzip	Reaktiv im Tagesgeschäft durch Mitarbeitende	Selbstopтимierung, Prädiktion
 Informationsbeschaffung	Aktueller Ort, aktuelles Material („gemba gembutsu“)	Situationsabhängige Datenaufbereitung, Echtzeitfähigkeit
 Einfluss auf Zielgröße Qualität	Eigenverantwortliche Prozess- kontrolle, Null-Fehler-Zielsetzung	Qualitätsdaten in Echtzeit, Null-Fehler-Zielsetzung
 Einfluss auf Zielgröße Zeit	Transparenz, Reduktion der Durchlaufzeit	Parallelisierung und beschleunigte Entscheidungsfindung
 Einfluss auf Zielgröße Kosten	Vermeidung von Verschwendung, Integration der Wertschöpfungskette	Neue Erlöspotenziale, skalierbare Automatisierungskosten
 Einfluss auf Zielgröße Flexibilität	Reduktion von Beständen und Bildung kleiner Losgrößen	Vernetzung, Datenaustausch und Datenanalyse
 Einfluss auf Zielgröße soziale Nachhaltigkeit	Respekt vor dem Menschen und Mitarbeitendenentwicklung	Befähigung der Mitarbeitenden durch Technologien
 Einfluss auf Zielgröße ökologische Nachhaltigkeit	Reduktion von Beständen und der Losgrößen	Reduktion des Ressourcenverbrauchs durch Produktivität

Abbildung 2-5: Gegenüberstellung der Grundmerkmale von Lean Production und Industrie 4.0 in Anlehnung an METTERNICH ET AL. (2017) sowie BUSCHER UND BÖGER (2017)

Als Merkmale werden in obiger Abbildung der Ansatz der Produktionsdomänen basierend auf dem MTO-Modell, die Philosophie, das Fundament, die Steuerungs- und Verbesserungsprinzipien, die Art der Informationsbeschaffung sowie der Einfluss von Lean Production und Industrie 4.0 auf ausgewählte Zielgrößen miteinander verglichen (die Grundlagen sind in Abschnitt 2.4 vermittelt). Die konkreten Merkmalsausprägungen ergeben sich aus den unter Abschnitt 2.1 und 2.2 aufgeführten Wesensmerkmalen beider Domänen sowie aus den Erkenntnissen von METTERNICH ET AL. (2017) sowie BUSCHER UND BÖGER (2017). Dabei stimmen Lean Production und Industrie 4.0 in ihren Wesensmerkmalen weitgehend überein, wie der Vergleich der Steuerungsprinzipien oder der Einflüsse auf die Zielgrößen verdeutlicht. Lediglich das zugrunde liegende Fundament beider Ansätze unterscheidet sich, was zu einer ganzheitlichen Sichtweise von Lean 4.0 führt.

2.3.2 Wechselwirkungen zwischen Lean Production und Industrie 4.0

Da es sich bei Lean 4.0 um einen jungen Forschungsbereich handelt, existieren in der Fachliteratur vier verschiedene Perspektiven zu den gegenseitigen Wirkbeziehungen beider Domänen (MAYR ET AL. 2018, S. 623). Diese sollen im folgenden Abschnitt auf Basis von 40 wissenschaftlichen Fachbeiträgen (siehe Anhang A) dargelegt und beschrieben werden.

Lean Production als Wegbereiter für Industrie 4.0: In einem Teil der wissenschaftlichen Publikationen wird Lean Production als Wegbereiter für Industrie 4.0 eingeordnet. So kann Lean Production als bestimmender Ansatz die Grundvoraussetzung einer effizienten und verschwendungsfreien Prozessgestaltung sicherstellen, um darauf basierend Industrie-4.0-Technologien zu implementieren (BUER ET AL. 2018, S. 12 f., LEIRAS ET AL. 2019, S. 783). METTERNICH ET AL. (2017, S. 348) führen an, dass die Erfahrung aus einer Vielzahl von Digitalisierungsprojekten von produzierenden Unternehmen zeigt, dass Industrie 4.0 nicht ohne vorherige Sicherstellung stabiler Prozesse, unternehmensweiter Standards und grundlegender Kenngrößen im Sinne von Lean Production umgesetzt werden kann. BICK (2014, S. 46) ergänzt, dass zwar ineffiziente Arbeitsabläufe ebenfalls digitalisierbar sind, dass diese aber weiterhin von Ineffizienzen geprägt sein werden. Dadurch bleiben vorhandene Produktivitätspotenziale ungenutzt und die Kosten für die Einführung von Industrie-4.0-Technologien steigen. Eine erfolgreiche Industrie-4.0-Implementierung setzt nach BICK (2014, S. 46) eine umfassende Etablierung des Lean-Ansatzes voraus, was zu einer wirtschaftlichen und nachhaltigen Einführung der Technologien führt (HUBER 2016, S. 12 f.).

Industrie 4.0 als ein Treiber für Lean Production: Neben der obigen Sichtweise teilt eine Vielzahl an wissenschaftlichen Beiträgen die Ansicht, dass Industrie 4.0 ein Treiber für Lean Production ist. Insbesondere die durch Industrie 4.0 gesteigerte Transparenz und der Zugang zu echtzeitfähigen Daten könnten Auswirkungen auf die Effizienz und Effektivität von Lean-Production-Methoden haben (MAGINNIS ET AL. 2019, S. 339). Die Basis dieser Sichtweise besteht in der Verschränkung beider Produktionsparadigmen und hebt die technische Erweiterung von beispielsweise Just-in-Time, Kanban oder Total Productive Maintenance (TPM) hervor (MAYR ET AL. 2018, S. 623, VALAMEDE & AKKARI 2020, S. 856). Folglich ist davon auszugehen, dass eine systematische Implementierung von Industrie-4.0-Technologien die Lean-Production-Potenziale weiter stärkt (SANDERS ET AL. 2016, S. 827), da die bislang fehlende Aktualisierung von Informationen analoger Lean-Production-Planungsansätze wie der Wertstromanalyse durch Industrie-4.0-Technologien beseitigt wird (FRANK 2014, S. 18, METTERNICH ET AL. 2017, S. 347). Somit kann die Flexibilität eines schlanken Produktionssystems gesteigert und im Sinne der horizontalen Integration auf Marktschwankungen unmittelbar reagiert werden (MAYR ET AL. 2018, S. 623, RÜTTIMANN & STÖCKLI 2016, S. 499).

Lean Production und Industrie 4.0 als gegenseitige Treiber: Die Kombination der beiden zuvor aufgeführten Perspektiven repräsentiert die Mehrzahl der in den untersuchten wissenschaftlichen Beiträgen vorzufindenden Ansichten (siehe Anhang A). Demzufolge agieren Lean Production und Industrie 4.0 als gegenseitige Treiber, wobei positive Korrelationen zwischen den Methoden und Technologien beider Domänen vorliegen (MAYR ET AL. 2018, S. 623). Lean Production und Industrie 4.0 können somit parallel existieren und sich gegenseitig unterstützen (MRUGALSKA & WYRWICKA 2017, S. 471). Gemäß DAVIES ET AL. (2017, S. 1293 f.) ist Lean Production eine Grundlage und Vermittlungsbasis für die digitale Transformation und Industrie 4.0 eine notwendige technologische Unterstützung der schlanken Produktion. Eine gleichzeitige und aufeinander abgestimmte Implementierung von Lean-Production-Methoden mit Industrie-4.0-Technologien hat laut SANDERS ET AL. (2016, S. 827) vorteilhafte Auswirkungen auf die Produktionsprozesse. Die Studienergebnisse von TORTORELLA UND FETTERMANN (2018, S. 2984) bekräftigen diese Aussage und zeigen signifikante Leistungssteigerungen bei produzierenden Unternehmen auf, die eine simultane Umsetzung beider Produktionsdomänen verfolgen. Nach METTERNICH ET AL. (2017, S. 348) sollte allerdings die zeitgleiche Implementierung von Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien detailliert und systemisch aufeinander abgestimmt sein, um Synergiepotenziale sicherzustellen.

Lean Production und Industrie 4.0 im Widerspruch: Neben den vorangegangenen Autor*innenmeinungen existiert ebenfalls die Ansicht, dass der Lean-Production- und der Industrie-4.0-Ansatz zueinander im Widerspruch stehen könnten. Diesbezüglich führen METTERNICH ET AL. (2017, S. 347 f.) aus, dass stabile, standardisierte und schlanke Prozesse bei der Einführung von modernen Technologien durch komplexe selbststeuernde Systeme ersetzt werden könnten. Ein Indiz für den Konflikt zwischen Lean Production und Industrie 4.0 liefert MEIER (2017, S. 131) und sieht diesen in den unterschiedlichen Ansätzen gemäß dem MTO-Modell der beiden Domänen (siehe Abbildung 2-5).

Für eine unabhängige Koexistenz beider Paradigmen konnten keine Fachbeiträge identifiziert werden. Da es sich bei Lean 4.0 um einen jungen Forschungsbereich handelt und die Interdependenzen der Lean-Methoden und der Industrie-4.0-Technologien bislang nicht umfassend analysiert wurden, existiert keine einheitlich anerkannte Sichtweise auf das Zusammenwirken beider Domänen (EJSMONT ET AL. 2020, S. 21). Allerdings wird in der Mehrzahl der untersuchten Beiträge die Meinung vertreten, dass Lean Production und Industrie 4.0 komplementäre Ansätze sind, die durch eine systematische Verschränkung signifikante Synergiepotenziale bergen (siehe Anhang A). Diese Ansicht prägt die Zielsetzung und Motivation der vorliegenden Arbeit und soll im Zuge der Interdependenzanalysen tiefgehend erforscht werden (siehe Kapitel 5).

2.4 Produktionsrelevante Zielgrößen

In diesem Unterkapitel werden die für die vorliegende Arbeit notwendigen Grundlagen zu produktionsrelevanten Zielgrößen vermittelt. Den Autor*innen DOMBROWSKI ET AL. (2018, S. 108) und GOTTMANN (2019, S. 25) folgend, sollen Lean-Production- und Industrie-4.0-Verbesserungsprojekte stets einen Beitrag zur Erreichung der Unternehmensziele leisten. Ausgehend von der Vision eines Unternehmens können die strategischen Unternehmensziele festgelegt und daraus entsprechende Leistungsmaßnahmen abgeleitet werden (BITITCI ET AL. 1997, S. 524). Dies erfordert ein grundlegendes Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Unternehmenszielen und den operativen Entscheidungen (MICHAELI 2017, S. 25). Um die Auswirkung der Implementierung von Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien in der Produktion erfassen zu können, werden in diesem Abschnitt die Begriffe und Grundlagen ausgewählter produktionsrelevanter Zielgrößen vorgestellt.

2.4.1 Begriffsdefinition und Grundlagen von Zielgrößen

Gemäß den Ausführungen von GLADEN (2014, S. 30) werden die durch Kennzahlen beschriebenen Ziele als Zielgrößen bezeichnet. Für ein umfassendes Verständnis soll daher zunächst die Terminologie der Kennzahlen spezifiziert werden, ehe auf die Begriffsdefinition der Zielgrößen eingegangen wird. DIETRICH ET AL. (2007, S. 12) merken in diesem Zusammenhang an, dass in der Literatur diverse Definitionen zum Begriff der Kennzahlen existieren. Im Folgenden sind daher zwei unterschiedliche Begriffsdefinitionen für Kennzahlen aufgeführt, die das dieser Arbeit zugrunde liegende Verständnis prägen. AICHELE (1997, S. 73) beschreibt Kennzahlen als „Maßstabswerte für den innerbetrieblichen [...] und den zwischenbetrieblichen [...] Vergleich“, die „in einem leicht fassbaren Zahlendruck verschiedene Größen in ein sinnvolles Verhältnis zueinander“ setzen. Ergänzend definieren WEBER UND SCHÄFFER (2016, S. 177) Kennzahlen als „quantitative Daten, die als bewusste Verdichtung der komplexen Realität über zahlenmäßig erfassbare betriebswirtschaftliche Sachverhalte informieren sollen“. Folglich stellen Kennzahlen eine geeignete Möglichkeit dar, um aggregierte produktionsrelevante Daten und Indikatoren als Mess- und Führungsinstrument für die Umsetzung der Produktionsstrategien oder -prozesse zu verwenden (GOTTMANN 2019, S. 39). In der Fachliteratur finden die Bezeichnungen Kennziffer, Kenngröße, Branchen Kennzahl, Maß- oder Verhältniszahl synonym Verwendung für den Begriff der Kennzahl. Dabei dienen Kennzahlen der Bewertung von Zielgrößen (GLADEN 2014, S. 30, DIETRICH ET AL. 2007, S. 8).

Für die Produktion existieren je nach Unternehmensvision verschiedene Zielgrößen, die in ihrem Zusammenwirken für den Unternehmenserfolg relevant sind (GOTTMANN 2019,

S. 148). Gemein haben produzierende Unternehmen, dass sie in einem Spannungsfeld, dem ‚magischen Dreieck‘, bestehend aus den Zielgrößen Zeit, Kosten und Qualität agieren (ATKINSON 1999, S. 338). Zwischen diesen Zielgrößen liegen teils konkurrierende Wirkbeziehungen vor (BERTAGNOLLI 2018, S. 308 ff.). Somit gilt es, im Zuge einer anvisierten Reduktion der Kosten gleichzeitig die Dimensionen Zeit und Qualität zielorientiert zu steuern, um alle Zielgrößen zu verbessern (LAY 1997, S. 242). Die aufgeführten Zielgrößen stellen nach MERL (2016, S. 105) zentrale Wettbewerbsfaktoren eines Unternehmens dar, die um die Zielgröße Flexibilität erweitert werden müssen. Neben den bisher genannten Zielgrößen gewinnt das Thema Nachhaltigkeit in Unternehmen an Bedeutung (PARIDA & WINCENT 2019, S. 3). Der Begriff Nachhaltigkeit ist eng verknüpft mit dem Konzept der Triple-Bottom-Line, das eine nachhaltige Entwicklung als das gleichzeitige und gleichberechtigte Umsetzen von ökologischen, sozialen und ökonomischen Zielen beschreibt (STEVEN & KLÜNDER 2018, S. 207). Im Rahmen dieser Arbeit wird die ökonomische Nachhaltigkeit der Zielgröße Kosten zugeordnet. Die für diese Forschungsarbeit relevanten Zielgrößen sind in Abbildung 2-6 in Anlehnung an LIEBRECHT (2020, S. 13) aufgeführt.







 Zeit	Die Dimension Zeit zielt auf die Reduktion der Durchlaufzeiten ab, sodass die vereinbarten Liefertermine eingehalten und Lieferzeiten reduziert werden können.
 Kosten	Die Dimension Kosten zielt auf eine ökonomisch nachhaltige Reduktion der Produktionskosten ab, um die langfristige Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens zu sichern.
 Qualität	Die Dimension Qualität zielt auf die Sicherstellung der geforderten Prozessqualität und -stabilität ab, indem Prozesse ohne unzulässige Abweichungen durchgeführt werden.
 Flexibilität	Die Dimension Flexibilität zielt auf die Möglichkeit ab, die Produktionsprozesse innerhalb vordefinierter Zustände und ohne zeitliche oder finanzielle Aufwände an wechselnde Gegebenheiten anpassen zu können.
 soziale Nachhaltigkeit	Die Dimension soziale Nachhaltigkeit zielt auf die Vermeidung von Arbeitsunfällen und die Verbesserung der Arbeitsbedingungen für die Mitarbeitenden ab.
 ökologische Nachhaltigkeit	Die Dimension ökologische Nachhaltigkeit zielt auf die Reduktion von Verschwendungen in den Prozessen ab, um einen unnötigen Ressourcenverbrauch zu vermeiden.

Abbildung 2-6: Produktionsrelevante Zielgrößen in Anlehnung an LIEBRECHT (2020, S. 13)

2.4.2 Auswahl produktionsrelevanter Zielgrößen

Auf Grundlage der im vorherigen Abschnitt eingeführten Begriffsdefinitionen werden nachfolgend die Zielgrößen Zeit, Kosten, Qualität, Flexibilität sowie soziale und ökologische Nachhaltigkeit spezifiziert. Zudem wird die Dimension der ökonomischen Nachhaltigkeit vorgestellt, die unter der Zielgröße Kosten subsumiert wird.

Zeit: Die Zielgröße Zeit wird im Verlauf dieser Arbeit mit der Durchlaufzeit gleichgesetzt. Die Durchlaufzeit ist nach HADELER UND WINTER (2000, S. 788) als Zeitspanne definiert, „die bei der Produktion eines Gutes zwischen dem Beginn des ersten Arbeitsvorganges und dem Abschluss des letzten Arbeitsvorganges verstreicht“. Die Reduktion von zeitlichen Verzögerungen im Produktionsprozess zielt darauf ab, die Durchlaufzeit und somit die Lieferzeit für die Kundschaft zu minimieren, was zu einer erhöhten Kundenzufriedenheit führt (KLETTI & SCHUMACHER 2015, S. 165). Sowohl durch die Einführung von Lean-Methoden als auch durch die Implementierung von Industrie-4.0-Technologien ist mit einer Verkürzung der Durchlaufzeit zu rechnen, da diese eine Vermeidung bzw. Eliminierung von Produktionsstörungen ermöglichen (TAKEDA 2013, S. 11, LIEBRECHT 2020, S. 14).

Kosten: Die Fokussierung auf die Produktionskosten als wesentliche Zielgröße leitet sich aus dem Lean-Production-Ansatz der retrograden Gewinnermittlung ab (AULL 2012, S. 48). Diese geht davon aus, dass in einem Käufermarkt die Kundschaft den Endverkaufspreis vorgibt und der Unternehmensgewinn aus der Differenz zwischen Verkaufspreis und Kosten resultiert. Folglich besteht bei diesem Ansatz lediglich die Möglichkeit, die Kosten zu reduzieren, um den Unternehmensgewinn zu erhöhen (SHINGŌ 1992, S. 44 ff.). Das Ziel der Dimension Kosten besteht somit darin, die Produktionskosten zu reduzieren und die langfristige Wettbewerbsfähigkeit zu sichern.

Qualität: Ergänzend zu den Zielgrößen Zeit und Kosten ist die Qualität eine weitere relevante Unternehmenszielgröße. Gemäß DIN 9000 ist Qualität als „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt“, definiert. Dieser Definition folgend gibt Qualität an, in welchem Maß ein Produkt den bestehenden Kundenanforderungen entspricht. Dabei ist Qualität sowohl ein wesentlicher Faktor für die Kundenzufriedenheit als auch bei der Vermeidung von Nacharbeit aufgrund mangelhafter Erzeugnisse (AULL 2012, S. 115). Das übergeordnete Ziel dieser Dimension ist die Erfüllung der aus Kundensicht geforderten Prozessqualität und -stabilität. Daher beschreibt das Kriterium Qualität die Einhaltung der geforderten Prozessqualität, indem Produktionsprozesse ohne unzulässige Abweichungen durchgeführt werden (LIEBRECHT 2020, S. 13).

Flexibilität: Nach LANZA ET AL. (2018, S. 9) führt Flexibilität in Produktionsprozessen zu einem signifikanten Wettbewerbsvorteil für Unternehmen. Je nach Betrachtungskontext und Dimension existieren für Flexibilität unterschiedliche Definitionen (SETHI & SETHI 1990, S. 297). Im produktionstechnischen Kontext und in Anlehnung an MÖLLER (2008, S. 15) und LANZA ET AL. (2018, S. 9) wird Flexibilität als die Fähigkeit einer Fabrik oder eines Unternehmens verstanden, sich ohne zeitliche und finanzielle Aufwände an Veränderungen innerhalb vordefinierter Zustände anpassen zu können. Das Ziel von Flexibilität, welches das Verständnis dieser Arbeit prägt, ist die Befähigung eines

Produktionssystem, damit dessen Produktionsprozesse innerhalb eines vorgedachten Rahmens und ohne zeitliche und finanzielle Aufwände an wechselnde Gegebenheiten angepasst werden können (LIEBRECHT 2020, S. 15). Im Lean-Production-Kontext haben mehrere Autor*innen Flexibilität als zusätzliche Dimension zum magischen Dreieck eingeführt, da Lean-Production-Methoden wie Single Minute Exchange of Die (SMED) die Flexibilität in Form von verkürzten Rüstzeiten beeinflussen (GOTTMANN 2019, S. 160, DOMBROWSKI & MIELKE 2015, S. 275). Zudem tragen laut LIEBRECHT (2020, S. 15) Industrie-4.0-Technologien wie Assistenzsysteme für Mitarbeitende zur Steigerung der Flexibilität bei.

Die World Commission on Environment and Development (dt. Weltkommission für Umwelt und Entwicklung) definiert Nachhaltigkeit als eine Entwicklung, „[...] die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht erfüllen können“ (BRUNDTLAND 1987, S. 15). Gemäß dem in Abschnitt 2.4.1 erwähnten Triple-Bottom-Line-Konzept (STEVEN 2019, S. 207), auch als Drei-Säulen-Modell bezeichnet (OSRANEK 2017, S. 44), lassen sich die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit wie folgt charakterisieren:

Ökonomische Nachhaltigkeit: Die ökonomische Nachhaltigkeit bildet die Basis für die weiteren Elemente der Triple-Bottom-Line und zielt auf eine langfristige Unternehmenssicherung durch die Generierung von Wettbewerbsvorteilen ab (HAUFF 2021, S. 32). Als wesentliche Bestandteile der ökonomischen Nachhaltigkeit nennen VARELA ET AL. (2019, S. 1452) die Senkung der Produktionskosten und die Erhöhung der Prozessperformance. DÍAZ-REZA ET AL. (2016, S. 1248) erwarten, dass sich durch die Einführung geeigneter Lean-Production-Methoden die ökonomische Nachhaltigkeit bei produzierenden Unternehmen verbessern lässt. Darüber hinaus beeinflussen Industrie-4.0-Technologien wie cyber-physische Systeme oder die Nutzung der Cloud die ökonomische Nachhaltigkeit positiv, da durch selbststeuernde Systeme die Produktionskosten reduziert werden können (SOUSA JABBOUR ET AL. 2018, S. 19 ff.). Im Zuge dieser Arbeit werden die Kriterien Kosten und ökonomische Nachhaltigkeit zusammengefasst, da beide Zielgrößen die Sicherung des langfristigen Unternehmenserfolgs durch die Reduktion der Produktionskosten anstreben.

Ökologische Nachhaltigkeit: Die ökologische Nachhaltigkeit beschreibt gemäß HAUFF (2021, S. 32) den unternehmerischen Einfluss auf den Schutz und den Erhalt der Umwelt. Dies erfordert eine systematische Verminderung ökologischer Belastungen und Risiken durch die Unternehmen. Durch die Reduktion von Verschwendung in Produktionsprozessen, beispielsweise in Form von Überproduktion (siehe Abschnitt 2.1.2), können Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien dazu beitragen, einen unnötigen Energieverbrauch oder den Einsatz von Ressourcen zu reduzieren (SHROUF ET AL. 2014, S. 699). Das primäre Ziel der ökologischen Nachhaltigkeit besteht im Rahmen dieser Arbeit in der

Reduktion von Verschwendungen in Prozessen, um einen unnötigen Ressourcenverbrauch zu vermeiden.

Soziale Nachhaltigkeit: Die Zielgröße der sozialen Nachhaltigkeit beschreibt die Sozialverträglichkeit des unternehmerischen Handelns (HAUFF 2021, S. 170). GREGORI ET AL. (2017, S. 437) merken in diesem Zusammenhang an, dass eine Fokussierung der Produktionsprozesse auf die Produktivität und Kostenminimierung nicht mehr ausreichend ist. Vielmehr müssen damit neue soziale Nachhaltigkeitsaspekte verknüpft werden (RODRIGUES ET AL. 2016, S. 425). Als wesentliches Kriterium wird dabei die Verbesserung der Arbeitsbedingungen für die Mitarbeitenden angesehen, die beispielsweise durch kognitive oder physische Assistenzsysteme unterstützt werden können (TROPSCUH ET AL. 2020, S. 265). Zudem führen VARELA ET AL. (2019, S. 1444) die Sicherheit der Arbeitnehmenden und die Beteiligung der Mitarbeitenden an Entscheidungsprozessen auf. Im Verlauf dieser Arbeit zielt das Kriterium soziale Nachhaltigkeit darauf ab, Arbeitsunfälle zu vermeiden und die Arbeitsbedingungen für die Mitarbeitenden zu verbessern.

2.5 Ablaufsimulation

Die Entwicklung einer allgemeingültigen und unternehmensindividuellen Implementierungsstrategie für die Einführung von Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien im Sinne von Lean 4.0 soll im Rahmen dieser Dissertation mithilfe eines System-Dynamics-Modells erarbeitet werden. Der Begriff System Dynamics ist durch die Forschungsarbeiten von FORRESTER (1961) geprägt, der den systemorientierten und computer-gestützten Problemlösungsansatz zur Untersuchung dynamischer Systeme in der Industrie entwickelte (RICHARDSON 2013, S. 1519). System Dynamics ermöglicht die Analyse und Simulation der Auswirkung diverser Einflussgrößen auf eine Systemstruktur und das daraus resultierende Systemverhalten, um Handlungsempfehlungen abzuleiten (COYLE 1996, S. 1). In den nachstehenden Abschnitten werden die Begrifflichkeiten System, Modell und Simulation definiert sowie ihre Eigenschaften aufgezeigt. Diese bilden die Grundlage für die in Abschnitt 2.5.2 vorgestellten Wesensmerkmale von System Dynamics, die für das Verständnis des in Unterkapitel 5.3 erarbeiteten Lean-4.0-Simulationsmodells notwendig sind.

2.5.1 Begriffsdefinition und Grundlagen zu Systemen, Modellen und Simulation

Der Begriff ‚System‘ entstammt dem griechischen Wort ‚sýstēma‘ und bedeutet „aus mehreren Teilen zusammengesetztes, gegliedertes Ganzes“ (AULL 2012, S. 18). PALM (2010, S. 826) definiert ein System als einen Verbund von Elementen zur Erfüllung eines gemeinsamen Zwecks. Der Richtlinie VDI 3633-1 folgend wird ein System als eine von ihrer

Umwelt abgegrenzte Menge an Elementen definiert, die miteinander in Beziehung stehen. Die Wirkbeziehungen zwischen den einzelnen Systemelementen werden dabei als Interdependenzen bezeichnet und können in Interdependenzmatrizen festgehalten werden (siehe Abschnitt 5.2). Nach BOSSEL (1992, S. 16) besitzt ein System einen spezifischen Zweck, der auf die Erfüllung einer Funktion abzielt und durch Systemelemente sowie Interdependenzen spezifiziert wird. Die vorliegende Arbeit ist durch diese Definition geprägt, da das Lean-4.0-System den Zweck verfolgt, eine allgemeingültige und unternehmensindividuelle Lean-4.0-Implementierungsstrategie zu generieren. Dabei basiert die Strategie auf den Interdependenzen zwischen den Lean- und den Industrie-4.0-Elementen und soll deren Einfluss auf produktionsrelevante Zielgrößen aufzeigen (siehe Kapitel 5).

Als Basis für die Modellierung des Lean-4.0-Systems soll zunächst der wissenschaftstheoretische Rahmen für den Modellbegriff geschaffen werden. Ein Modell ist gemäß der VDI-Richtlinie 3633-1 als eine „vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System“ definiert. Dabei unterscheiden sich die untersuchungsrelevanten Eigenschaften des Modells von den realen Gegebenheiten innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens (VDI 3633-1, S. 3). Die Modelle können entsprechend ihrer Funktion in drei verschiedene Klassen segmentiert werden. Diese bestehen aus den Beschreibungsmodellen, den Erklärungs- bzw. Simulationsmodellen sowie den Entscheidungs- bzw. Optimierungsmodellen (KÜLL & STÄHLY 1999, S. 2).

Die für diese Forschungsarbeit relevante Klasse der Simulationsmodelle dient dazu, Kausalzusammenhänge zwischen Input- und Outputgrößen sowie Handlungsempfehlungen abzuleiten (VDI 3633-1 2014, S. 3). Eine grundlegende Definition von Simulationsmodellen ist auf die Publikation von SAYER UND CROSSON (1963) zurückzuführen, die ein Simulationsmodell als eine symbolische Darstellung eines Phänomens oder Systems begreifen. PAGENKOPF (1981, S. 539) präzisiert das Verständnis von Simulationen, indem er eine Simulation als eine experimentelle Nachahmung von Abläufen realer oder gedachter Systeme mithilfe formaler Modelle beschreibt. Ergänzend dazu und für diese Arbeit leitend ist die Definition der VDI-Richtlinie 3633-1, die eine Simulation als das „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell [versteht], um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind; insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt“. Bei der Bearbeitung komplexer Probleme, deren Lösung in der realen Welt nicht möglich oder zu aufwendig ist, wird daher zur Wissensgenerierung eine simulationsbasierte Lösungsfindung angestrebt (GRIGORYEV 2021, S. 7). Bei der Entwicklung von Simulationsmodellen können gemäß GRIGORYEV (2021, S. 13) drei

Methoden unterschieden werden, die in nachfolgender Abbildung in Abhängigkeit von ihrem Abstraktionsgrad dargestellt sind (siehe Abbildung 2-7).

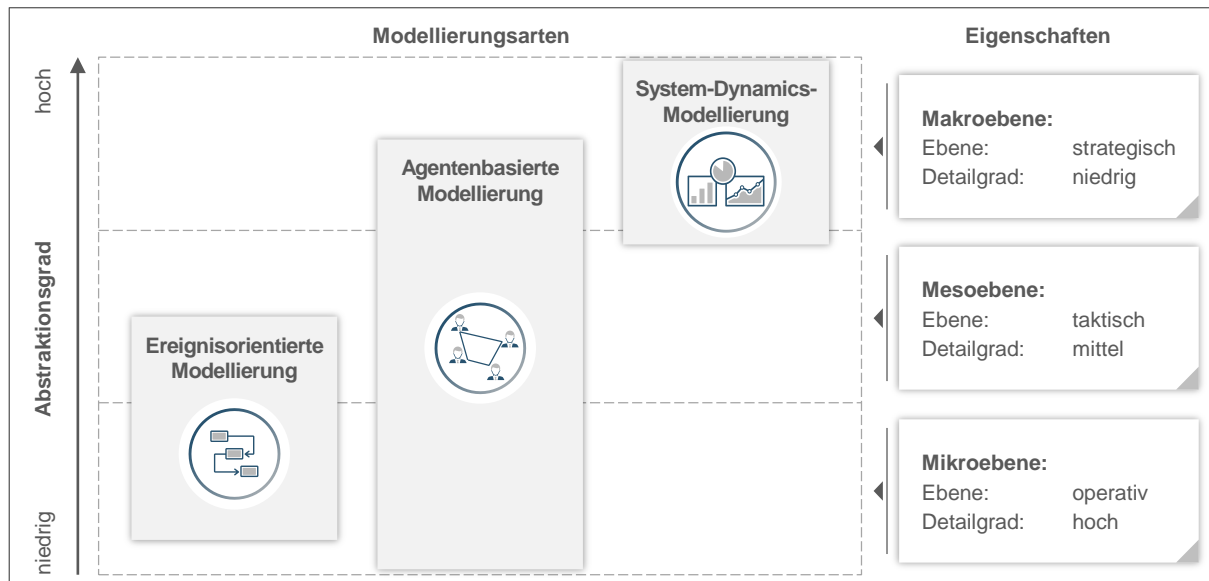


Abbildung 2-7: Methoden zur Simulationsmodellierung in Anlehnung an GRIGORYEV (2021, S. 13)

GRIGORYEV (2021, S. 13) folgend ist die Auswahl der Modellierungsart von den abzubildenden Rahmenbedingungen und Zielsetzungen abhängig. Während eine ereignisdiskrete Modellierung durch einen hohen Detaillierungsgrad gekennzeichnet ist und somit auf operativer Ebene Anwendung findet, ist ein agentenbasierter Ansatz ein dezentralisierter Modellierungsansatz. Dabei ist der agentenbasierte Ansatz für die Modellierung einer hohen Anzahl von Individuen mit definierten Eigenschaften und Funktionen geeignet (LIEBRECHT 2020, S. 30). Nach COYLE (1996, S. XIII) eignet sich die System-Dynamics-Modellierung für komplexe und dynamische Systeme. Die Problemstellungen bewegen sich dabei auf einer Makroebene mit hohem Abstraktionsgrad, sodass die Modellierung auf die Ableitung strategischer Handlungsempfehlungen abzielt. Daher wurde im Kontext der vorliegenden Arbeit die System-Dynamics-Modellierung gewählt, um eine Lean-4.0-Implementierungsstrategie für produzierende Unternehmen abzuleiten und den Einfluss auf produktionsrelevante Zielgrößen aufzuzeigen.

2.5.2 Grundlagen des System-Dynamics-Ansatzes

Jay Wright Forrester entwickelte und etablierte die Simulation für dynamische, komplexe Vorgänge, um die Entwicklungen von Wirtschaftsunternehmen mithilfe mathematischer Modellsimulationen prognostizieren zu können (FORRESTER 1961 S. VIII). Der System-Dynamics-Ansatz folgt dabei der operativen Umsetzung der Systemtheorie sowie der Kybernetik (FORRESTER 1961, S. 14).

Unter dem Begriff der Systemtheorie wird eine formale Wissenschaft von Strukturen, Verknüpfungen und dem Verhalten von Systemen verstanden (ULRICH 1970, S. 105), wobei die Systemstruktur ganzheitlich betrachtet und analysiert wird (GRÖTICKE 2014, S. 29). Die Systemtheorie ist nach SCHIEMENZ (1993) eng mit der Kybernetik verknüpft, die sich mit der Regelung und Steuerung komplexer Systeme sowie mit den darin vorherrschenden Interdependenzen beschäftigt. Der Fokus der Kybernetik liegt auf der formalen Kommunikations- und Regelungstheorie komplexer, selbstregulierender Systeme (AULL 2012, S. 17).

Den Merkmalen der Systemtheorie und Kybernetik folgend dient der System-Dynamics-Ansatz zur Modellierung, Simulation, Analyse und Gestaltung komplexer und dynamischer Systeme (GRÖSSER 2018). Ein Kernelement von System Dynamics besteht gemäß GRÖTICKE (2014, S. 30 f.) in den Rückkopplungsprozessen, die eine Eigendynamik beschreiben, bei der sich Systemelemente auf den Systemzustand auswirken und ein spezifisches, unvorhersehbares Systemverhalten auslösen. Diese Eigenschaften ermöglichen es, mithilfe von System Dynamics soziotechnische Systeme basierend auf einem kybernetischen Modellansatz abzubilden und zu simulieren.

In der Literatur existieren verschiedene Begriffsdefinitionen, die aus den jeweiligen Forschungsperspektiven der Autor*innen resultieren. Um ein einheitliches Verständnis zu schaffen, werden drei ausgewählte Definitionen aufgeführt und darauf basierend wird eine diese Forschungsarbeit prägende Begriffsbestimmung festgehalten.

FORRESTER (1961) beschreibt den Begriff ‚System Dynamics‘ unter dem Synonym ‚Industrial Dynamics‘ wie folgt:

„Industrial Dynamics is the investigation of the information-feedback character of industrial systems and the use of models for the design of improved organizational form and guiding policy.“ (FORRESTER 1961, S. 13)

RICHARDSON (2013) definiert den System-Dynamics-Ansatz folgendermaßen:

„System Dynamics is a computer-aided approach to policy analysis and design. It applies to dynamic problems arising in complex social, managerial, economic, or ecological systems – literally any dynamic system characterized by interdependence, mutual interaction, information feedback, and circular causality.“ (RICHARDSON 2013, S. 1519)

Abschließend wird die Definition nach GRÖTICKE (2014) aufgeführt. Diese charakterisiert System Dynamics als:

„[...] eine computerbasierte Methode zur Theoriebildung, Analyse und strategischen Entscheidungsfindung, welche sich aus einer endogenen Betrachtungsweise entwickelt (...). Dies gilt für dynamische Probleme in komplexen sozialen, betriebswirtschaftlichen oder ökologischen Systemen.“ (GRÖTICKE 2014, S. 31)

Im Kontext dieser Arbeit wird der System-Dynamics-Ansatz zusammenfassend aus den drei vorhergehenden Definitionen als eine computergestützte Simulationemethode verstanden, mit deren Hilfe unter Einbeziehung von Rückkopplungsschleifen komplexe und dynamische Kausalzusammenhänge zwischen Systemelementen identifiziert werden können, um darauf basierend Handlungsempfehlungen abzuleiten. Die potenziellen Problemstellungen umfassen soziale, betriebswissenschaftliche, ökologische und technische Systeme (GRÖTICKE 2014, S. 31, RICHARDSON 2013, S. 1519, FORRESTER 1961, S. 13).

Dabei werden ROMEIKE (2018, S. 189) folgend in einem System-Dynamics-Modell vier Wesensmerkmale erfasst, die es im Rahmen der Modellierung zu berücksichtigen gilt:

- **Bestandsgrößen:** Die Bestandsgrößen sind Systemvariablen, die den vorherrschenden Zustand eines dynamischen Systems beschreiben, beispielsweise ist dies der Initialwert von Lean- oder Industrie-4.0-Elementen in einem Produktionsbereich.
- **Kausale Rückkopplungsprozesse:** Die Feedback-Loops können in ihrer Polarität sowohl positiver als auch negativer Ausprägung sein. Ein Feedback-Loop ist die Rückführung von Systeminformationen und regelt das Systemverhalten.
- **Wirkungsverzögerungen:** Die Wirkungsverzögerungen berücksichtigen die zeitliche Entkopplung von Ursache und Wirkung in System-Dynamics-Modellen.
- **Nichtlinearität:** Die Nichtlinearität beschreibt die Eigenschaft systemdynamischer Modelle, um komplexe Zusammenhänge zu berücksichtigen, bei denen eine Anpassung der Ausbringungsmenge disproportional zur Änderung der Eingabemenge verläuft.

Für die strukturierte Entwicklung eines System-Dynamics-Modells erarbeitete GRÖTICKE (2014, S. 35) in Anlehnung an FORRESTER (1961) und COYLE (1996, S. 11) ein Vorgehen zur Konzeptionierung eines System-Dynamics-Modells, das in seinen Grundzügen nachfolgend beschrieben wird und in Abbildung 2-8 dargestellt ist. Gemäß dem Vorgehensmodell nach GRÖTICKE (2014, S. 35) werden in einem ersten Schritt die vorherrschenden Probleme spezifiziert und der Modellzweck wird definiert (Schritt 1). Dies bildet die Basis für die Entwicklung eines Modellkonzepts sowie der Ausarbeitung eines qualitativen Modellentwurfs (Schritt 2). Der Modellentwurf umfasst die Festlegung der Systemgrenzen und die Identifikation der wesentlichen Parameter. Im dritten Schritt werden das System-Dynamics-Modell und die Modellsimulation erarbeitet (Schritt 3). Nach GRÖTICKE (2014, S. 35) werden dabei die Systemstruktur und die Entscheidungsregeln definiert sowie die Systemvariablen

basierend auf einer Interdependenzanalyse in ein System-Dynamics-Flussmodell überführt. Für das Flussmodell werden zudem die Startwerte der Systemvariablen und Parameter festgelegt. In den abschließenden Schritten gilt es, das Modell zu validieren (Schritt 4) sowie die Rahmenbedingungen für die verschiedenen Szenarien zu bestimmen und das System-Dynamics-Modell zu evaluieren (Schritt 5). Das beschriebene fünfstufige Vorgehen folgt einem iterativen Prozess, in dessen Verlauf anwendungsfähige systemdynamische Modelle des realen Systems entstehen. Nachfolgend sind die Schritte der System-Dynamics-Modellentwicklung in Anlehnung an GRÖTICKE (2014, S. 35) visualisiert.

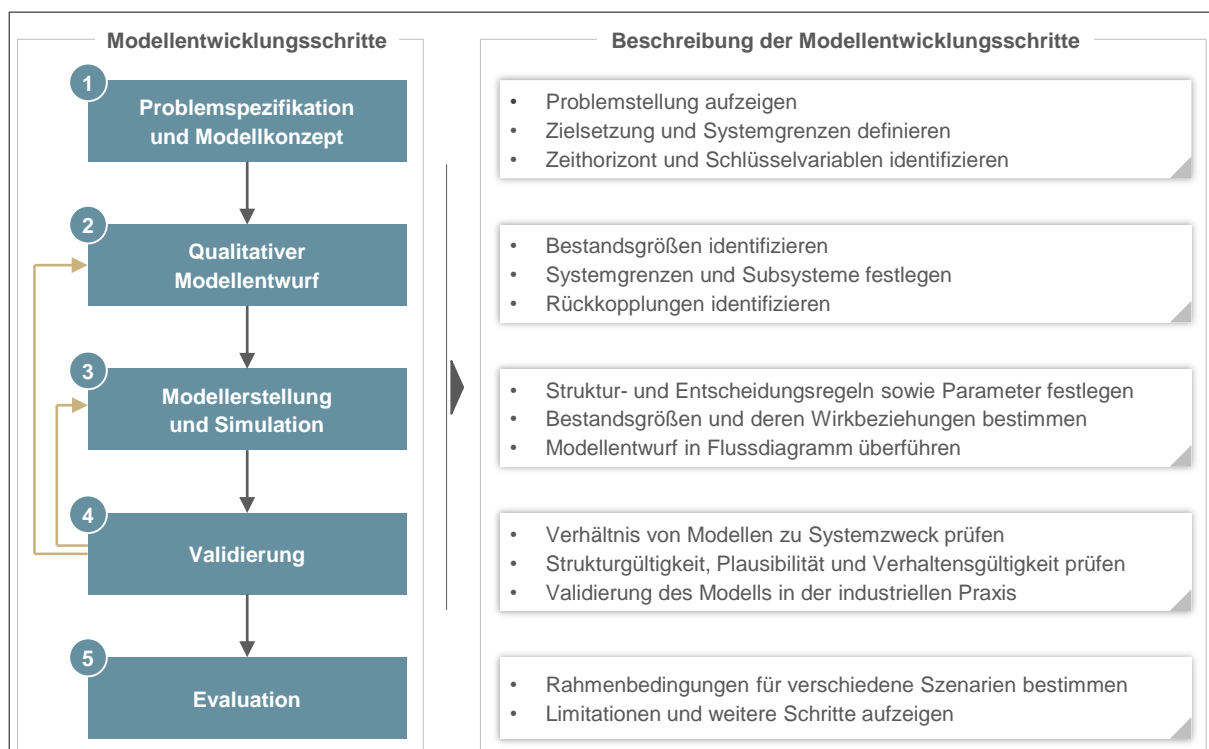


Abbildung 2-8: Vorgehen zur System-Dynamics-Modellentwicklung in Anlehnung an GRÖTICKE (2014, S. 35)

Ausgehend von der oben aufgeführten Begriffsdefinition von System Dynamics, deren Wesensmerkmalen und dem Vorgehen zur Modellentwicklung wird für die Erarbeitung des Lean-4.0-Implementierungsmodells der System-Dynamics-Ansatz gewählt. Dieser Modellierungsansatz adressiert mit seiner Detaillierungsebene und dem damit verbundenen Abstraktionsgrad die dieser Arbeit zugrunde liegende Problemstellung und Zielsetzung (siehe Abschnitte 1.2 und 1.3). So können die Interdependenzen zwischen ausgewählten Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien simuliert und kausale Wirkbeziehungen berücksichtigt werden. Die daraus resultierenden allgemeingültigen sowie unternehmensindividuellen Lean-4.0-Implementierungsstrategien, bestehend aus Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien, sollen es ermöglichen, Handlungsempfehlungen für produzierende Unternehmen abzuleiten.

3 Stand der Forschung

Im vorhergehenden Kapitel wurden der wissenschaftstheoretische Rahmen und ein einheitliches Begriffsverständnis erarbeitet. Zur Beschreibung des Stands der Forschung werden in diesem Kapitel die Wirkzusammenhänge zwischen Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien (siehe Abschnitt 3.2) sowie Implementierungsansätze von Lean Production, Industrie 4.0 und Lean 4.0 (siehe Abschnitt 3.3) untersucht. Die vorgestellten Forschungsbeiträge mit Fokus auf den Bereich der Produktion resultieren aus einer umfassenden Literaturanalyse, basierend auf den Literaturlieferanten Scopus, Web of Science und EBSCO. Abschließend werden in Abschnitt 3.4 die identifizierten Publikationen mit den in Abschnitt 3.1 definierten Bewertungskriterien abgeglichen und mögliche Handlungsbedarfe zur Entwicklung einer Methode zur Ableitung allgemeingültiger und unternehmensindividueller Lean-4.0-Implementierungsstrategien aufgezeigt. Die drei übergeordneten Anforderungen an den aktuellen Stand der Forschung resultieren aus den für diese Arbeit grundlegenden Forschungsfragen (siehe Abschnitt 1.2) und werden im folgenden Abschnitt detailliert erläutert (siehe Abschnitt 3.1).

3.1 Bewertungskriterien für den Stand der Forschung

Das erste Anforderungskriterium zur Einordnung und Bewertung des aktuellen Stands der Forschung leitet sich aus Forschungsfrage 1 ab (siehe Abschnitt 1.2) und adressiert die Spezifikation und strukturierte Auswahl von Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien. Um dieses Kriterium zu erfüllen, müssen die Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien in den Fachbeiträgen anhand von Merkmalsausprägungen spezifiziert (siehe Unterkriterium 1.a und 1.b) und in einem strukturgebenden Rahmenmodell verortet sein. Neben allgemeinen Informationen wie der Bezeichnung oder Beschreibung der Methoden und Technologien sollte die Spezifikation beispielsweise auch die minimal und maximal notwendige Implementierungsdauer, den Einsatzbereich sowie den Einfluss auf produktionsrelevante Zielgrößen (siehe Unterkriterium 1.c) enthalten. Diese Spezifikation und das daraus resultierende Rahmenwerk ermöglichen es, die einzelnen Methoden und Technologien aufgrund ähnlicher Merkmalsausprägungen zu klassifizieren und die Interdependenzen zwischen Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien zu analysieren. Zudem soll ein strukturierter Auswahlprozess bereitgestellt werden (siehe Unterkriterium 1.d), der Unternehmen dazu befähigt, die für den Anwendungsbereich relevanten Lean- und Industrie-4.0-Elemente effektiv und effizient auszuwählen. Die Anforderungen des ersten Bewertungskriteriums sind nachfolgend aufgeführt:

1. Bewertungskriterium: Spezifikation und strukturierter Auswahlprozess

- 1.a Spezifikation von Lean-Production-Methoden
- 1.b Spezifikation von Industrie-4.0-Technologien
- 1.c Einfluss der Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien auf die Zielgrößen
- 1.d Strukturierter Auswahlprozess

Zur Ableitung einer allgemeingültigen sowie unternehmensindividuellen Lean-4.0-Implementierungsstrategie gilt es, die Interdependenzen zwischen Lean- und Industrie-4.0-Elementen zu untersuchen (siehe Unterkriterien 2.a, 2.b und 2.c). Dabei müssen die Art und die Intensität der wechselseitigen Wirkbeziehungen analysiert werden (AULL 2012, S. 157). Gemäß den Ausführungen von AULL (2012, S. 157) lässt sich die Art der Interdependenzen in eine unterstützende und voraussetzende Beeinflussung differenzieren. Eine unterstützende Interdependenz indiziert, dass eine Lean-Production-Methode oder Industrie-4.0-Technologie effektiver und effizienter implementiert werden kann, wenn vorausgehend bestimmte Methoden oder Technologien eingeführt wurden. Als eine Voraussetzung wird die Art einer Interdependenz bezeichnet, wenn die Implementierung einer Lean-Production-Methode oder Industrie-4.0-Technologie signifikant oder gänzlich von der Implementierung einer anderen Methode oder Technologie abhängt. Mithilfe der Intensität erfolgt zudem eine Gewichtung der Wirkverknüpfungen zwischen den Methoden und Technologien, welche positiv oder negativ sein kann (AULL 2012, S. 157). Die detaillierte Analyse der Interdependenzen stellt sicher, dass im angestrebten Lean-4.0-Simulationsmodell die Ursachen-Wirkungs-Zusammenhänge sowie sequenzielle, in sich konsistente Implementierungsreihenfolgen simuliert werden können. Zudem ist von einem dynamischen Lean-4.0-Systemverhalten auszugehen, bei dem systemdynamische Rückkopplungseffekte (siehe Unterkriterium 2.d) in Form von Interdependenzen beachtet werden müssen. Nachstehend sind die Anforderungen des zweiten Bewertungskriteriums aufgelistet:

2. Bewertungskriterium: Interdependenzanalyse

- 2.a Interdependenzen zwischen Lean-Production-Methoden
- 2.b Interdependenzen zwischen Industrie-4.0-Technologien
- 2.c Interdependenzen zwischen Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien
- 2.d Berücksichtigung dynamischer Rückkopplungsprozesse

Die letzten Anforderungen sind aus Forschungsfrage 3 abgeleitet und fokussieren die Entwicklung von allgemeingültigen (siehe Unterkriterium 3.a) sowie unternehmensindividuellen Lean-4.0-Implementierungsstrategien (siehe Unterkriterium 3.b). Letztere sind für Unternehmen von hoher Relevanz, da die Anwendungsbereiche unterschiedliche Produktionstypologien sowie strategische und operative Rahmenbedingungen aufweisen. Somit

sollte die Lean-4.0-Implementierungsstrategie die unternehmensindividuelle Ausgangssituation sowie die unternehmensrelevanten Zielgrößen und weitere Einflussdimensionen, beispielsweise die vorherrschende Mitarbeitendenkompetenz oder die Veränderungsbereitschaft des Unternehmens, berücksichtigen. Zusätzlich wird bei der Bewertung der in der Literatur existierenden Implementierungsmodelle zwischen einer übergeordneten Konzeptebene und einer für diese Arbeit relevanten Methoden- und Technologieebene (Detailebene) unterschieden (EJSMONT ET AL. 2020, S. 21). Für die Ableitung der Lean-4.0-Implementierungsstrategie sollte das Implementierungsvorgehen auf einer Detailebene vorliegen und eine zeitliche Implementierungsabfolge gemäß den Interdependenzen zwischen den Lean- und den Industrie-4.0-Elementen enthalten (siehe Unterkriterium 3.c). Die Anforderungen an die Implementierungsstrategie sind nachstehend subsumiert:

3. Bewertungskriterium: Implementierungsstrategie

- 3.a Allgemeingültige Lean-4.0-Implementierungsstrategie
- 3.b Unternehmensindividuelle Lean-4.0-Implementierungsstrategie
- 3.c Methoden- und technologiebasierte Lean-4.0-Implementierungsstrategie

Fortführend werden in den Abschnitten 3.2 und 3.3 wissenschaftlich relevante Publikationen aufgeführt, erläutert und die wesentlichen Erkenntnisse je Abschnitt in einem Zwischenfazit festgehalten. Anschließend erfolgt in Abschnitt 3.4 eine abschließende Bewertung und Analyse der Forschungsarbeiten basierend auf den oben vorgestellten Bewertungskriterien, um daraus einen möglichen Handlungsbedarf abzuleiten.

3.2 Analyse der Wirkbeziehung zwischen Lean Production und Industrie 4.0

Der aktuelle Stand der Forschung zu den Wirkbeziehungen zwischen Lean Production und Industrie 4.0 wurde von EJSMONT ET AL. (2020) analysiert, um existierende Forschungslücken aufzuzeigen. Dazu wurde eine systematische Literaturnetzwerkanalyse basierend auf dem Vorgehen nach STROZZI ET AL. (2017, S. 6573 ff.) durchgeführt. Diese Methode kombiniert eine systematische Literaturrecherche mit einer quantitativen Analyse von bibliografischen Netzwerken, die mit der Software VOSviewer durchgeführt wurde. Die Studienergebnisse von EJSMONT ET AL. (2020) sind in der nachfolgenden Abbildung 3-1 zusammengefasst und resultieren aus der Analyse von 243 wissenschaftlichen Publikationen der Datenbank Web of Science Core Collection. Den Ergebnissen der systematischen Literaturnetzwerkanalyse nach EJSMONT ET AL. (2020) zufolge ist die Konzeptebene zwischen Lean Production und Industrie 4.0 bereits weitgehend untersucht (siehe Abschnitt 2.3). Zudem sind die domänenspezifischen Beziehungen zwischen den Lean-Methoden bzw. Industrie-4.0-Technologien und deren übergeordneten Konzepten bekannt oder – im Falle von

Industrie 4.0 – teilweise erforscht. Entsprechende Forschungsarbeiten liefern im Bereich von Lean Production beispielsweise DOMBROWSKI UND MIELKE (2015) oder AULL (2012). Im Themengebiet Industrie 4.0 sei exemplarisch auf die Arbeit von LIEBRECHT (2020) verwiesen. Die Wirkverknüpfungen zwischen Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien sind noch nicht hinreichend erforscht, sodass sich eine Forschungslücke hinsichtlich der Interdependenzen zwischen den Lean-Production-Methoden und den Industrie-4.0-Technologien zeigt (siehe Abbildung 3-1).

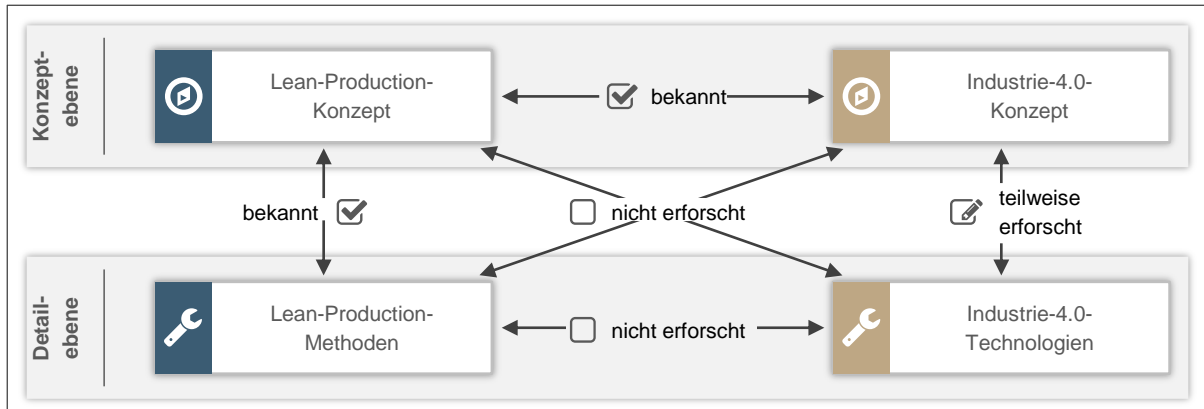


Abbildung 3-1: Aktueller Stand der Forschung zur Analyse der Wirkbeziehung zwischen Lean Production und Industrie 4.0 in Anlehnung an EJSMONT ET AL. (2020, S. 21)

Um diese Forschungslücke weiter zu spezifizieren, werden nachfolgend 23 relevante Publikationen, die die Wirkbeziehungen zwischen den Lean-Methoden und den Industrie-4.0-Technologien betrachten, vorgestellt und hinsichtlich der Bewertungskriterien aus Abschnitt 3.1 untersucht.

KOLBERG UND ZÜHLKE (2015) analysierten die Korrelationen ausgewählter Lean- und Industrie-4.0-Elemente. Dabei wurden vier Lean-4.0-Anwendungsfälle vorgestellt: Smart Operator, Smart Product, Smart Machine und Smart Planning. In jedem der Anwendungsfälle wurden die Synergiepotenziale zwischen den darin eingesetzten Lean-Production-Methoden in Form von Andon oder Kanban sowie den Industrie-4.0-Technologien aufgezeigt und beschrieben. KOLBERG UND ZÜHLKE (2015) konstatieren, dass bisher nur vereinzelt Anwendungsszenarien existieren, die Lean- und Industrie-4.0-Elemente miteinander verknüpfen. Dabei fehlt es laut den Verfassern an einem einheitlichen Rahmenwerk, das die Integration von Industrie-4.0-Lösungen in die schlanke Produktion unterstützt. In der Publikation geben die Autoren durch die Verknüpfung von vier Lean-Production-Methoden mit Industrie-4.0-Technologien einen übergeordneten Einblick in die Wirkbeziehungen beider Domänen. Eine detaillierte Spezifikation und Strukturierung der Methoden und Technologien fand nicht statt. Zudem wurden die Interdependenzen nicht hinsichtlich der Art und Intensität analysiert.

SANDERS ET AL. (2016) untersuchten potenzielle Wechselwirkungen zwischen Industrie-4.0-Technologien und Lean-Methoden. Die Autoren bezogen ihre Erkenntnisse aus einer strukturierten Literaturanalyse und zeigen, dass insbesondere die Lean-Methoden Pull-Prinzip, Fließprinzip, Just-in-Time-Belieferung sowie Einbeziehung der Mitarbeitenden und Kunden durch ausgewählte Industrie-4.0-Technologien unterstützt werden können. SANDERS ET AL. (2016) resümieren daher, dass weitreichende Potenziale für die Produktion durch die gezielte Kombination von Lean Production und Industrie 4.0 gehoben werden können. Die Autoren gingen in ihrer Analyse nicht detailliert auf die Interdependenzart und -intensität zwischen Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien ein, beschreiben allerdings ein mögliches Zusammenwirken anhand ausgewählter Beispiele.

DOMBROWSKI ET AL. (2017) analysierten die Interdependenzen zwischen acht Lean-Prinzipien sowie acht Industrie-4.0-Technologien und zehn Industrie-4.0-Prozessmerkmalen. Die Datengrundlage bildeten 260 Industrie-4.0-Anwendungsfälle deutscher Unternehmen, die der Plattform Industrie 4.0 entstammen. Um die Interdependenzen zwischen den Lean-Prinzipien und den Industrie-4.0-Elementen zu untersuchen, wurde jeder Anwendungsfall mindestens einem der acht Prinzipien zugewiesen. Letztere sind identisch zu jenen aus Abbildung 2-2. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass jeder der Anwendungsfälle einem Lean-Prinzip zugewiesen werden kann, was gemäß den Autoren die Hypothese stützt, dass Lean-Prinzipien eine wichtige Basis für die Einführung von Industrie-4.0-Technologien darstellen. Des Weiteren konstatiert der Fachbeitrag, dass ein Lean-4.0-Ansatz notwendig ist, um Technologien in das Lean-Produktionssystem zu implementieren. Eine Betrachtung der Interdependenzen auf Ebene der Methoden und Technologien sowie eine detaillierte Spezifikation und Strukturierung der Technologien und Lean-Production-Methoden erfolgten in dieser Publikation nicht.

HOFMANN UND RÜSCH (2017) verfolgten das Ziel, die Auswirkungen des Industrie-4.0-Ansatzes auf das Logistikmanagement zu untersuchen. Zunächst wurden auf Grundlage einer Literaturrecherche die Kernkomponenten des Industrie-4.0-Ansatzes für die Logistik identifiziert. Darauf basierend analysierten Expert*innen aus der Industrie verschiedene praxisrelevante Logistikszenerien. Das Ziel dieser Untersuchungen bestand unter anderem darin, mögliche Einflüsse von Industrie-4.0-Technologien auf eine Just-in-Time-/Just-in-Sequence-Belieferung sowie unternehmensübergreifende Kanban-Systeme zu identifizieren. Die Potenziale bei der Einführung von Industrie-4.0-Technologien sehen HOFMANN UND RÜSCH (2017) in einer Dezentralisierung, Selbstregulierung sowie Effizienz- und Transparenzsteigerung der Logistikprozesse. Der Betrachtungsrahmen des Fachbeitrags beschränkt sich auf logistikorientierte Konzepte, wogegen Interdependenzart und -intensität nicht einbezogen wurden.

MRUGALSKA UND WYRWICKA (2017) erforschten potenzielle Synergieeffekte zwischen ausgewählten Lean- und Industrie-4.0-Elementen. Um die Wirkbeziehungen zu analysieren, verwendeten die Autorinnen Beispiele aus wissenschaftlichen Veröffentlichungen, die die Beziehungen von Industrie-4.0-Technologien und Lean-Methoden beschreiben. So ermöglichen beispielsweise Smart Products durch eine fortwährende Erhebung und unmittelbare Analyse von Daten eine Prozessverbesserung, wogegen intelligente Maschinen Kanban-Signale in Echtzeit auslösen und somit Logistikprozesse transparent und effizient gestalten können. Der Anwendungsfall eines Smart Operators soll die Zeit zwischen dem Auftreten einer Störung und deren Meldung verkürzen. Die Störung wird mithilfe von Smart Devices unmittelbar an die Mitarbeitenden rückgemeldet. Die Mitarbeitenden erhalten beispielsweise in Echtzeit Informationen zum Fehlerort sowie einen detaillierten Fehlerbericht, um Maßnahmen einzuleiten. Darüber hinaus können Anomalien im Herstellungsprozess durch cyber-physische Systeme erkannt und automatisch Gegenmaßnahmen von anderen CPS ergriffen werden. Somit präsentieren die Autorinnen Beispiele zu möglichen Synergieeffekten zwischen Lean- und Industrie-4.0-Elementen, die als Ausgangsbasis für tiefergehende Analysen (siehe Abschnitt 5.2.3) verwendet werden können.

SATOGLU ET AL. (2017) untersuchten die Wechselwirkungen zwischen zehn Lean-Production-Methoden und sieben Industrie-4.0-Technologien. Dabei zielte die Forschungsarbeit auf die Konzeptionierung einer automatisierungsorientierten Lean-Production-Anwendung im Kontext von Industrie 4.0 ab. Die Autor*innen untersuchten zudem die Auswirkungen von Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien auf die sieben Verschwendungsarten (siehe Abschnitt 2.1.2). Sie konnten einen positiven Einfluss auf die Reduktion von Verschwendung in der Produktion durch das Zusammenwirken beider Produktionsparadigmen aufzeigen. Eine umfassende Betrachtung der Wirkbeziehungen zwischen Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien erfolgte in der Publikation nicht.

WAGNER ET AL. (2017) stellen über eine Matrix die Einflüsse von ausgewählten Industrie-4.0-Technologien auf Lean-Production-Methoden dar. Die Industrie-4.0-Technologien sind in einer Einflussmatrix in die Kategorien Datenakquise und -verarbeitung, Maschine-zu-Maschine-Kommunikation und Mensch-Maschine-Interaktion untergliedert. Insgesamt wurden die Beziehungen zwischen acht Industrie-4.0-Technologien und elf Lean-Production-Methoden analysiert und deren eindimensionale Wirkintensität wurde mithilfe einer Likert-Skala bewertet. Abschließend wurden ein Anwendungsfall eines cyber-physischen Just-in-Time-Systems und dessen Vorteile in einem Automobilunternehmen aufgezeigt. Eine Unterscheidung der Interdependenzarten wurde in diesem Fachbeitrag nicht vorgenommen. Allerdings dient die in der Publikation aufgeführte Analyse der Interdependenzintensität als Ausgangsbasis für weiterführende Untersuchungen.

FISCHER UND KÖBLER (2018) nehmen in ihrer Forschungsarbeit Bezug auf die Hypothese, dass der Lean-Production-Ansatz eine essenzielle Grundlage für die Einführung von Industrie-4.0-Technologien darstellt. Hierbei untersuchten sie den Einfluss von fünf Lean-Prinzipien auf elf Industrie-4.0-Technologien. Die Analyse basierte auf einer Delphi-Studie mit Expertinnen und Experten, die die Interdependenzen zwischen Lean Production und Industrie 4.0 unter Anwendung einer fünfstufigen Likert-Skala bewerteten. Das Ergebnis zeigt, dass die Lean-Production-Prinzipien einen überwiegend positiven Einfluss auf die Industrie-4.0-Technologien nehmen und Lean Production eine relevante Implementierungsbasis von Industrie-4.0-Technologien in der Produktion darstellt. Während die Publikation die Intensität der Interdependenz zwischen ausgewählten Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien aufzeigt, wurde darin die Art der Interdependenzen nicht weiter analysiert.

KOLBERG (2018) befasste sich in seiner Dissertation mit der Entwicklung einer einheitlichen informationstechnischen Schnittstelle für Lean-Methoden. Die daraus resultierende Referenzarchitektur schafft einen Rahmen, um die Methoden durch digitale Technologien zu erweitern. Die Generierung der Referenzarchitektur besteht aus nachfolgenden vier Schritten: Lean-Methoden sammeln und bewerten, Anforderungen analysieren, Systemarchitektur und Informationsmodell konzipieren sowie Schnittstellenarchitektur entwickeln (KOLBERG 2018, S. 64 ff.). Die Bewertung der Lean-Methoden erfolgt hinsichtlich ihrer Eignung zur Digitalisierung. Nach KOLBERG (2018, S. 68) steigt die Kompatibilität einer Lean-Methode für deren Digitalisierung, je eindeutiger sie Verantwortlichkeiten definiert und Prozesse beschreibt. Dieses Merkmal erfüllen insbesondere die Methoden Andon, Kanban, 8D-Report, Milkrun, One-Piece-Flow, Schnellrüsten und Supermarkt (KOLBERG 2018, S. 69). Anschließend werden die Bestandteile der Referenzarchitektur festgelegt, die sich aus der Systemarchitektur, dem Informationsmodell der Schnittstelle und der Schnittstellenarchitektur zusammensetzen (KOLBERG 2018, S. 85 ff.). Der Autor hat somit eine übergeordnete Referenzarchitektur und eine Bewertungsmöglichkeit für Lean-Methoden entwickelt. Allerdings fand keine detaillierte Analyse der Interdependenzarten und -intensitäten, wie sie für die Ableitung einer Lean-4.0-Implementierungsstrategie erforderlich ist, statt.

MAYR ET AL. (2018) resümieren, dass es in der bestehenden Fachliteratur an einer umfassenden und detaillierten Betrachtung der Interdependenzen zwischen Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien mangelt. Daher untersuchten die Autoren die Wirkverknüpfung zwischen zehn Lean-Methoden und zwölf Industrie-4.0-Technologien. In der Publikation wurden die Einflüsse von Industrie-4.0-Technologien auf die Lean-Production-Methoden Just-in-Time, Heijunka, Kanban, Wertstromplanung, Total Predictive Maintenance, visuelles Management, SMED und Poka Yoke analysiert. Hierbei

wurde aufgezeigt, wie der gezielte Technologieeinsatz die genannten Methoden unterstützen kann. Abschließend betonen die Autoren, dass sich zukünftige Forschungsarbeiten auf die weitere Untersuchung des Lean-4.0-Ansatzes als eines ganzheitlichen Konzepts konzentrieren sollten. Zudem gilt es, die Interdependenzen für zusätzliche Methoden und Technologien zu untersuchen. Die vorgestellten Ergebnisse dieses Fachbeitrags dienen als Basis für die Interdependenzanalyse in Abschnitt 5.2.3.

PRINZ ET AL. (2018) zeigen die Notwendigkeit der Lean-Production-Implementierung als Voraussetzung für die Einführung von Industrie-4.0-Technologien auf. Die Autoren verdeutlichen den Zusammenhang zwischen beiden Domänen und untersuchen die notwendige Prozessreife bei der Zusammenführung der Produktionsparadigmen. Dazu wird ein Lernfabrik-Ansatz mit unterschiedlichen Prozessreifegradausprägungen vorgestellt. Die Lernfabrik ist mit digitalen Assistenzsystemen als Teil von Industrie 4.0 ausgestattet, um die Auswirkungen von Industrie 4.0 auf die schlanke Produktion zu analysieren. Die Forschungsarbeit folgt der Hypothese, dass für eine erfolgreiche Implementierung von Industrie-4.0-Technologien die Produktionsprozesse schlank und effizient gestaltet sein müssen. Das Resultat zeigt, dass eine systematische und umfassende Lean-Production-Implementierung bereits erfolgt sein sollte, um eine höhere Effektivität bei der Einführung von Industrie-4.0-Technologien zu erreichen. Auf die tiefergehenden Interdependenzen zwischen einzelnen Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien wurde nicht eingegangen.

KOLLA ET AL. (2019) bewerteten den Stand der Forschung zu existierenden Lean- und Industrie-4.0-Reifegradmodellen und ordneten ausgewählten Lean-Methoden sowie Industrie-4.0-Technologien spezifische Merkmale von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) zu. Dabei wurden zunächst die Charakteristika von KMU mithilfe einer Literaturrecherche identifiziert. Als Resultat abstrahierten die Autoren neun Wesensmerkmale, die den Dimensionen Produkt, Strategie, Technologie, Kunde, Herstellung, Führung, Mitarbeitende, Lieferant und Kultur zugeordnet sind. Anschließend wurden ausgewählte Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien mit KMU-spezifischen Wesensmerkmalen verknüpft. Zusammenfassend zeigen KOLLA ET AL. (2019) in einer Matrix, wie Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien KMU-spezifischen Herausforderungen entgegenwirken können. Somit erfolgen eine Spezifizierung und Strukturierung der Methoden und Technologien, allerdings wurde keine Interdependenzanalyse vorgenommen.

PAGLIOSA ET AL. (2019) stellen die Wechselwirkungen zwischen Industrie-4.0-Technologien und Lean-Methoden dar. Insgesamt wurden auf der Basis einer systematischen Literaturrecherche neun Industrie-4.0-Technologien und 14 Lean-Methoden ermittelt. Durch eine Analyse der recherchierten Veröffentlichungen identifizierten PAGLIOSA ET AL. (2019) anschließend Intensitätsstufen zwischen Technologien und Methoden. Zu den

untersuchten Haupttechnologien zählen unter anderem das Internet der Dinge, CPS, Cloud-Technologie und Big Data. Die Lean-Methoden umfassen Kanban, Wertstromplanung, Poka Yoke und Kaizen. Die Interdependenzen zwischen den Technologien und Methoden bestimmten die Autoren, indem sie die Zitierhäufigkeit, die gemeinsame Anwendung der Industrie-4.0-Technologien mit Lean-Methoden sowie die Relevanz der Literaturbelege bewerteten und zueinander in ein Verhältnis setzten. Die Erkenntnisse der Forschungsarbeit fließen in die umfassende Interdependenzanalyse in Abschnitt 5.2.3 ein.

PEREIRA ET AL. (2019) präsentieren eine systematische Literaturanalyse, um zu untersuchen, wie Lean Production durch die Industrie-4.0-Implementierung profitieren kann. Die Analyse umfasste 230 Beiträge aus der Literatur und basierte auf den Datenbanken Web of Science und Scopus. Diese bildete die Grundlage für die Erarbeitung einer Korrelationsmatrix, in der der Einfluss von zehn Industrie-4.0-Technologien auf 21 Lean-Production-Methoden untersucht wurde. Dabei unterschieden die Autor*innen allerdings nicht nach der Art der Interdependenz oder deren Intensität.

ROSSINI ET AL. (2019) analysierten in ihrem Forschungsbeitrag den Zusammenhang zwischen Industrie-4.0-Technologien und Lean-Production-Methoden. Dabei führten ROSSINI ET AL. (2019) eine empirische Umfrage mit 108 produzierenden europäischen Unternehmen durch. Bei den Studienteilnehmenden handelte es sich um Unternehmen, die bereits Lean-Methoden in ihrer Produktion implementiert haben und diese gezielt durch Industrie-4.0-Technologien ergänzen. Die Ergebnisse zeigen analog zur Publikation von PRINZ ET AL. (2018), dass eine umfassende Implementierung von Lean-Production-Methoden in produzierenden Unternehmen eine Basis für die Einführung von Industrie-4.0-Technologien bildet. Die Interdependenzen wurden dabei nicht detailliert untersucht.

CIANO ET AL. (2020) führten eine Fallstudie mit acht produzierenden Unternehmen durch, um die Wirkbeziehungen zwischen ausgewählten Lean- und Industrie-4.0-Elementen zu analysieren. Hierbei wurde der Einfluss von Lean-Production-Methoden auf Industrie-4.0-Technologien und vice versa untersucht. Auf der Grundlage dieser empirischen Studie erarbeiteten CIANO ET AL. (2020) ein Rahmenmodell zur Strukturierung der Wirkbeziehungen zwischen den beiden Produktionsdomänen. Das Modell untergliedert die Wertschöpfungskette in die sechs Bereiche Lieferantenbeziehung, Fertigungsanlagen und -verfahren, Betriebsführung, Personalmanagement, Produktentwicklung und Kundenbeziehungen. Das Rahmenmodell soll die Abhängigkeiten zwischen Lean Production und Industrie 4.0 auf Konzeptebene verdeutlichen und Synergiemöglichkeiten auf Detailebene aufzeigen. Die Arbeit liefert einen Einblick in die Wirkbeziehungen zwischen den Lean-Methoden und den Industrie-4.0-Technologien, sollte allerdings nach Meinung der Autor*innen durch weitere Studien und Expert*innen-Befragungen erweitert und validiert werden.

DEUSE ET AL. (2020) veröffentlichten in ihrer Arbeit einen Ansatz zur Verknüpfung von Lean-Methoden mit Industrie-4.0-Technologien. Dieser Ansatz entstammt dem BMBF-geförderten Forschungsprojekt ‚GaProSys 4.0‘, das das Ziel verfolgt, Methoden eines ‚Ganzheitlichen Produktionssystems 4.0 (GPS 4.0)‘ sowie eine Auswahlssystematik für KMU zu entwickeln. Dabei wurden zunächst KMU-spezifische Anforderungen an einen GPS-4.0-Methodenkatalog abgeleitet und Synergien zwischen Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien untersucht. Darauf basierend erfolgte die Ableitung von Methoden für ein GPS und die Entwicklung einer Auswahlmethodik. *DEUSE ET AL. (2020)* präsentieren in ihrer Publikation exemplarisch einen Jidoka-4.0-Methodensteckbrief, der den Einfluss auf die vier Zielgrößen Qualität, Kosten, Zeit und Flexibilität sowie die Beschreibung eines Anwendungsfalls enthält, bei dem es um die Vorhersage der Qualität des Endprodukts einer Produktionslinie für oberflächenmontierte Geräte geht. Weitere GPS-4.0-Methoden oder die Auswahlmethodik wurden von den Autoren nicht bereitgestellt.

SHAHIN ET AL. (2020) bieten einen Überblick zu den Korrelationen zwischen Lean- und Industrie-4.0-Elementen und untersuchten die Auswirkungen auf die operative Leistungsfähigkeit von Fabriken. Zudem wurden potenzielle Verbesserungen der Lean-Production-Methoden, die durch Industrie-4.0-Technologien wie drahtlose Netzwerke, Big Data, Cloud-Nutzung und virtuelle Realität ermöglicht werden, erforscht. Abschließend wird ein cloudbasiertes Kanban-System als Lean-4.0-Anwendungsfall vorgestellt. Die Art und die Intensitäten der Interdependenzen zwischen Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien wurden in der Forschungsarbeit nicht tiefergehend untersucht.

VALAMEDE UND AKKARI (2020) präsentieren einen Ansatz, wie Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien miteinander verknüpft werden können. Dabei wurden insbesondere die Lean-Methoden Just-in-Time, Kanban, Poka Yoke, visuelles Management, Kaizen und TPM untersucht. Das Vorgehen bestand in einer explorativen und deskriptiven Studie, die auf einer dreistufigen Vorgehensweise beruhte (Observation, Kategorisierung und Assoziation). Für die Stufe der Assoziation wurde eine Beziehungsmatrix erstellt. *VALAMEDE UND AKKARI (2020)* zeigen, dass für jede betrachtete Industrie-4.0-Technologie mindestens zwei Beziehungen zu Lean-Methoden hergestellt werden können. Zudem präsentieren die Autorinnen sechs Lean-4.0-Methoden, die sie mit Attributen beschreiben. Die Interdependenzart und -intensität wurden in der Arbeit nicht tiefergehend analysiert.

GHOUAT ET AL. (2021) untersuchten den Einfluss von 15 Industrie-4.0-Technologien auf ausgewählte Lean-Prinzipien und -Ziele. Dabei wurden insbesondere Ziele wie Reduktion der Durchlaufzeit oder Erhöhung der Gesamtanlageneffektivität durch eine Optimierung der Informationsflüsse unterstützt. *GHOUAT ET AL. (2021)* resümieren in ihrem Fazit, dass sich eine echtzeitfähige Vernetzung von Maschinen, Produkten und Menschen im Sinne

eines cyber-physischen Produktionssystems positiv auf die Entscheidungsfindung und somit auf die Erreichung produktionsrelevanter Zielstellungen auswirkt. Eine weiterführende Interdependenzanalyse zwischen den Methoden und Technologien erfolgte nicht.

JAVOID ET AL. (2021) präsentieren eine Studie, die Anwendungsszenarien von Lean 4.0 aufzeigt und Lean-Methoden gezielt mit Industrie-4.0-Technologien kombiniert. Insgesamt beschreiben die Autor*innen die Kombination von fünf Lean-Methoden mit jeweils einer Industrie-4.0-Technologie. Zu den daraus resultierenden Lean-4.0-Methoden zählt die Verknüpfung aus Autonomation und cyber-physischen Systemen, die zu einer intelligenten, autonomen Steuerung der Maschinen und Anlagen führen soll. Des Weiteren wird das Just-in-Time-Prinzip in einer digitalen Wertschöpfungskette oder Heijunka in Kombination mit Big Data und Analytics beschrieben. Zudem bergen die Kombinationen aus TPM mit AR-Technologien sowie Wertstrommanagement mit RFID-Technologien signifikante Wettbewerbsvorteile für produzierende Unternehmen. Ergänzend wurde mithilfe einer Literaturanalyse der positive Einfluss der Lean-4.0-Methoden auf 14 Anwendungen und Zielgrößen, beispielsweise Reduktion von Verschwendung, Erhöhung der Produktivität, Echtzeitinformation oder digitale Information, untersucht und aufgezeigt. Die Analyse der Interdependenzarten und -intensität oder eine weiterführende Spezifikation erfolgten durch die Autor*innen nicht.

MARINELLI ET AL. (2021) untersuchten die Kombination aus Industrie-4.0-Technologien und Lean-Production-Methoden. Basierend auf einer Literaturanalyse wurden 44 Fachleute aus produzierenden Unternehmen befragt. Die Expert*innen eint, dass sie bereits erfolgreich Industrie-4.0- und Lean-Production-Projekte in produzierenden Unternehmen implementiert haben. Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere die Technologien Echtzeitdaten, Internet der Dinge, Big Data, cyber-physische Systeme oder prädiktive Algorithmen Lean-Production-Methoden wie Fließprinzip, Kanban, TPM oder KVP unterstützen. Es werden beispielsweise Echtzeitdaten verwendet, um den kontinuierlichen Fluss in der Produktion zu steuern, oder es wird eine IoT-Infrastruktur implementiert, die den Datenaustausch zwischen der Shopfloorebene und anderen Abteilungen verbessert. Die Autor*innen heben in ihrem Fazit hervor, dass die befragten Expert*innen von einer positiven Wechselwirkung zwischen den beiden Produktionsdomänen überzeugt sind. Allerdings bedürfe es weiterer Untersuchungen, um die potenziellen Vorteile einer Lean-4.0-Implementierung in produzierenden Unternehmen umfassend aufzuzeigen.

NEDJWA ET AL. (2022) untersuchten in ihrer Veröffentlichung mögliche Synergieeffekte zwischen Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien. Hierfür wurde eine bibliometrische Literaturrecherche mithilfe der Software VOSviewer für den Zeitraum von 2011 bis 2020 basierend auf der Literaturdatenbank Web of Science durchgeführt. Erweitert wurde

diese Recherche um eine zusätzliche Literaturanalyse basierend auf der Datenbank Google Scholar. Insgesamt untersuchten NEDJWA ET AL. (2022) die Wirkbeziehung zwischen 38 Lean-Production-Methoden und 15 Industrie-4.0-Technologien und leiteten daraus Lean-4.0-Methoden ab. Eine eingehende Untersuchung der Interdependenzart und -intensität zwischen den Methoden und Technologien erfolgte im Rahmen der Publikation nicht. Dennoch dienen die Erkenntnisse als Eingangsgrößen für weiterführende Analysen.

Es sei angemerkt, dass neben den vorgestellten wissenschaftlichen Arbeiten noch weitere Forschungsbeiträge existieren, die sich mit der Wirkbeziehung zwischen Lean Production und Industrie 4.0 befassen (EJSMONT ET AL. 2020, S. 21). Diese Arbeiten untersuchten die Interdependenzen auf einer konzeptionellen Ebene, um beispielsweise die zugrunde liegende Philosophie oder den Ansatz miteinander zu vergleichen. Exemplarisch sind hier die Arbeiten von BUER ET AL. (2018), METTERNICH ET AL. (2017) oder STEVEN UND KLÜNDER (2018) zu nennen (siehe Abschnitt 2.3.2).

Zwischenfazit: Mit Blick auf die in diesem Abschnitt vorgestellten Veröffentlichungen kann festgehalten werden, dass bereits Publikationen existieren, die die Interdependenzen zwischen Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien auf Detailebene untersucht haben. Allerdings fehlt es an einer notwendigen Differenzierung zwischen der Interdependenzart und -intensität, um daraus gezielt Lean-4.0-Implementierungsstrategien ableiten zu können. Des Weiteren wurden die Wirkbeziehungen nur einseitig betrachtet, da keine der vorgestellten Veröffentlichung den Einfluss der Produktionsdomänen in bidirektionaler Form untersuchte. Für die vorliegende Problemstellung, bei der Ursachen-Wirkungs-Zusammenhänge und zeitliche Abhängigkeiten den systemischen Charakter von Lean 4.0 erzeugen, gilt es, die Interdependenzen in bidirektionaler Richtung zu betrachten. Abschließend bleibt festzuhalten, dass nur wenige Autor*innen, beispielsweise CIANO ET AL. (2020) oder PEREIRA ET AL. (2019), mehrere Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien in ihren Arbeiten untersuchten. Die weiteren Publikationen beschränkten sich vornehmlich auf die Analyse der Wirkbeziehungen zwischen einzelnen ausgewählten Lean-Prinzipien (siehe Abbildung 2-2) und den übergeordneten Industrie-4.0-Technologiefeldern (siehe Abbildung 2-3) und berücksichtigten keine Auswirkungen der Einführung von Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien auf produktionsrelevante Zielgrößen. In Abschnitt 3.4 erfolgt eine zusammenfassende Bewertung und Gegenüberstellung der vorgestellten Forschungsarbeiten basierend auf den Bewertungskriterien aus Abschnitt 3.1, um daraus potenzielle Handlungsbedarfe abzuleiten.

3.3 Implementierungsansätze

Um einen Überblick über den aktuellen Stand der Lean-4.0-Implementierungsstrategien zu geben, sollen zunächst die bestehenden Einführungsstrategien aus dem Bereich Lean Production (siehe Abschnitt 3.3.1) und Industrie 4.0 (siehe Abschnitt 3.3.2) vorgestellt werden. Anschließend erfolgt in Abschnitt 3.3.3 die Analyse verschiedener Lean-4.0-Implementierungsansätze. Die gewonnenen Erkenntnisse werden je Abschnitt in einem Zwischenfazit zusammengefasst. Die abschließende detaillierte Bewertung der Fachpublikationen zur Identifikation eines möglichen Forschungsdefizits wird in Abschnitt 3.4 vorgenommen.

3.3.1 Lean-Production-Implementierungsansätze

Gemäß LIKER (1998, S. 7) ist das TPS und somit Lean Production ein ganzheitliches System und keine Ansammlung einzelner isolierter Tätigkeiten. Dieser Meinung schließt sich eine Vielzahl von Autor*innen an, beispielsweise SHINGŌ (1992), ŌNO (2008) oder DOMBROWSKI UND MIELKE (2015). Dabei stimmen die Autor*innen darin überein, dass Lean-Methoden nur im systematischen Verbund erfolgreich implementiert werden können. Es gilt, die Wirkbeziehungen zu verstehen und die eingesetzten Methoden auf die Ausgangssituation und die Gegebenheiten des jeweiligen Unternehmens abzustimmen (AULL 2012, S. 82). Nachfolgend werden daher methodenbasierte Lean-Implementierungsansätze vorgestellt, die eine holistische Einführung verfolgen.

MONDEN (2011) präsentiert eine erfahrungsbasierte Lean-Production-Implementierungsstrategie, um den Zusammenhang von Lean-Methoden zur Erreichung ausgewählter Unternehmensziele aufzuzeigen. Zur angestrebten Steigerung des Unternehmensgewinns gilt es gemäß MONDEN (2011, S. 3), die Zielstellungen in den Bereichen Bestandsreduktion, Qualitätssicherung und der Achtung vor dem Menschen zu erfüllen. Für das Erreichen dieser Ziele verfolgte der Autor einen Bottom-up-Ansatz, der auf den Wirkbeziehungen von Lean-Production-Methoden beruhte (MONDEN 2011, S. 4). Eine schematische Darstellung des Vorgehensplans wird in der folgenden Abbildung 3-2 gezeigt. Die Vorgehensweise umfasste die systematische Einführung von 18 Lean-Elementen, die ausgehend von Kaizen zur Verbesserung der Zielgrößen Gewinnerhöhung und Achtung vor dem Menschen führen. Gemäß den Autoren BUSSE (2017, S. 112) und AULL (2012, S. 84) bietet die Forschungsarbeit von MONDEN (2011) eine gute Übersicht zur systemischen Implementierung von Lean-Production-Methoden in der Produktion und zu deren Auswirkung auf die Zielgrößen. Allerdings fehlt es an einer Differenzierung der Interdependenzart sowie -intensität zwischen den einzelnen Lean-Production-Methoden. Darüber hinaus wurde der zeitliche Implementierungsverlauf bei der Einführung der Methoden nicht angegeben.

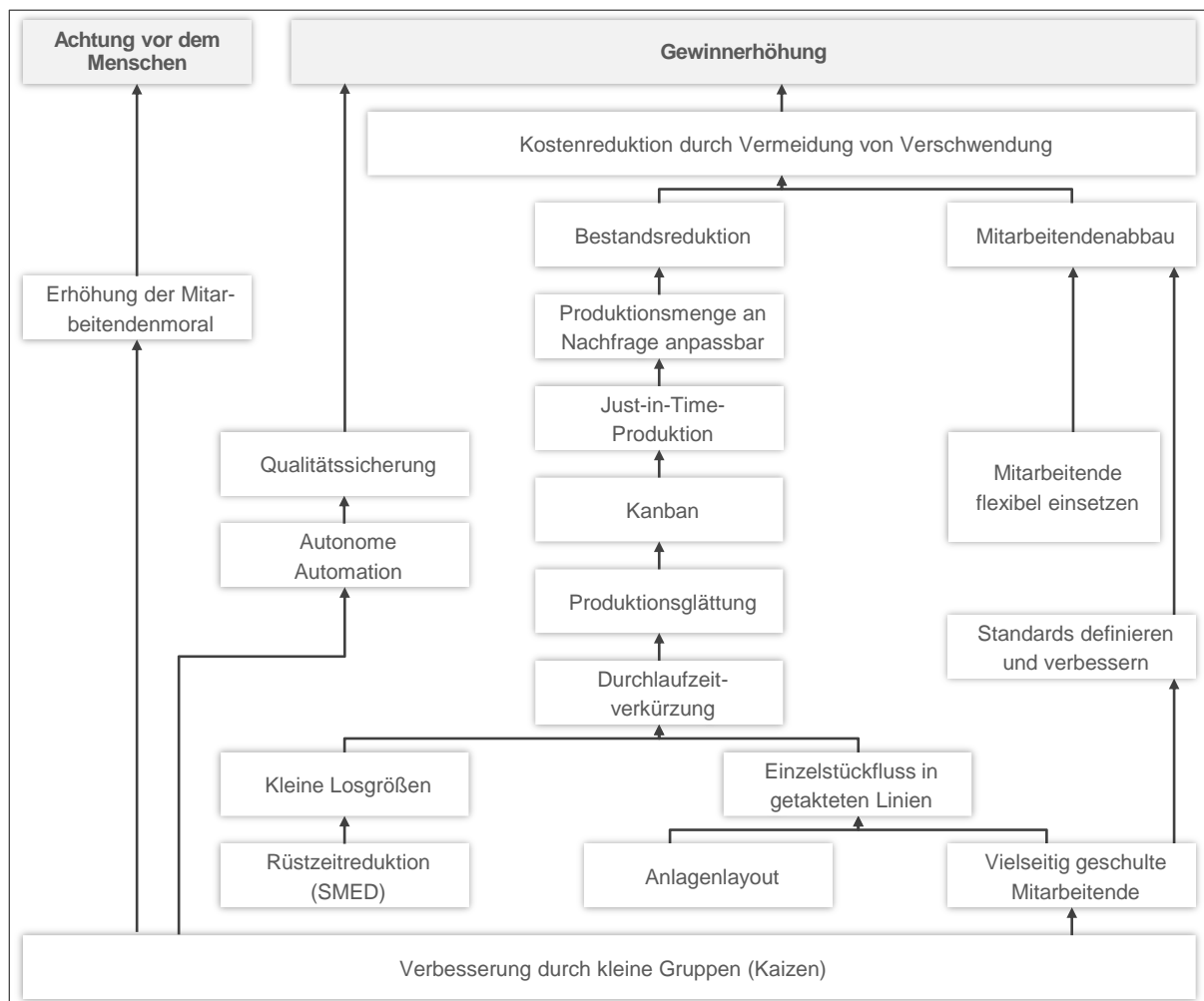


Abbildung 3-2: Einführung von Lean Production in Anlehnung an MONDEN (2011, S. 4)

AULL (2012) erarbeitete in seiner Dissertation ebenfalls eine Lean-Production-Implementierungsstrategie. Ausgehend von den Wirkbeziehungen zwischen 18 ausgewählten Lean-Methoden entwickelte der Autor ein System-Dynamics-Modell zur Ableitung von Implementierungsreihenfolgen. Hierfür generierte er mithilfe einer Literaturanalyse sowie unter Anwendung einer Delphi-Studie mit Expertinnen und Experten eine Lean-Production-Interdependenzmatrix (siehe Anhang B), die die Wirkzusammenhänge der Lean-Production-Methoden beschreibt. Im Zuge der Interdependenzanalyse wurde zwischen unterstützenden und voraussetzenden Methoden unterschieden. Zusätzlich wurde der Einfluss der Lean-Production-Methoden auf die produktionsrelevanten Zielgrößen Zeit, Kosten und Qualität in einer Interdependenzmatrix hinterlegt. Aus den Interdependenzen leitete AULL (2012, S. 159 ff.) ein System-Dynamics-Modell ab, das die Einflüsse unterschiedlicher Implementierungsstrategien auf die Zielgrößen simuliert. Mithilfe verschiedener Parameter kann das Simulationsmodell zudem in begrenztem Umfang an Unternehmensprofile angepasst werden. Die Abbildung 3-3 zeigt exemplarisch eine Lean-Production-Einführungsreihenfolge, die gemäß den hinterlegten Interdependenzen in sechs Phasen unterteilt ist. Eine Implementierungsdauer der Methoden ist nicht hinterlegt.

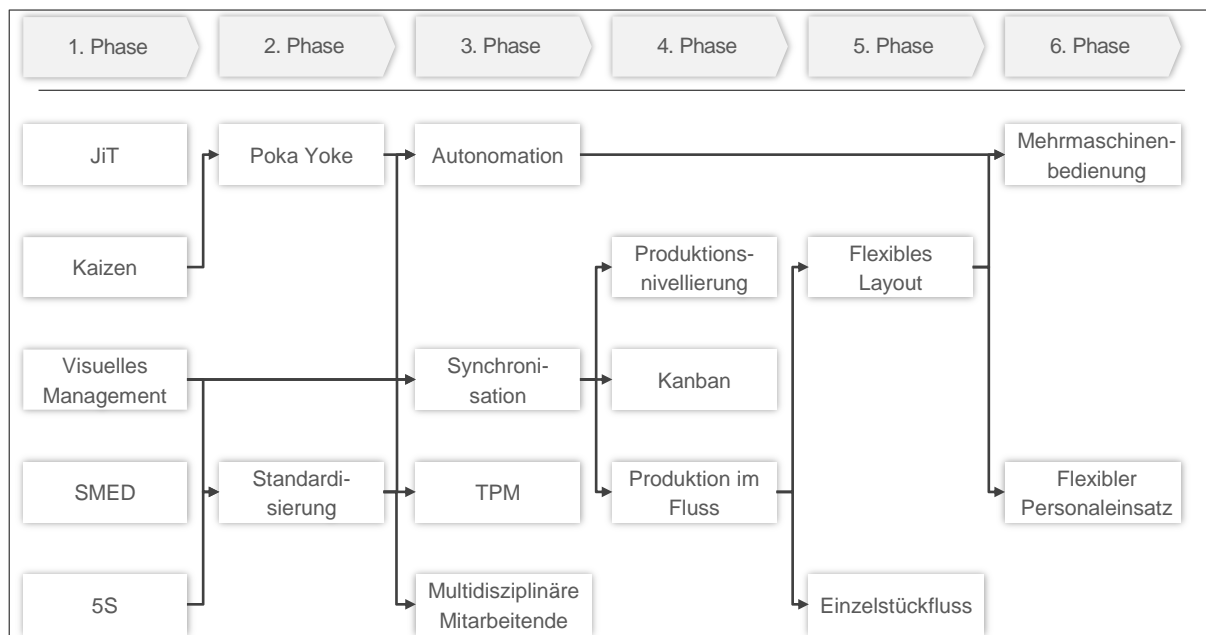


Abbildung 3-3: Exemplarische Lean-Implementierungsreihenfolge in Anlehnung an AULL (2012, S. 181)

TAKEDA (2013) erarbeitete einen schrittweisen Ansatz zur Lean-Production-Einführung mit dem Zielbild eines synchronen Produktionssystems, das die Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen nachhaltig sichert. Dabei gilt es, die Lean-Production-Methoden systemisch und unter Berücksichtigung ihrer Wirkbeziehungen in zwölf Schritten zu implementieren. Die Einführungsreihenfolge kann produzierenden Unternehmen als Orientierungshilfe dienen und wurde unabhängig vom vorherrschenden Implementierungsstand oder weiteren unternehmensspezifischen Merkmalen wie dem Produktionsprinzip oder der Unternehmensgröße abgeleitet. Als zentrales Wesenselement der Lean-Production-Implementierung identifizierte TAKEDA (2013) den Respekt vor dem Menschen. Dieser stellt die Grundlage für eine erfolgreiche Einführung von Lean Production dar. Nach Einführung der 5S-Methode gilt es, die Produktion durch die Methoden Einzelstückfluss, Fließfertigung, Verkleinerung der Losgrößen sowie Adressieren von Stellflächen in Pufferzonen und Supermärkten zu nivellieren. Dies bildet die Grundlage für die Glättung der Produktion, die aus getakteten Arbeitsstationen mit entsprechendem Stückzahlenmanagement und standardisierten Arbeitsabläufen hervorgeht. Zuletzt werden in der Einführungsreihenfolge die Elemente Produktqualität, Anlagen und Kanban genannt. Diese zwölf Lean-Production-Elemente sollen im Zusammenwirken eine leistungsfähige, synchrone und automatisierte Produktion ermöglichen. Das Konzept von TAKEDA (2013) stellt nach BUSSE (2017, S. 113) eine mögliche Ergänzung bei der Implementierung von Lean-Production-Methoden in der Produktion dar. Es fehlt allerdings die Möglichkeit, unternehmensspezifische Merkmale bei der Ableitung der Implementierungsreihenfolge zu berücksichtigen.

Zwischenfazit: In Ergänzung zu den aufgeführten methodenorientierten Lean-Production-Implementierungsansätzen können weitere wissenschaftliche Arbeiten, beispielsweise von SHINGŌ (1989) oder BUSSE (2017), aufgeführt werden. Diesen Fachbeiträgen fehlt es allerdings an einem klaren Umsetzungsplan von Lean-Production-Methoden, weshalb sie für die vorliegende Arbeit nicht berücksichtigt werden. Es ist zudem festzuhalten, dass die Anzahl an Fachpublikationen zur Implementierung von Lean Production in der Produktion abnimmt und keine weiteren methodenbasierten Implementierungsansätze veröffentlicht wurden. Die Dissertation von AULL (2012) bietet eine relevante konzeptionelle sowie inhaltliche Grundlage für die angestrebte Forschungsarbeit (siehe Abschnitt 5.2.1). AULL (2012) hat in seinem systemdynamischen Lean-Production-Implementierungsmodell neben Ursachen-Wirkungs-Beziehungen auch Rückkopplungseffekte berücksichtigt, die auf eine umfassende Interdependenzanalyse (siehe Anhang B) von Lean-Production-Methoden zurückzuführen sind.

3.3.2 Industrie-4.0-Implementierungsansätze

Neben den im obigen Abschnitt aufgeführten methodenbasierten Lean-Production-Implementierungsstrategien beschäftigten sich ebenfalls diverse wissenschaftliche Autor*innen mit der Einführung des Industrie-4.0-Ansatzes in produzierenden Unternehmen. Die Publikationen unterscheiden sich dabei in der gewählten Detailtiefe. Während Autor*innen wie ANDERL ET AL. (2016) oder SCHUH ET AL. (2018) ein übergeordnetes Phasenmodell entwickelten, fokussierten sich LIEBRECHT (2020) oder LANGLOTZ UND AURICH (2021) auf die strukturierte Einführung des Industrie-4.0-Ansatzes auf Technologieebene. Da es sich bei Industrie 4.0 um eine vergleichsweise junge Forschungsdomäne handelt und die technologiebasierten Implementierungsstrategien oftmals auf den übergeordneten Phasenmodellen beruhen, werden zur Sicherstellung einer ganzheitlichen Betrachtung nachfolgend sowohl phasen- als auch technologiebasierte Implementierungsstrategien vorgestellt. Die ausgewählten wissenschaftlichen Fachbeiträge resultieren dabei aus einer umfangreichen Literaturanalyse in der Literaturdatenbank Scopus.

ANDERL ET AL. (2016) beschreiben in ihrem Leitfaden die übergeordneten Implementierungsphasen von Industrie 4.0. Der Leitfaden setzt sich aus der Vorbereitungs-, Analyse-, Kreativitäts-, Bewertungs- und Einführungsphase zusammen. Als Ausgangsbasis nennen die Autor*innen die Veränderungsbereitschaft und die Vision der Führungsebene, die Bildung eines Projektteams sowie das notwendige Marktverständnis für die Generierung neuer Geschäftsmodelle. Darauf aufbauend soll eine umfassende Wissensbasis im Unternehmen geschaffen werden (Vorbereitungsphase) und die Kernkompetenzen des Unternehmens (Analysephase) sollen untersucht werden. Daraus werden potenzielle neue

Geschäftsmodelle und Verbesserungsprojekte abgeleitet und beurteilt (Bewertungsphase), die es final umzusetzen gilt (Einführungsphase). Eine Betrachtung von Industrie-4.0-Technologien und deren Implementierungsreihenfolgen fand in dieser Arbeit nicht statt.

MORLOCK ET AL. (2016) präsentieren ein reifegradbasiertes Vorgehensmodell, das produzierende Unternehmen bei der Transformation ihrer Produktionssysteme in cyber-physische Produktionssysteme unterstützen soll. Dabei werden die Auswirkungen auf die Reifegraddimensionen Technik, Organisation und Mensch untersucht. Anschließend werden die einzelnen Dimensionen zu einem Gesamtreifegrad subsumiert. Nach der strukturierten, reifegradbasierten Festlegung des unternehmensindividuellen Soll-Zustands kann der Handlungsbedarf abgeleitet werden. Der Transformationsprozess vom Ist- zum Soll-Zustand wird iterativ durchgeführt, bis der unternehmensspezifische Zielreifegrad erreicht ist. Wechselwirkungen zwischen den drei Dimensionen (Mensch, Technik und Organisation) werden bei der Umsetzung zwar berücksichtigt, eine detailliertere Betrachtung auf Technologieebene erfolgt nicht.

HANSCHKE (2018) erarbeitete ähnlich wie *ANDERL ET AL. (2016)* einen Leitfaden zur systematischen digitalen Transformation im Sinne von Industrie 4.0. Die veröffentlichte Implementierungsstrategie umfasst fünf Schritte: digitale Stoßrichtung, Geschäftsmodell, digitale Roadmap, agile Umsetzung sowie Controlling und Enabling. Der Leitfaden folgt in seinen Grundzügen einem Top-down-Ansatz, der von der Unternehmensvision ausgeht, auf deren Basis die digitale Stoßrichtung bestimmt und den Mitarbeitenden kommuniziert. Zentrales Wesensmerkmal stellt eine Roadmap dar, die für den systemischen digitalen Transformationsprozess leitend ist (*HANSCHKE 2018, S. 142*). Zudem werden auf Basis eines Soll-Ist-Abgleichs Handlungsfelder identifiziert und Lösungsansätze abgeleitet, deren Zielerreichung im Controlling überprüft wird. Die Publikation beschränkt sich dabei auf übergeordnete Projektphasen; eine Untersuchung von Industrie-4.0-Technologien und deren Interdependenzen wurde nicht durchgeführt.

SCHUH ET AL. (2018) stellen in ihrer Publikation ebenfalls einen phasenorientierten Ansatz für die Industrie-4.0-Einführung vor. Im Vergleich zu den vorhergehenden Autor*innen ist der Implementierungsleitfaden nach *SCHUH ET AL. (2018)* zusätzlich durch Meilensteine erweitert, die als Qualitätsprüfpunkte sowie zur Abwägung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses dienen. Der Ablauf ist in *Abbildung 3-4* aufgeführt und beginnt mit der Schaffung der Awareness (dt. Bewusstsein) im Unternehmen für Industrie 4.0. Der Bewusstseins-schaffung folgen die Phasen der Ideengenerierung, der Konzeptentwicklung, der Ausarbeitung, der Pilotierung, sowie das Rollout. Analog zu den vorangegangenen Arbeiten fokussiert sich diese Veröffentlichung auf die übergeordneten Implementierungsphasen und bietet so einen Rahmen für die Einführung von Industrie-4.0-Technologien.

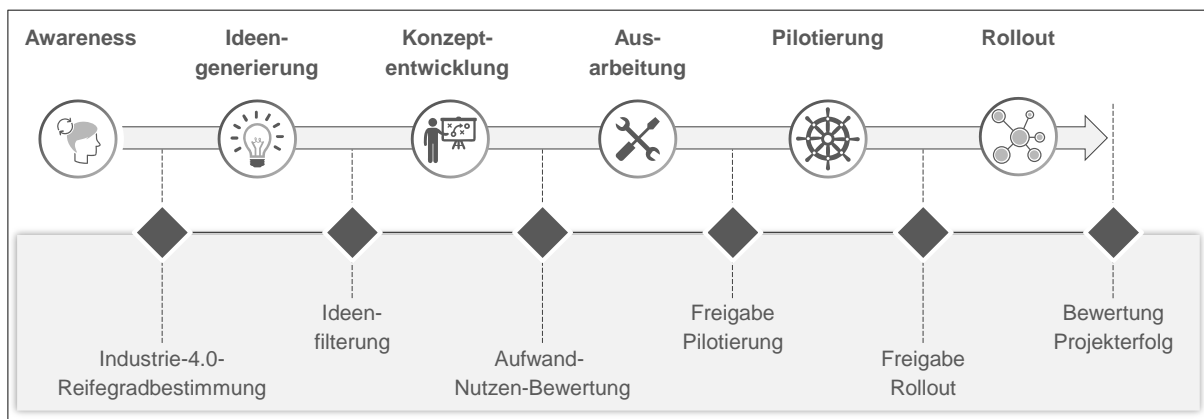


Abbildung 3-4: Industrie-4.0-Implementierungsprozess in Anlehnung an SCHUH ET AL. (2018, S. 21)

LANZA UND NYHUIS (2018) präsentieren ein Vorgehensmodell namens ‚Intro 4.0‘ zur Einführung von Industrie 4.0 in KMU, das auf den Erkenntnissen von vorangegangenen Forschungs- sowie industriellen Anwendungsprojekten beruht. Der ausgearbeitete Handlungsleitfaden ist in die vier Schritte Initiative (1), Industrie-4.0-Assessment (2), Methodenspezifikation und Risiko-Potenzialanalyse (3) sowie Implementierung (4) untergliedert. Die Autor*innen präsentieren darin eine Industrie-4.0-Methodentoolbox, die allerdings nicht weiter spezifiziert wird. Zudem werden erste Ansätze zur Analyse der Wirkzusammenhänge und zur Bewertung von Produktionssystemen vorgestellt, die in die Dissertation von LIEBRECHT (2020) einfließen. Die vorgestellten Ansätze dienen als Ausgangspunkt für weitere Forschungsarbeiten. Eine detaillierte Betrachtung der Interdependenzen erfolgte in der Publikation von LANZA UND NYHUIS (2018) nicht.

SCHUH ET AL. (2020) entwickelten einen auf produzierende Unternehmen ausgerichteten Industrie-4.0-Maturity-Index. Dieses Reifegradmodell umfasst vier zentrale Gestaltungsfelder in Form von Ressourcen, Organisationsstruktur, Informationssystem und Kultur. Jedes Feld beinhaltet zwei Prinzipien, die sich durch mehrere Fähigkeiten beschreiben lassen. Diese Fähigkeiten werden jeweils mit einem unternehmensindividuellen sechsstufigen Industrie-4.0-Reifegrad bewertet. Ausgehend von der Unternehmensstrategie und der angestrebten Zielsetzung wird anschließend eine unternehmensindividuelle Industrie-4.0-Implementierungs-Roadmap abgeleitet. Eine Analyse der einzelnen Industrie-4.0-Technologien sowie die Untersuchung der Interdependenzen fanden nicht statt.

MATT ET AL. (2020) präsentieren ein Vorgehensmodell, das insbesondere KMU bei der Identifikation, Bewertung und Einführung von Industrie-4.0-Konzepten unterstützen soll. Anhand des Modells durchlaufen die Unternehmen die fünf Stufen Information und Bewusstsein, Anforderungen, Selbstbewertung, Potenzialanalyse und Implementierungsplan. Die Selbstbewertung basiert auf einem Reifegradmodell, in dem die mittelfristig gewünschten Zielreifegrade angegeben werden können. Zudem besteht die Möglichkeit, die einzelnen

Industrie-4.0-Maßnahmen individuell zu gewichten. Der Unterschied zwischen Ist- und Soll-Zustand sowie das in Schritt 4 identifizierte Potenzial werden in einer Matrix gegenübergestellt, wodurch eine einfache Priorisierung der Maßnahmen möglich ist. Eine Berücksichtigung der Wirkbeziehungen sowie eine detaillierte Betrachtung von Industrie-4.0-Technologien fanden in der Publikation nicht statt.

LIEBRECHT (2020) präsentiert eine Methodik zur Entscheidungsunterstützung produzierender Unternehmen bei der Einführung von Industrie-4.0-Methoden. Dabei werden mithilfe eines agentenbasierten Simulationsmodells unternehmensspezifische Industrie-4.0-Implementierungsstrategien abgeleitet. Ausgangsbasis ist eine Industrie-4.0-Methoden-Toolbox, in der verschiedene Industrie-4.0-Methoden spezifiziert und in einem Rahmenmodell grob strukturiert sind. In der ersten Phase werden für das Unternehmen relevante Methodenstränge, die die Wirkzusammenhänge der Technologien berücksichtigen, basierend auf unternehmenstypologischen Merkmalen ausgewählt. Darauf aufbauend erfolgen die Bewertung der zu den Strängen gehörenden Industrie-4.0-Methoden im Hinblick auf strategische Zielgrößen und ihre Kosten sowie die Ableitung von Umsetzungsszenarien. Entsprechend diesen Szenarien werden in der dritten Phase Umsetzungsreihenfolgen mittels einer Simulation erarbeitet und es wird eine Industrie-4.0-Roadmap vorgeschlagen. Eine beispielhafte Industrie-4.0-Methodenreihenfolge ist in Abbildung 3-5 als Gantt-Chart dargestellt. Die Forschungsarbeit von LIEBRECHT (2020) dient der vorliegenden Arbeit als Ausgangsbasis für die Ableitung einer allgemeingültigen und unternehmensspezifischen Lean-4.0-Implementierungsstrategie, da das gewählte Vorgehen zur Analyse der Interdependenzart und -intensität übertragbar ist. Zudem ermöglicht das von LIEBRECHT (2020) entwickelte Simulationsmodell zur Ableitung einer Industrie-4.0-Implementierungsroadmap die Berücksichtigung unternehmensspezifischer Gegebenheiten.

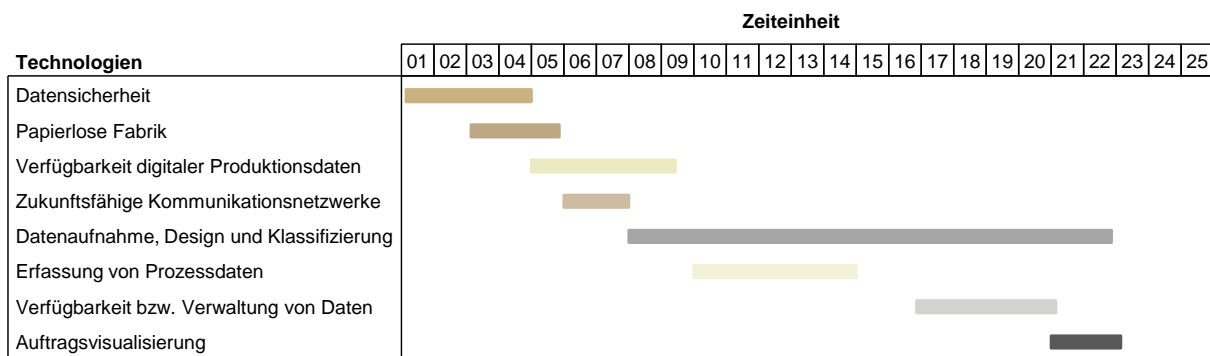


Abbildung 3-5: Exemplarische Industrie-4.0-Roadmap in Anlehnung an LIEBRECHT (2020, S. 110)

GAJZIK ET AL. (2021) untersuchten in ihrer Literatur- und Anwendungsfallstudie den zeitlichen Implementierungsverlauf von Industrie-4.0-Technologien in drei ausgewählten Unternehmen. Die Autor*innen halten dabei fest, dass zur potenziellen Implementierungsdauer bei der Einführung von Industrie-4.0-Technologien bislang nur vereinzelte

Publikationen existieren und ein erweiterter Forschungsbedarf besteht. Gleichzeitig konnte bei den untersuchten Unternehmen keine einheitliche Vorgehensweise zur Implementierung von Industrie-4.0-Technologien festgestellt werden, vielmehr erfolgte das Vorgehen bei der Einführung von Industrie 4.0 intuitiv. Die Autor*innen erarbeiteten daher allgemeingültige Rahmenbedingungen und Empfehlungen für ein Implementierungsvorgehen. Die Umsetzung der Implementierungsmaßnahmen und die Untersuchung der Interdependenzen zwischen den Industrie-4.0-Technologien wurde nicht tiefergehend erörtert.

Zwischenfazit: Zusammenfassend zeigt die Analyse des Stands der Forschung im Bereich der Industrie-4.0-Implementierungsstrategien, dass die Mehrzahl an Autor*innen Industrie-4.0-Implementierungsansätze auf einer konzeptionellen Ebene vorstellt. Es wurden primär die rahmengebenden Projektphasen beschrieben, die Interdependenzen zwischen den Technologien wurden dabei nicht explizit analysiert. Zudem fehlt es an einem konkreten Implementierungsvorgehen für einzelne Industrie-4.0-Technologien in Verbindungen mit Angaben zur Implementierungsdauer (Gajdzik et al. 2021). Eine Ausnahme stellt die Dissertation von LIEBRECHT (2020) dar, der für die von ihm erarbeiteten Industrie-4.0-Methodenstränge Implementierungsreihenfolgen abgeleitet hat.

3.3.3 Lean-4.0-Implementierungsansätze

Nachdem in den vorherigen beiden Unterabschnitten ein Überblick zum aktuellen Stand der Forschung in den Themenbereichen der Lean-Production- und Industrie-4.0-Einführungsstrategien vermittelt wurde, sollen im folgenden Abschnitt die vorherrschenden Lean-4.0-Implementierungsstrategien untersucht werden.

BURGGRÄF ET AL. (2017) präsentieren einen Ansatz für eine digitale Lean-Transformation, der die Dimensionen Mensch, Technik und Organisation berücksichtigt und aus vier zentralen Schritten besteht: Zu Beginn ist die Festlegung der Zieldefinition (Schritt 1) erforderlich, aus der der Soll-Zustand sowie Umfang und Detaillierungsgrad der Problemstellung resultieren. Im darauffolgenden Schritt wird die Wertschöpfungskette des Betrachtungsbereichs analysiert. Dabei wird der prozessspezifische Lean-Reifegrad bewertet und das vorherrschende Potenzial zur Integration von Industrie-4.0-Technologien eruiert. Darüber hinaus soll der potenzielle Mehrwert durch den Technologieeinsatz in schlanken Produktionssysteme untersucht werden (Schritt 3). Abschließend werden in Schritt 4 Empfehlungen abgeleitet und in einen Umsetzungsplan überführt. Die Autor*innen fokussieren sich auf die Projektphasen bei einer Lean-4.0-Transformation. Auf die Wirkverknüpfungen zwischen den Lean- und Industrie-4.0-Elementen wurde nicht eingegangen.

POKORNI ET AL. (2017) entwickelten ein Modell zur Bewertung des Lean- und Industrie-4.0-Reifegrads von produzierenden Unternehmen, woraus sich unternehmensspezifische Szenarien und Transformationsstrategien ableiten lassen. Das Reifegradmodell befähigt Unternehmen dazu, einen Soll-Ist-Abgleich des aktuellen Leistungsstandes durchzuführen, wodurch sich Entwicklungspotenziale ermitteln lassen. Den Ergebnissen des Soll-Ist-Vergleichs folgend, kann im zweiten Schritt ein Entwicklungspfad erschlossen werden, der die nachhaltige Lean-4.0-Transformation in einem produzierenden Unternehmen unterstützt. Den Ausgangspunkt für einen erfolgreichen Transformationsprozess bilden gemäß *POKORNI ET AL. (2017)* ausgewählte Lean-Methoden wie standardisierte Arbeitsabläufe oder der kontinuierliche Verbesserungsprozess. Darauf aufbauend können strukturschaffende Basistechnologien etabliert werden. Auf höchster Modellebene sind diejenigen Technologien verortet, die die Interaktion zwischen Menschen und Objekten im soziotechnischen System beschreiben. Die Autor*innen präsentieren mit ihren Implementierungsebenen, bestehend aus Lean Production, Industrie-4.0-Fundamentals und Industrie-4.0-Excellence, ein stufenbasiertes Reifegradmodell, das die Implementierungsstufen zwischen Lean- und Industrie-4.0-Elementen darstellt. Dabei wurden weder zeitliche Abhängigkeitsverhältnisse noch die Interdependenzarten berücksichtigt.

METTERNICH ET AL. (2017) beschreiben einen stufenweisen Entwicklungsprozess, der Unternehmen auf die höchste Stufe der Lean-4.0-Prozessexzellenz führen soll. Die Transformation untergliedert sich in fünf aufbauende Phasen. Zunächst initiieren produzierende Unternehmen isolierte Pilotprojekte, ohne dabei den Lean-Production-Systemgedanken zu berücksichtigen (erste Phase). Sich der Vision eines schlanken Wertstroms annähernd, werden die Verbesserungsprojekte in ein Produktionssystem überführt. Der Wertstrom und die vorherrschenden stabilisierten und standardisierten Arbeitsabläufe sind am Kundentakt ausgerichtet (zweite Phase). Um die erreichten Zustände nachhaltig zu verbessern, müssen Abweichungen von Standards durch die Mitarbeitenden erkannt werden und als Reaktion ist ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess zu initiieren. Hierfür ist eine tiefgreifende Verbesserungskultur im Unternehmen essenziell, die die dritte Phase des Entwicklungsmodells verkörpert. Die Autor*innen konstatieren, dass ein ausreichend hoher Lean-Reifegrad sowie eine Verbesserungskultur im Unternehmen gegeben sein sollten, bevor der Industrie-4.0-Transformationsprozess begonnen wird. Im Verlaufe der digitalen Entwicklung sollen zunächst etablierte Prozesse aufgewertet (vierte Phase) und der schlanke Wertstrom soll in einem letzten Schritt digitalisiert werden. Hierfür ist eine ganzheitliche Synchronisation der Informations- und Materialflüsse notwendig. Der Lean-4.0-Entwicklungsprozess nach *METTERNICH ET AL. (2017)* ist in Abbildung 3-6 schematisch dargestellt. Eine detaillierte Betrachtung der Interdependenzen zwischen den Methoden und Technologien oder des zeitlichen Entwicklungsverlaufs wurde nicht präsentiert.

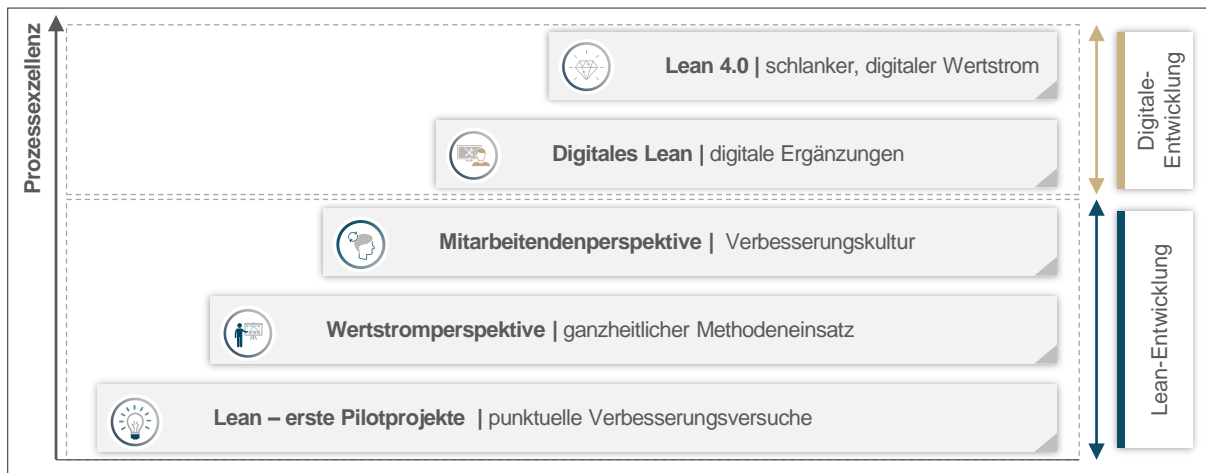


Abbildung 3-6: Lean-4.0-Entwicklungsprozess in Anlehnung an METTERNICH ET AL. (2017, S. 10)

HÖLLTHALER ET AL. (2018) sind der Meinung, dass der Lean-Ansatz wegen der zunehmenden Komplexität in Fertigungsprozessen an seine Grenzen geraten könnte. Hierbei verstehen die Autoren Industrie 4.0 als eine Möglichkeit, die Komplexität zu bewältigen sowie die Flexibilität im Unternehmen zu steigern und dadurch die Grenzen von Lean Production zu überwinden. Voraussetzung für die Digitalisierung ist eine fortgeschrittene Lean-Implementierung, weswegen HÖLLTHALER ET AL. (2018) zunächst die Einführung von Lean-Production-Methoden in drei Stufen vorschlagen. Erst nachdem diese durchlaufen sind, sollte mit der digitalen Transformation begonnen werden. Die Einführung von Industrie 4.0 ist gleichsam in drei Stufen strukturiert. Diese umfassen den Arbeitsplatz bzw. die Maschine, die Arbeitszelle sowie das System. Die Autoren gingen in ihren Ausführungen nicht näher auf die Wirkverknüpfungen von Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien oder auf die unternehmensspezifischen Anforderungen ein.

SCHNEIDER ET AL. (2020) stellen einen sechsstufigen Ansatz vor, der es produzierenden Unternehmen ermöglichen soll, eine individuelle, schlanke Digitalisierungsstrategie zu entwickeln. Als Grundlage verwendeten die Autoren die Wertstrommanagement-4.0-Methode, die in sechs Schritten durchgeführt werden kann. Zu Beginn gilt es, ein grundlegendes Verständnis in den Bereichen Lean Production, Industrie 4.0 und der Wertstromanalyse zu erzeugen. Darauf folgend wird die Vision durch die Führungsebene des Unternehmens definiert und an die Belegschaft kommuniziert. Die Generierung eines gemeinsamen Zielbilds soll die Mitarbeitenden motivieren, um die Herausforderungen eines digitalen Transformationsprozesses bewältigen zu können. Darüber hinaus sollen somit eine ganzheitliche Zielsetzung sowie Strategieplanung und -umsetzung im Unternehmen erzeugt werden. Der nachfolgende Digitalisierungsprozess beginnt mit einer Wertstromanalyse, um mögliche Digitalisierungspotenziale zu identifizieren. Darauf aufbauend soll im Zuge des Wertstromdesigns der Soll-Zustand des Wertstroms abgeleitet werden. Um den anvisierten Soll-Zustand zu erreichen, werden geeignete Industrie-4.0-Technologien ausgewählt und in

einem letzten Schritt über eine IoT-Plattform verbunden. Somit haben SCHNEIDER ET AL. (2020) eine konzeptionelle Digitalisierungsstrategie erarbeitet, die auf der Lean-Production-Methode des Wertstrommanagements basiert. Allerdings berücksichtigt das sechsstufige Vorgehensmodell unternehmensspezifische Merkmale und die Interdependenzen zwischen Lean- und Industrie-4.0-Elementen lediglich auf einer Ebene.

BURGGRÄF ET AL. (2020) erarbeiteten einen weiteren reifegradbasierten Modellansatz, der die Zusammenhänge zwischen Lean Production und Industrie 4.0 berücksichtigt. Durch das Reifegradmodell sollen Unternehmen dazu befähigt werden, Konzepte, Methoden und Technologien auf operativer Ebene zu bewerten und somit ein unternehmensindividuelles Produktionssystem im Kontext von Lean Production und Industrie 4.0 zu entwickeln. Die Modellentwicklung fußt auf einer Ontologie, die die Wirkbeziehungen der Modellstruktur hierarchisch gliedert. Ein wesentlicher Bestandteil des Modells ist die Ausarbeitung der Interdependenzen zwischen Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien. Die Autor*innen empfehlen zur Interdependenzanalyse die Anwendung eines Multiple-Domain-Matrix-Ansatzes gemäß BARTOLOMEI ET AL. (2012) und heben hervor, dass die Analyse der Interdependenzen zwischen Lean Production und Industrie 4.0 bislang nur eingeschränkt durchgeführt wurde. Parallel zur Ableitung der Interdependenzen können laut BURGGRÄF ET AL. (2020) die Reifegradstufen und das Zielsystem entwickelt werden. Die Publikation erlaubt einen Einblick in den Entwicklungsansatz eines Lean-Industrie-4.0-Transformationsmodells, wobei das Vorgehen lediglich auf konzeptioneller Ebene aufgezeigt wird. Dabei betonen die Verfassenden, dass die Interdependenzen zwischen Lean- und Industrie-4.0-Elementen in der Forschung noch nicht ausreichend analysiert sind.

LANGLOTZ UND AURICH (2021) liefern ein Konzept zur Identifikation der Interdependenzen von Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien, um daraus eine Implementierungsreihenfolge abzuleiten. Hierzu werden zunächst Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien identifiziert und mithilfe von Merkmalsausprägungen charakterisiert. Die Elemente beider Produktionsparadigmen werden nach Zielgrößen, dem Anwendungsfeld, der Fertigungsebene sowie den Technologiebereichen strukturiert und klassifiziert, um anschließend ihre kausalen und temporären Interdependenzen zu untersuchen. Als temporäre Interdependenzen bezeichnen die Verfasser den zeitlichen Ablauf einer möglichen Implementierung. Hierzu entwickelten die Autoren in Anlehnung an das TPS ein Methoden-Haus, das die Implementierungsreihenfolge für Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien beginnend bei Six Sigma vorgibt. Die einzelnen Interdependenzen sowie die Implementierungsreihenfolge wurden in der Veröffentlichung nicht weiter spezifiziert. Zudem wurden Rückkopplungseffekte und unternehmensspezifische Gegebenheiten in der Implementierungsabfolge nicht berücksichtigt.

VLACHOS ET AL. (2021) analysierten in ihrer Forschungsarbeit, wie Industrie-4.0-Technologien in bestehende schlanke Produktionssysteme integriert werden können. Dazu führten sie eine Fallstudie durch, in der sie die beiden Industrie-4.0-Technologien fahrerlose Transportsysteme (AGV) und IoT in einem produzierenden Unternehmen implementierten. Aus den Studienergebnissen schließen sie, dass die Implementierung von Industrie-4.0-Technologien in ein Lean-Production-System drei Stufen umfassen sollte: (1) System Design, (2) Integration und (3) kontinuierliche Verbesserung. In der System-Design-Phase wird zunächst der Ist-Zustand der Prozesse bewertet und es werden Zielgrößen sowie Leistungsziele bestimmt. Daraus werden Verbesserungspotenziale aufgezeigt und Lösungsstrategien abgeleitet. In der folgenden Integrationsphase gilt es, die ausgewählten Lösungsansätze umzusetzen und in das bestehende Produktionssystem zu integrieren. In der letzten Phase, die auf kontinuierliche Verbesserung abzielt, werden die etablierten und standardisierten Prozesse automatisiert sowie Verschwendungen reduziert und die schlanke Automatisierung wird expandiert. Die Autoren zeigen einen Integrationsprozess, der die wesentlichen Phasen bei der Einführung von Industrie-4.0-Technologien in schlanke Produktionssysteme aufzeigt. Auf mögliche Interdependenzen zwischen den Elementen oder auf den zeitlichen Implementierungsverlauf wurde nicht eingegangen.

ROSSINI ET AL. (2021) untersuchten in ihrer empirischen Studie den Fortschritt der digitalen Transformation innerhalb produzierender Unternehmen. Die Studie umfasst die Befragung von 19 Unternehmen, die basierend auf dem vorherrschenden Lean-Production-Implementierungsstand in zwei Cluster aufgeteilt wurden. Das erste Cluster beinhaltete zehn Unternehmen, die einen hohen Lean-Production-Reifegrad aufwiesen. Die verbliebenen neun Unternehmen des zweiten Clusters wiesen einen geringen Lean-Production-Implementierungsstand auf. Die Untersuchungen nach *ROSSINI ET AL. (2021)* zeigen zwei clusterabhängige Implementierungsmuster bei der Durchführung einer digitalen Transformation, bestehend aus einer nachhaltigen und einer disruptiven Vorgehensweise. Die nachhaltige Umsetzung wird vornehmlich von Unternehmen des ersten Clusters verfolgt, wogegen Unternehmen mit einer geringen vorherrschenden Lean-Production-Implementierungsreife einen disruptiven Transformationsprozess anstreben. Die nachhaltige digitale Transformation wird durch das Durchführen von kleinen, inkrementellen Verbesserungsprojekten entlang der gesamten Wertschöpfungskette erreicht. Dabei werden neuartige Technologien zur Generierung und Analyse von Daten eingesetzt, verbunden mit dem Ziel, die Prozesse stetig zu verbessern. Im Gegensatz dazu versuchen Unternehmen des zweiten Clusters, die digitale Transformation vornehmlich in disruptiven Innovationssprüngen zu bewältigen und so einen hohen Industrie-4.0-Reifegrad zu erreichen. Neue Technologien werden überwiegend punktuell, beispielsweise in der Produktion, zur Erhöhung der Produktionskapazitäten eingesetzt. Die Autor*innen heben hervor, dass Unternehmen mit einem hohen

Lean-Reifegrad und einer tiefgreifenden Verbesserungskultur eine nachhaltige Digitalisierungstransformation anstreben und dadurch eine erfolgreichere Industrie-4.0-Implementierung einhergeht. Allerdings wurden dabei die Interdependenzart und -intensität zwischen den Technologien und den Lean-Methoden nicht betrachtet.

TORTORELLA ET AL. (2021) erarbeiteten ein Rahmenmodell für die sequenzielle Einführung von Lean- und Industrie-4.0-Elementen in produzierenden Unternehmen. Die Ergebnisse basieren auf der Befragung von 61 Unternehmen und sind in drei übergeordnete Implementierungsphasen strukturiert, die in Abbildung 3-7 aufgeführt sind. Die Phasen bestehen aus der Anlauf-, Übergangs- und Fortgeschrittenenphase und werden anhand des Implementierungszeitpunkts und der Implementierungsquote voneinander abgegrenzt. Die Anlaufphase (Phase 1) umfasst zehn Lean-Methoden und bildet die Basis für die Implementierung digitaler Technologien von geringer Komplexität. Durch deren Einführung lässt sich gemäß den Autor*innen eine Erhöhung des Leistungsniveaus in der Produktion beobachten. Die zweite Phase repräsentiert somit den Übergang eines Unternehmens zu einer fortgeschrittenen Lean-4.0-Unternehmen und beinhaltet sechs Lean-Methoden und fünf Industrie-4.0-Technologien. Der letzten Phase wurden Technologien höherer Komplexität zugeordnet, die das Streben nach einem effizienten und fehlerfreien Wertstrom unterstützen. Die Autor*innen beschränken sich in diesem Fachbeitrag auf die Beschreibung der Implementierungsphasen. Auf mögliche Beziehungen zwischen den Industrie-4.0-Technologien und Lean-Methoden wurde nicht detailliert eingegangen.

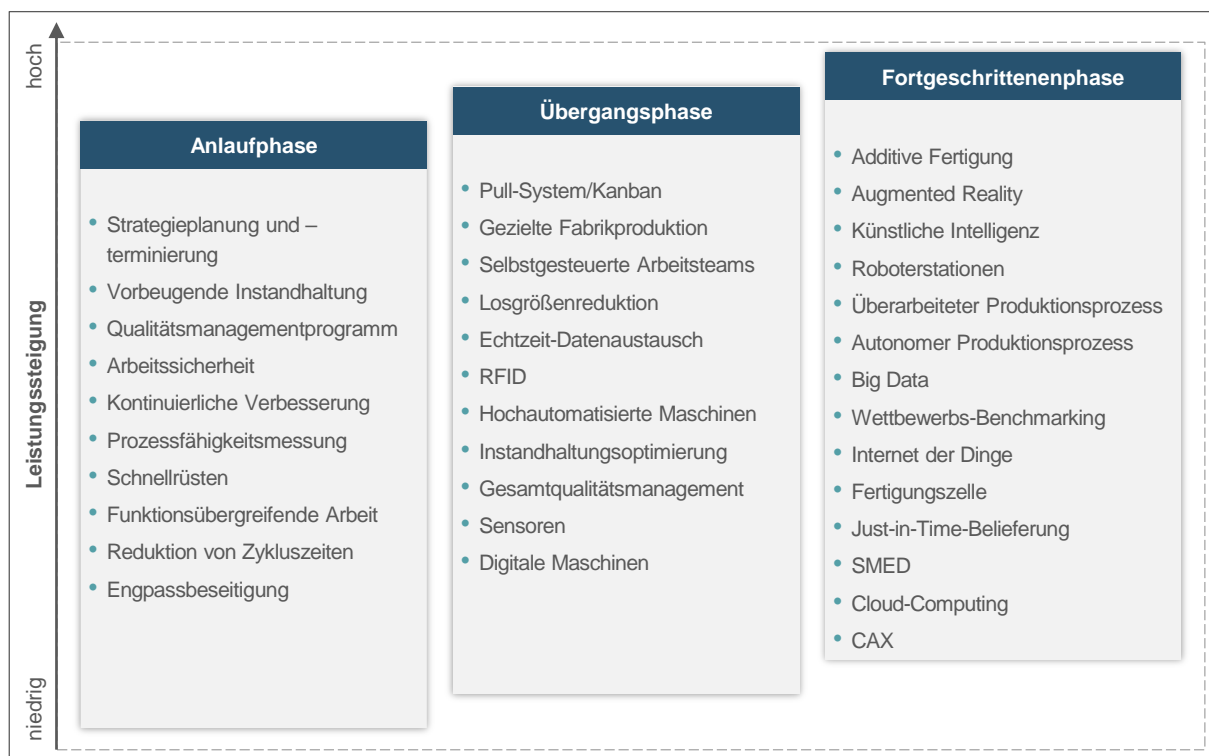


Abbildung 3-7: Modell für die Lean-4.0-Implementierung in Anlehnung an TORTORELLA ET AL. (2021, S. 23)

Zwischenfazit: Die Literaturanalyse für die Lean-4.0-Implementierungsstrategien zeigt, dass bereits diverse Einführungsstrategien in diesem Fachbereich existieren. Allerdings fokussierten sich diese mehrheitlich auf übergeordnete Projektphasen, denen einzelne Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien zugeordnet werden. Es fehlt an einer ganzheitlichen Betrachtung der Interdependenzen zwischen den Lean-Production-Methoden und den Industrie-4.0-Technologien. Erste Ansätze, die Interdependenzen detailliert zu analysieren, bieten BURGGRAF ET AL. (2020) mit einem Multiple-Domain-Ansatz. Die Ausarbeitungen wurden allerdings auch hier nicht weiter ausgeführt, sodass von den Autor*innen empfohlen wird, die Wirkbeziehungen zwischen Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien in künftigen Forschungsarbeiten detailliert zu untersuchen. Im nachfolgenden Abschnitt werden die vorgestellten Publikationen anhand der in Abschnitt 3.1 abgeleiteten Anforderungen bewertet, um drauf basierend einen Handlungsbedarf für das weitere Vorgehen dieser Arbeit abzuleiten.

3.4 Ableitung des Handlungsbedarfs

In den vorherigen Abschnitten wurden entsprechend der dieser Arbeit zugrunde liegenden Zielsetzung relevante Phasenmodelle und Strategien zur Implementierung des Lean-Production-, Industrie-4.0- sowie Lean-4.0-Ansatzes in produzierenden Unternehmen vorgestellt. Zudem wurden Veröffentlichungen, die die Interdependenzen zwischen Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien untersuchten, betrachtet und diskutiert. Aus dem aufgeführten aktuellen Stand der Forschung geht hervor, dass die wissenschaftlichen Ansätze unterschiedliche Bewertungskriterien und Bereiche abdecken. Im Folgenden werden die Fachbeiträge mit den in Abschnitt 3.1 identifizierten Kriterien abgeglichen, um das mögliche Forschungsdefizit aufzuzeigen und einen konkreten Handlungsbedarf abzuleiten. Hierzu bietet Tabelle 3-1 eine Übersicht zu den untersuchten wissenschaftlichen Publikationen, wobei der Erfüllungsgrad der Bewertungskriterien angegeben wird. Dieser ist je Bewertungskriterium in *nicht erfüllt* (-), *teilweise erfüllt* (o) und *erfüllt* (●) unterteilt.

Tabelle 3-1: Übersicht und Bewertung der aktuellen Fachliteratur zur Ableitung des Handlungsbedarfs

	1. Spezifikation und Auswahl				2. Interdependenzanalyse				3. Implementierungsstrategie		
	1.a Spezifikation von Lean-Production-Methoden	1.b Spezifikation von Industrie-4.0-Technologien	1.c Einfluss von Industrie-4.0- und Lean-Elementen auf die Zielgrößen	1.d Strukturiertes Auswahlverfahren	2.a Interdependenzen zwischen Lean-Production-Methoden	2.b Interdependenzen zwischen Industrie-4.0-Technologien	2.c Interdependenzen zwischen Lean Production und Industrie 4.0	2.d Berücksichtigung dynamischer Rückkopplungsprozesse	3.a Allgemeingültige Lean-4.0-Implementierungsstrategie	3.b Unternehmensindividueller Lean-4.0-Implementierungsplan	3.c Methoden- und technologiebasierte Lean-4.0-Implementierungsstrategie
Analyse der Lean-4.0-Interdependenzen (siehe Abschnitt 3.2)	KOLBERG & ZÜHLKE (2015)	-	-	-	-	-	●	-	-	-	-
	SANDERS ET AL. (2016)	-	-	-	-	-	-	●	-	-	-
	DOMBROWSKI ET AL. (2017)	-	●	-	-	-	-	●	-	-	-
	HOFMANN & RÜSCH (2017)	-	-	-	-	-	-	●	-	-	-
	MRUGALSKA & WYRWICKA (2017)	-	-	-	-	-	-	●	-	-	-
	SATOGLU ET AL. (2017)	-	-	●	-	-	-	●	-	-	-
	WAGNER ET AL. (2017)	-	-	●	-	-	-	●	-	-	-
	FISCHER & KÖBLER (2018)	-	-	-	-	-	-	●	-	-	-
	KOLBERG (2018)	●	●	-	●	-	-	●	-	-	-
	MAYR ET AL. (2018)	-	-	●	-	-	-	●	-	-	-
	PRINZ ET AL. (2018)	-	-	-	-	-	-	●	-	-	-
	KOLLA ET AL. (2019)	●	●	-	-	-	-	●	-	-	-
	PAGLIOSA ET AL. (2019)	●	●	-	-	-	-	●	-	-	-
	PEREIRA ET AL. (2019)	-	-	-	-	-	-	●	-	-	-
	ROSSINI ET AL. (2019)	-	-	-	-	-	-	●	-	-	-
	CIANO ET AL. (2020)	-	-	●	-	-	-	●	-	-	-
	DEUSE ET AL. (2020)	-	-	●	●	-	-	●	-	-	-
	SHAHIN ET AL. (2020)	-	-	●	-	-	-	●	-	-	-
	VALAMEDE & AKKARI (2020)	-	-	●	-	-	-	●	-	-	-
	GHOUAT ET AL. (2021)	-	-	●	-	-	-	●	-	-	-
	JAVOID ET AL. (2021)	-	-	-	-	-	-	●	-	-	-
	MARINELLI ET AL. (2021)	-	-	●	-	-	-	●	-	-	-
NEDJWA ET AL. (2022)	-	-	-	-	-	-	●	-	-	-	
Implementierungsansätze (siehe Abschnitt 3.3)	MONDEN (2011)	●	-	●	-	●	-	-	●	-	●
	TAKEDA (2013)	-	-	●	-	●	-	-	●	-	●
	AULL (2012)	●	-	●	●	●	-	-	●	●	●
	ANDERL ET AL. (2016)	-	●	-	●	-	-	-	-	-	-
	HANSCHKE (2018)	-	●	●	●	-	-	-	-	-	-
	SCHUH ET AL. (2018)	-	●	●	●	-	-	-	-	-	-
	MORLOCK ET AL. (2016)	-	●	●	●	-	-	-	-	-	-
	LANZA & NYHUIS (2018)	●	●	●	●	●	●	-	-	-	-
	SCHUH ET AL. (2020)	-	●	●	●	-	-	-	-	-	-
	MATT ET AL. (2020)	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-
	GAJDIK ET AL. (2021)	-	●	●	-	-	-	-	-	-	-
	LIEBRECHT (2020)	-	●	●	●	-	●	-	●	●	●
	METTERNICH ET AL. (2017)	-	-	●	-	-	-	-	-	-	-
	POKORNI ET AL. (2017)	●	●	●	-	-	-	-	-	-	●
	BURGGRÄF ET AL. (2017)	-	-	●	-	-	-	-	●	-	-
	HÖLLTHALER ET AL. (2018)	-	-	-	-	-	-	●	●	-	-
	SCHNEIDER ET AL. (2020)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	BURGGRÄF ET AL. (2020)	●	●	●	●	-	-	●	-	●	●
	LANGLOTZ & AURICH (2021)	●	●	●	●	-	-	●	-	-	●
	VLACHOS ET AL. (2021)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ROSSINI ET AL. (2021)	●	●	-	-	-	-	●	-	-	-	
TORTORELLA ET AL. (2021)	-	-	-	●	●	●	-	●	-	-	

Handlungsbedarf zur Spezifikation und Auswahl: Bestehende Ansätze beinhalten bereits teilweise eine Spezifikation von Lean- und Industrie-4.0-Elementen (siehe Tabelle 3-1). So erfasste AULL (2012) beispielsweise den Einfluss von Lean-Methoden auf die Zielgrößen Zeit, Kosten und Qualität und untergliedert die Methoden in mensch-, logistik- und qualitätsorientierte Lean-Production-Methoden. Im Bereich Industrie 4.0 erweiterte LIEBRECHT (2020) die Zielgrößen um die Dimensionen Flexibilität und Mensch und analysierte den Einfluss von Industrie-4.0-Methodensträngen auf die Zieldimensionen. Zudem erarbeitete LIEBRECHT (2020) ein Rahmenmodell, das die Industrie-4.0-Methoden strukturiert und somit eine Auswahl von Industrie-4.0-Methoden ermöglicht. Neben den beiden genannten Autoren präsentieren LANGLOTZ UND AURICH (2021) oder DEUSE ET AL. (2020) einen ersten Ansatz zur Spezifikation von Industrie-4.0-Technologien und Lean-Production-Methoden und klassifizieren diese entsprechend ihren Anwendungs- und Einflussbereichen im Unternehmen. Diese Forschungsarbeiten bilden eine Grundlage für eine tiefergehende Spezifikation der Methoden und Technologien. So sollen beispielsweise weitere relevante Merkmale wie die minimale und maximale Implementierungsdauer oder der Einfluss auf produktionsrelevante Zielgrößen untersucht werden. Diese Spezifikation ist erforderlich, um ein strukturiertes und zielgerichtetes Auswahlverfahren für Unternehmen, basierend auf Methoden- und Technologie-Steckbriefen, ableiten zu können. Darüber hinaus bildet die Beschreibung der Lean- und Industrie-4.0-Elemente eine wesentliche Grundlage zur Interdependenzanalyse sowie zur Ableitung der Lean-4.0-Implementierungsstrategie.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich bereits erste Autor*innen, wie AULL (2012), LANGLOTZ UND AURICH (2021) oder LIEBRECHT (2020), mit der Spezifikation von Lean-Production-Methoden oder Industrie-4.0-Technologien befasst haben. Diese Arbeiten bilden eine Basis für die Spezifikation der Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien. Allerdings besteht der Handlungsbedarf, den Einfluss auf die produktionsrelevanten Zielgrößen Zeit, Kosten, Qualität, Flexibilität sowie ökologische und soziale Nachhaltigkeit gleichermaßen zu untersuchen. Zudem gilt es, den Einsatzbereich der Methoden und Technologien festzuhalten sowie die minimale und maximale Implementierungsdauer zu erfassen. Diese Spezifikation bildet die Grundlage für die Entwicklung eines strukturierten Auswahlprozesses, der Unternehmen bei der Selektion der Lean- und Industrie-4.0-Elemente für eine unternehmensspezifische Lean-4.0-Implementierungsstrategie unterstützt.

Handlungsbedarf zur Interdependenzanalyse: Die Analyse des Stands der Forschung zeigt, dass bereits eine Vielzahl von Ansätzen und Forschungsbeiträgen existiert, die die Interdependenzen zwischen Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien untersucht haben. Die Mehrzahl der wissenschaftlichen Beiträge, beispielsweise FISCHER UND KÖBLER (2018), SANDERS ET AL. (2016) oder SHAHIN ET AL. (2020), fokussierten sich auf eine literatur- oder

anwendungsfallbasierte eindimensionale Untersuchung der Wirkverknüpfungen zwischen ausgewählten Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien. Eine umfassende, bidirektionale Interdependenzanalyse diverser Lean- und Industrie-4.0-Elemente fand dabei nicht statt. Auch wurden die Interdependenzart und die Interdependenzintensität in den bisherigen wissenschaftlichen Arbeiten nur unzureichend analysiert. Somit ist es nicht möglich, systemdynamische Rückkopplungseffekte oder Wirkbeziehungen, die sich aus den Abhängigkeiten ergeben, in Lean-4.0-Implementierungsansätzen zu berücksichtigen.

Es besteht daher der Handlungsbedarf, die Interdependenzen zwischen Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien bidirektional zu untersuchen. Darüber hinaus ist der Anspruch zu erfüllen, die Art und Intensität der Interdependenzen zwischen Lean-Production- und Industrie-4.0-Elementen mithilfe einer geeigneten Forschungsmethode zu analysieren und festzulegen. Dies bildet die Wissensbasis für die Ableitung von allgemeingültigen und unternehmensspezifischen Lean-4.0-Implementierungsstrategien.

Handlungsbedarf zur Implementierungsstrategie: Basierend auf der Analyse des Stands der Forschung wird deutlich, dass bislang kein Ansatz auf Methoden- und Technologieebene existiert, der eine systemdynamische Lean-4.0-Implementierungsstrategie erarbeitet und dabei Wirkbeziehungen, Rückkopplungseffekte sowie unternehmensspezifische Rahmenbedingungen beinhaltet. Bisherige Publikationen wie die von HÖLLTHALER ET AL. (2018) oder TORTORELLA ET AL. (2021) fokussierten sich vorzugsweise auf die übergeordnete Konzeptebene, ohne die Interdependenzen zwischen den Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien ausreichend in Betracht zu ziehen. Für das vorliegende Forschungsvorhaben relevante Publikationen sind die Arbeiten von AULL (2012) im Bereich von Lean Production und von LIEBRECHT (2020) im Themengebiet Industrie 4.0. Beide Dissertationen ermöglichen über die durchgeführten Interdependenzanalysen die Einbeziehung von Ursachen-Wirkungs-Effekten sowie von systemdynamischen Rückkopplungsprozessen. Entsprechend ihrer Fokussierung bezogen die genannten Arbeiten eine umfassende Kombination von Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien nicht mit ein.

Somit existiert bislang kein Ansatz, der produzierende Unternehmen bei der Entwicklung einer unternehmensspezifischen und systemdynamischen Lean-4.0-Implementierungsstrategie unterstützt. Es besteht daher der ***Handlungsbedarf zur Entwicklung einer allgemeingültigen und unternehmensindividuellen Lean-4.0-Implementierungsstrategie***, die Rückkopplungseffekte und Interdependenzen zwischen Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien systematisch berücksichtigen. Entsprechend der in Abschnitt 1.2 formulierten Zielsetzung sollen dadurch produzierende Unternehmen befähigt werden, durch den gezielten Methoden- und Technologie-Einsatz ihre produktionsrelevanten Zielgrößen zu verbessern und somit die langfristige Wettbewerbsfähigkeit zu sichern.

4 Anforderungen und Grundstruktur der Methode

Im vorliegenden Kapitel werden die Anforderungen an die zu entwickelnde Methode festgehalten und es wird die Grundstruktur für die in Kapitel 5 erarbeiteten Lösungsbausteine aufgezeigt. Die Anforderungen leiten sich aus den vorherigen Kapiteln ab und dienen in Anlehnung an die gewählte Forschungsmethode als Gütekriterien für die erarbeitete Methode zur Entwicklung einer Lean-4.0-Implementierungsstrategie. Folglich fungieren die definierten Anforderungen als Kriterien für die in Kapitel 6 durchgeführte Evaluation.

4.1 Anforderungen an die Methode

Die Anforderungen an die Methode lassen sich in allgemeine und inhaltliche Anforderungen unterteilen. Erstere resultieren aus einer Literaturanalyse und nehmen Bezug auf das Forschungsvorgehen nach ULRICH (1982). Gemäß dessen wissenschaftstheoretischen Erkenntnissen ist diese Arbeit der anwendungsorientierten Wissenschaft zuordenbar (siehe Abschnitt 1.3.1). Zur Stärkung der Anwendungsfokussierung wurden daher zusätzlich Fachleute aus der Industrie befragt, um die in Abschnitt 3.1 aus der Zielsetzung und Forschungsfrage abgeleiteten inhaltlichen Anforderungen zu ergänzen.

4.1.1 Allgemeine Anforderungen

Um die wissenschaftlichen Anforderungen an die Methode sicherzustellen, gilt es, die drei grundlegenden Gütekriterien Objektivität, Reliabilität und Validität zu erfüllen. Gemäß HELFRICH (2016, S. 95) ist damit gewährleistet, dass das Ergebnis einer wissenschaftlichen Vorgehensweise nicht willkürlich oder zufällig zustande kommt.

- **Objektivität:** Das Kriterium der Objektivität bezieht sich auf die Unabhängigkeit einer Methode von der anwendenden Person. Für die Erfüllung dieses Kriteriums muss eine Methode bei identischem Sachverhalt und gleichen Rahmenbedingungen unabhängig von der ausführenden Person gleichbleibende Ergebnisse generieren (BORTZ & DÖRING 2006, S. 326).
- **Reliabilität:** Eine Methode ist zuverlässig, wenn sie bei mehrmaliger Durchführung unter konstanten Bedingungen identische Resultate erzielt (HÄDER 2015, S. 105).

- **Validität:** Die Validität respektive Gültigkeit einer Methode gewährleistet die inhaltliche Funktionstüchtigkeit eines methodischen Vorgehens (HÄDER 2015, S. 105).

Neben den drei genannten Gütekriterien sind noch weitere allgemeine Anforderungen an die Methode zu erfüllen. Diese sind nachstehend aufgeführt und beschrieben.

- **Wirtschaftlichkeit:** Die Anwendung der Methode soll einen wirtschaftlichen Mehrwert für das produzierende Unternehmen generieren. Dies gilt als erfüllt, wenn der erzielte wirtschaftliche Nutzen die getätigten finanziellen Aufwände übersteigt.
- **Anwendbarkeit:** Die Methode soll für unterschiedliche Produktionsbereiche einsetzbar sein. Zudem sollen die Nutzenden über keine speziellen Kenntnisse verfügen müssen, die über jene der strategischen Produktionsplanung hinausgehen.
- **Nutzentransparenz:** Die Resultate sowie der Lösungsweg müssen für die nutzenden Personen nachvollziehbar gestaltet sein. Hierzu müssen das System-Dynamics-Modell sowie die Anwendungsmethode umfassend dokumentiert sein.

4.1.2 Inhaltliche Anforderungen

Die in diesem Abschnitt aufgeführten inhaltlichen Anforderungen an die Methode wurden aus der Zielsetzung und den Forschungsfragen abgeleitet. Zudem wurden sie durch die Resultate aus einer Befragung von 15 Expertinnen und Experten aus der Industrie und Forschung ergänzt. Das Ziel der Befragung war es, die inhaltlichen Anforderungen an eine Lean-4.0-Implementierungsstrategie zu prüfen und zu komplettieren (BERNHARD 2022).

- **Spezifikation und Auswahlprozess:** Die entwickelte Methode soll für die benutzenden Personen einen Auswahlprozess beinhalten, der es ihnen ermöglicht, die für ihren Anwendungsbereich relevanten Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien zu identifizieren.
- **Interdependenzen:** Das System-Dynamics-Modell soll voraussetzende und unterstützende Interdependenzen zwischen den Methoden und Technologien mit unterschiedlicher Intensität berücksichtigen. Um die voraussetzenden Interdependenzen zwischen den Elementen abzubilden, sind zudem Schwellwerte zu definieren. Diese stellen sicher, dass eine Methode oder Technologie erst dann in einem Simulationsablauf implementiert wird, wenn alle Voraussetzungen ausreichend erfüllt sind.
- **Implementierungsstrategie:** Die Methode soll produzierende Unternehmen bei der systematischen und zielgerichteten Einführung von Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien unterstützen. Dabei sollen Rückkopplungseffekte, Interdependenzen sowie zeitliche Abhängigkeiten abgebildet werden. Zudem soll die Methode unternehmensindividuelle Rahmenbedingungen berücksichtigen, die sich auf

die Lean-4.0-Implementierung auswirken, beispielsweise die initialen Implementierungszustände der Lean-Production- und Industrie-4.0-Elemente in einem Anwendungsbereich. Das Ergebnis der Implementierungsstrategie soll eine zeitliche Implementierungsreihenfolge der Lean-Methoden und der Industrie-4.0-Technologien sowie Angaben zu deren Auswirkungen auf relevante Zielgrößen enthalten.

Um die aufgeführten allgemeinen und inhaltlichen Anforderungen zu erfüllen, bedarf es einer stringenten Vorgehensweise. Diese ist in nachstehendem Abschnitt aufgeführt und schafft den strukturgebenden Rahmen für die in Kapitel 5 erarbeiteten Lösungsbausteine.

4.2 Grundstruktur der Methode

Die für diese Arbeit wegweisende Zielsetzung zur Entwicklung einer allgemeingültigen und unternehmensindividuellen Lean-4.0-Implementierungsstrategie basiert auf der in Abschnitt 1.1 beschriebenen Problemstellung sowie den identifizierten Defiziten aus dem Stand der Forschung (siehe Abschnitt 3.4). Der vorliegende Abschnitt beschreibt die Grundstruktur zur Erfüllung der Zielsetzung und zur Beantwortung der forschungsleitenden Fragen (siehe Abschnitt 1.2).

Der erste Lösungsbaustein adressiert die Forschungsfrage 1 (siehe Abschnitt 1.2). Das Ziel ist es, für produzierende Unternehmen relevante Lean-Production-Methoden sowie Industrie-4.0-Technologien auszuwählen und diese mithilfe bibliometrischer Literaturanalysen und der Befragung von Fachleuten zu strukturieren und zu spezifizieren. Zudem wurde ein morphologischer Kasten erarbeitet, der es Unternehmen im Zuge der Anwendungsmethode (Abschnitt 5.3.4) ermöglicht, adäquate Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien auszuwählen. Das Ergebnis von Lösungsbaustein 1 besteht aus Steckbriefen zur Spezifikation und Strukturierung der Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien.

Das Ziel des zweiten Lösungsbausteins ist die Beantwortung von Forschungsfrage 2. Hierfür wurden die Interdependenzen zwischen Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien analysiert, um darauf aufbauend eine Lean-4.0-Implementierungsstrategie für produzierende Unternehmen ableiten zu können. Die Interdependenzanalyse erfolgte unter Anwendung einer strukturierten Literaturrecherche, der Untersuchung von Anwendungsfällen aus der Industrie sowie der Befragung von Expertinnen und Experten im Rahmen einer Delphi-Studie. Das Ergebnis von Lösungsbaustein 2 sind Interdependenzmatrizen, die die Wirkverknüpfungen zwischen Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien sowie die Wirkbeziehungen zwischen den beiden Domänen festhalten. Die

Resultate aus Lösungsbaustein 1 und 2 bilden die Grundlage für die Umsetzung von Lösungsbaustein 3.

Das Ziel von Lösungsbaustein 3 besteht in der Erarbeitung eines Lean-4.0-Simulationsmodells, das produzierende Unternehmen bei der systematischen und zielgerichteten Einführung von Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien unterstützt (Forschungsfrage 3). Hierzu galt es, mithilfe der bestehenden Fachliteratur sowie durch die Befragungen von Expertinnen und Experten aus relevanten Industrie- und Forschungsbereichen Modellparameter zu identifizieren sowie Struktur- und Entscheidungsregeln für das Simulationsmodell festzulegen. Darauf aufbauend wurde der Modellentwurf erarbeitet und in Form von Flussdiagrammen dargestellt, die in ein systemdynamisches Simulationsmodell überführt wurden. Das Ergebnis dieses Lösungsbausteins ist ein System-Dynamics-Modell für die Entwicklung einer allgemeingültigen sowie unternehmensindividuellen Lean-4.0-Implementierungsstrategie. Zudem wurde eine Anwendungsmethode entwickelt (siehe Abschnitt 5.3.4), auf deren Basis das System-Dynamics-Modell in Kapitel 6 evaluiert wird.

Insbesondere die Lösungsbausteine 2 und 3 weisen einen hohen Innovationsgrad und folglich eine Erweiterung des aktuellen Forschungsstands auf, da die Interdependenzen zwischen Lean- und Industrie-4.0-Elementen systematisch untersucht und daraus Lean-4.0-Strategien abgeleitet werden. In folgender Abbildung ist die Grundstruktur der Lösungsbausteine mit den Anwendungsperspektiven dargestellt (siehe Abbildung 4-1).

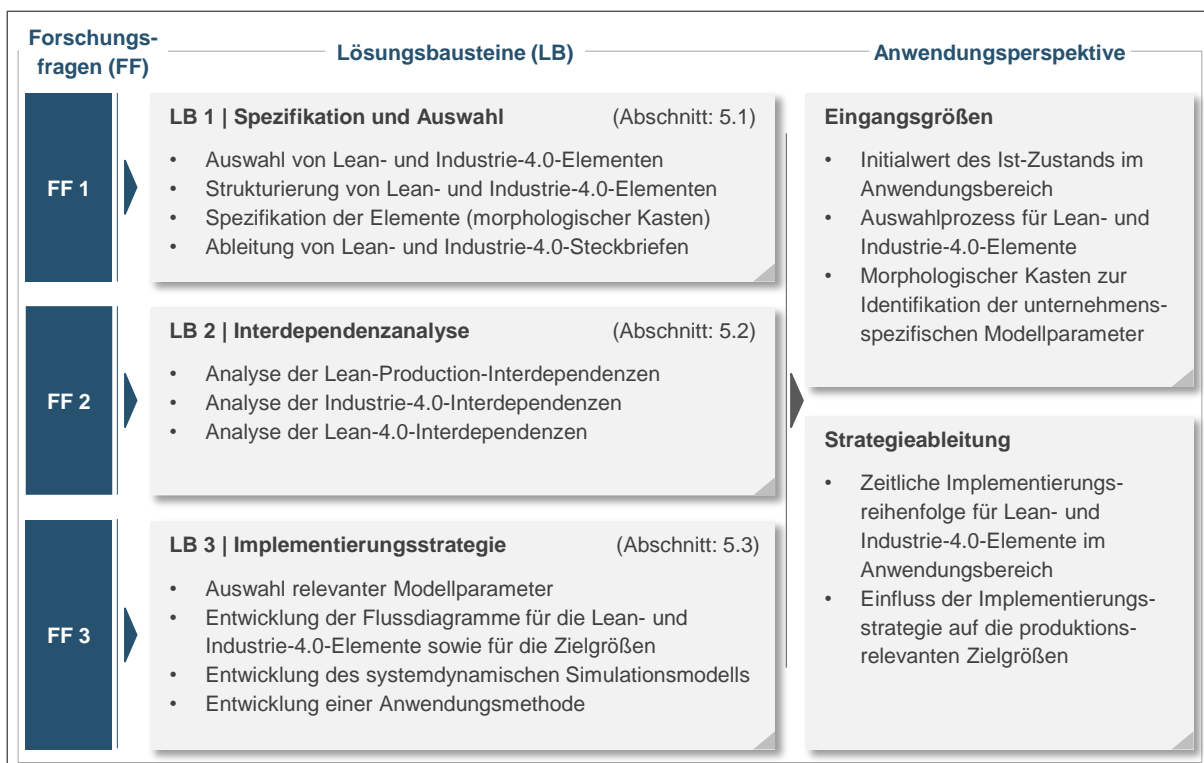


Abbildung 4-1: Grundstruktur der Lösungsbausteine sowie der Anwendungsperspektive zur Entwicklung einer allgemeingültigen und unternehmensindividuellen Lean-4.0-Implementierungsstrategie

5 Konkretisierung und Entwicklung der Methode

Basierend auf den in Kapitel 4 beschriebenen Anforderungen (siehe Abschnitt 4.1) sowie der vorgestellten Grundstruktur (siehe Abschnitt 4.2) widmet sich Kapitel 5 der Erarbeitung der Lösungsbausteine als Teil der präskriptiven Studie (siehe Abschnitt 1.3.2). Hierbei werden im ersten Lösungsbaustein Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien ausgewählt und mithilfe umfassender Literaturanalysen und Befragungen von Fachleuten spezifiziert (siehe Abschnitt 5.1). Die daraus abgeleiteten Steckbriefe dienen als Basis für die Analyse der Interdependenzen von Lean-Production- und Industrie-4.0-Elementen (siehe Abschnitt 5.2). Diese Vorarbeiten ermöglichen die Entwicklung eines systemdynamischen Simulationsmodells zur Ableitung von allgemeingültigen sowie unternehmensspezifischen Lean-4.0-Implementierungsstrategien (siehe Abschnitt 5.3).

5.1 Lösungsbaustein 1 | Auswahl und Spezifizierung

Lösungsbaustein 1 zielt auf die Auswahl und Spezifizierung von Lean- und Industrie-4.0-Elementen ab, die eine hohe Relevanz für produzierende Unternehmen aufweisen. Dabei werden die in den Abschnitten 5.1.1 und 5.1.2 identifizierten Methoden und Technologien mithilfe eines morphologischen Kastens (siehe Abschnitt 5.1.3) spezifiziert und in Steckbriefe überführt (siehe Abschnitt 5.1.4). Dies schafft die Grundlage für eine strukturierte Methoden- und Technologie-Auswahl (siehe Abschnitt 5.3.4) sowie für die Interdependenzanalyse (siehe Abschnitt 5.2). In Abbildung 5-1 werden die Vorgehensweise, die angestrebten Ergebnisse sowie die zugrunde liegende Forschungsfrage 1 aufgeführt.

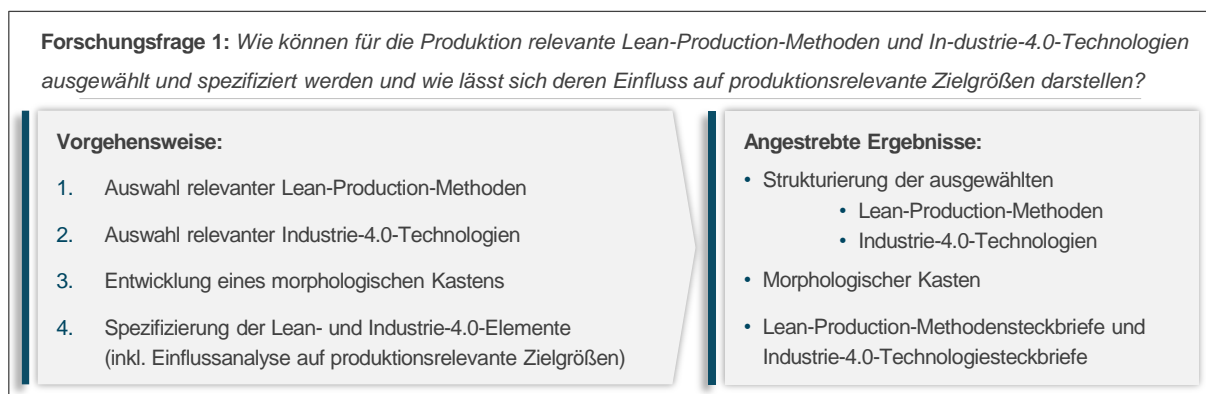


Abbildung 5-1: Vorgehensweise und angestrebte Ergebnisse von Lösungsbaustein 1

Die Erarbeitung von Lösungsbaustein 1 erfolgt in Anlehnung an die vom Autor betreuten wissenschaftlichen Studienarbeiten von FU (2021), FISCHER (2021), KAGERER (2021), KOPHAL (2021), KREUZER (2021), MARTL (2021) und MEBMER (2021).

5.1.1 Auswahl und Strukturierung der Lean-Production-Methoden

Die Auswahl der Lean-Production-Methoden basiert auf den Ergebnissen von AULL (2012, 52 ff.). Dieser identifizierte Lean-Methoden, die für produzierende Unternehmen von hoher Bedeutung sind. Dabei begrenzte er die Auswahl auf 18 hierarchisch gleichwertige Methoden, die das Grundgerüst eines Ganzheitlichen Produktionssystems bilden und in einer Vielzahl von unternehmensspezifischen Produktionssystemen aufgeführt werden.

Um die von AULL (2012, S. 52 ff.) getroffene Auswahl zu validieren und gegebenenfalls zu erweitern, wurden Produktionssysteme von Unternehmen analysiert und es wurde eine Online-Umfrage mit Fachleuten aus der Industrie durchgeführt. Im Rahmen der Analyse der Produktionssysteme zur Identifikation relevanter Lean-Methoden wurden zehn Lean-Produktionssysteme von Unternehmen aus der Automobilindustrie, dem Maschinenbau sowie der Bauindustrie untersucht. Die betrachteten Produktionssysteme beinhalten insgesamt 25 verschiedene Lean-Prinzipien und -Methoden. Die Lean-Elemente, die in mehr als 20 % der Produktionssysteme enthalten sind, finden sich auch in der Auswahl von AULL (2012, 52 ff.) wieder, wogegen Methoden oder Prinzipien mit einer geringeren Anzahl an Nennungen nicht aufgeführt sind. Die Analyseergebnisse sind in Anhang C in Tabelle 0-3 dargestellt.

Unter Berücksichtigung aktueller Forschungsarbeiten wie der von LANGLOTZ UND AURICH (2021) wurden die 18 Methoden nach AULL (2012, 52 ff.) um Shopfloor-Management und Wertstrommanagement erweitert. Um die Relevanz der 20 ausgewählten Lean-Methoden für produzierende Unternehmen zu prüfen, wurde zusätzlich eine Online-Umfrage mit Expertinnen und Experten aus der Industrie durchgeführt (DILLINGER ET AL. 2021c). Die 32 teilnehmenden Fachleute waren in leitender Position in der Produktion oder in produktionsnahen Bereichen tätig und zeichneten sich durch mehrjährige Lean- und Industrie-4.0-Kenntnisse aus. Die partizipierenden Unternehmen ließen sich auf Basis ihrer Branche sowie anhand des letztjährig erzielten Umsatzes segmentieren. Neben der Automobilindustrie (34,4 %) handelt es sich um Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus (25 %), der Elektroindustrie (9,4 %), der Möbelindustrie (6,2 %), der Kunststoffindustrie (3,1 %) sowie sonstiger Branchen (21,9 %). Der Umsatz im Jahr 2019 betrug bei 68,8 % mehr als 40 Mio. €, bei 15,6 % zwischen 12 Mio. € und 40 Mio. € und bei 15,6 % weniger als 12 Mio. €. Die Fachleute stimmten darin überein, dass alle 20 Lean-Methoden für produzierende

Unternehmen eine hohe Relevanz besitzen. In der nachstehenden Abbildung 5-2 sind Lean-Production Methoden (äußerer Ring) aufgeführt und in Anlehnung an AULL (2012, S. 52) in die Kategorien personen-, qualitäts- und logistikorientierte Methoden (innerer Kreis) segmentiert.

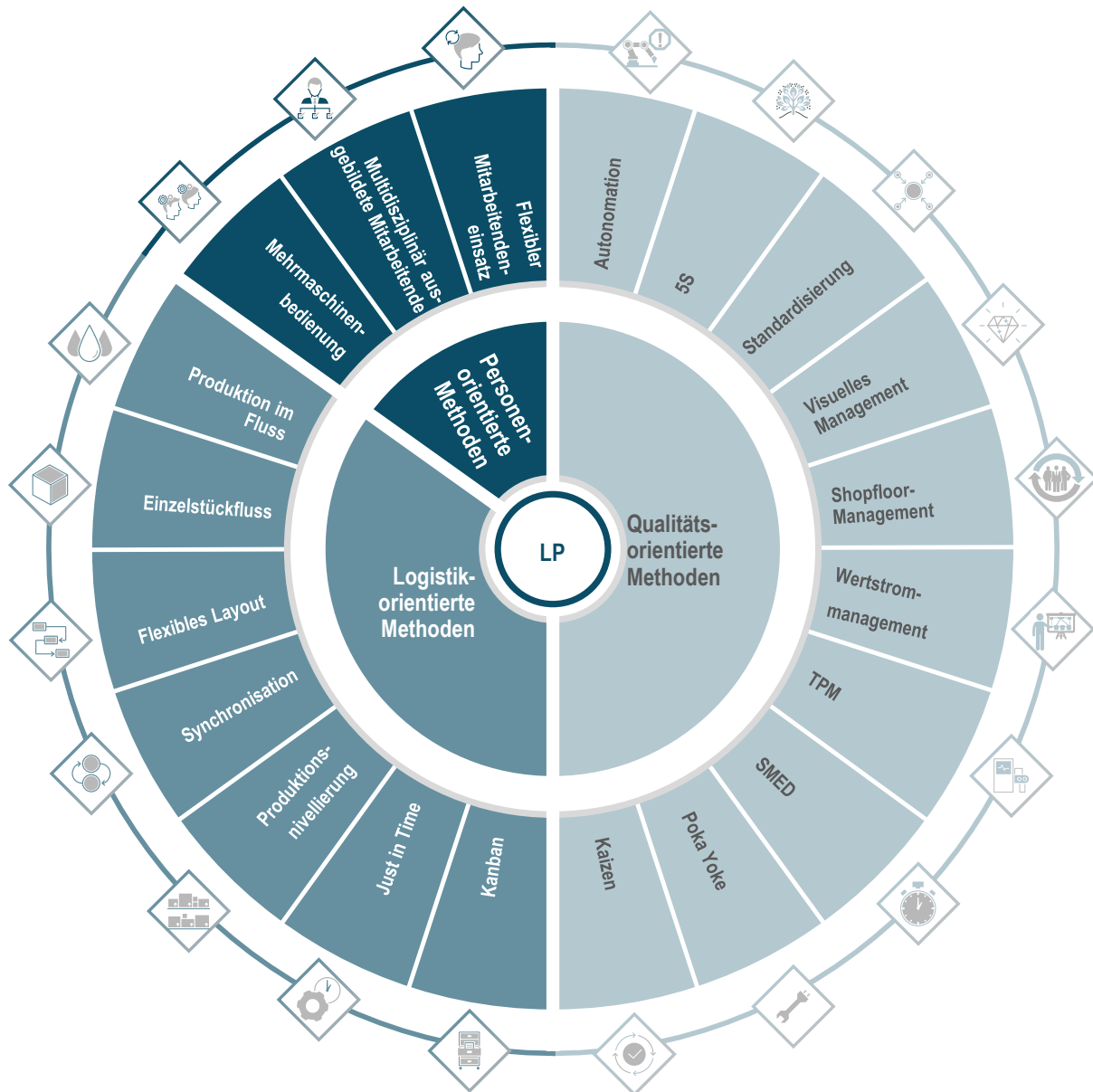


Abbildung 5-2: Übersicht der 20 Lean-Production-Methoden in Anlehnung an AULL (2012, 52 ff.)

Eine weiterführende Kurzbeschreibung der einzelnen Methoden wird in der nachfolgenden Tabelle bereitgestellt (siehe Tabelle 5-1). Für ein tiefergehendes Verständnis zu den Lean-Production-Methoden sei darüber hinaus auf Literatur zum Themengebiet Lean Production nach LIKER (2013), MONDEN (2011), WOMACK ET AL. (1990), ŌNO (2013), VDI 2870-2, BICHENO UND HOLWEG (2016) sowie DOMBROWSKI UND MIELKE (2015) verwiesen, die die Lean-Production-Gestaltungsprinzipien, -Methoden und -Werkzeuge umfassend beschreiben.

Tabelle 5-1: Kurzbeschreibung der ausgewählten Lean-Production-Methoden in Anlehnung an FISCHER (2021, S. 28 ff.), KAGERER (2021, S. 14 ff.), KOPHAL (2021, 21 ff.) und MARTL (2021, S. 84 ff.)

Methode	Ziel	Kurzbeschreibung
5S	Schaffung von Übersicht und Ordnung durch Standardisierung und Selbstdisziplin der Mitarbeitenden (VDI 2870-2, S. 11)	Die Methode 5S beschreibt die wiederkehrende Durchführung von fünf systematisierten Arbeitsschritten, die (1) Sortieren, (2) Systematisieren, (3) Säubern, (4) Standardisieren und (5) Selbstdisziplin umfassen (jap. Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu, Shitsuke). (VDI 2870-2, S. 11, WOMACK & JONES 1996, S. 389)
Autonomation (Jidoka)	Generierung selbstständig ablaufender Regelkreise, die zur Vermeidung einer Fehlerfortpflanzung den Fertigungsprozess überwachen (VDI 2870-2, S. 26)	Autonomation bzw. jap. Jidoka (dt. Automation mit menschlicher Intelligenz) ist die Abkürzung für autonome Automation und beschreibt die Integration einer Fehlervermeidung und -erkennung in einem ablaufenden Prozess. Es werden Mechanismen eingesetzt, die eine eigenständige Korrektur der Produktionsprozesse ermöglichen. Bei Fehlern und Störungen wird der Prozess automatisch gestoppt. Somit wird der Fehler durch den Mitarbeitenden erkannt und eine Fehlerfortpflanzung vermieden. Diese Methode ermöglicht die Mehrmaschinenbedienung durch Mitarbeitende. (VDI 2870-2, S.26, AULL 2012, S. 65, DENNIS 2017, S. 89 f.)
Standardisierung	Schnelles Erkennen von Abweichungen durch definierte Prozessstandards, die den Mitarbeitenden bekannt sind (VDI 2870-2, S. 13)	Standardisierung beschreibt die einheitliche und feste Definition von Arbeitsabläufen und beinhaltet folgende Merkmale: (1) Inhalt eines jeden Arbeitsablaufs, (2) Reihenfolge des Arbeitsablaufs, (3) Verantwortlichkeit des Arbeitsablaufs, (4) zu verwendende Werkzeuge, Technologien und Methoden je Arbeitsablauf. Die Standardisierung bildet die Basis von kontinuierlicher Verbesserung und der Identifikation von Anomalitäten in Produktionsprozessen. (ÖNO 2013, S. 156, AULL 2012, S. 67, VDI 2870-2, S. 13)
Visuelles Management	Erzeugung von Transparenz in allen Prozessen sowie Visualisierung aktueller Zustände und Entwicklungen (AULL 2012, S. 68)	Das visuelle Management ist eine Methode zur einfachen und verständlichen Darstellung von Informationen, z. B. von Arbeitsabläufen, Zielen, Ergebnissen oder Störungen. Sie ermöglichen es der Führungsperson und den operativ Mitarbeitenden Personen, den vorherrschenden System- und Prozessstatus auf einen Blick zu erfassen. Die Visualisierung kann beispielsweise folgende Formen enthalten: Farbcodierung, Kennzeichnung von Produktionsanlagen, Hinweise oder Andon-Boards. (VDI 2870-2, S. 44, AULL 2012, S. 68)
Shopfloor-Management	Nachhaltige Sicherstellung des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses sowie vereinfachte und transparente Gestaltung von Entscheidungsprozessen und Kommunikationsstrukturen (VDI 2870-2, S. 47)	Beim Shopfloor-Management wird das Führungspersonal dazu angehalten, regelmäßig an den Ort der Wertschöpfung zu gehen, um gemeinsam mit den operativ Mitarbeitenden Personen Problemlösungsprozesse zu initiieren. Die Mitarbeitenden Personen sollen durch gezielte Fragen zur eigenständigen Problemlösung befähigt werden. Die Führungspersonen dienen als Trainer*innen und Mentor*innen für die operative Belegschaft und es wird die vertikale Unternehmenskommunikation gefördert und gestärkt. (VDI 2870-2, S. 47)
Wertstrommanagement	Generierung eines umfassenden Prozessverständnisses und Ermöglichung von zielorientierten Verbesserungen (GORECKI & PAUTSCH 2014, S. 103)	Das Wertstrommanagement besteht aus der Wertstromanalyse sowie dem Wertstromdesign. Im Zuge der Wertstromanalyse werden die Prozesse analysiert und visualisiert sowie Verbesserungspotenziale aufgezeigt. Die Analyse erfolgt produktgruppenspezifisch und führt zunächst zu einem Gesamtbild des jeweiligen Wertschöpfungsprozesses. Die relevanten Informationen werden am Ort des Geschehens erfasst, um die realen Gegebenheiten zu berücksichtigen. Dabei handelt es sich um eine Momentaufnahme des aktuellen Prozesses, die neben den einzelnen Prozessschritten grundsätzliche Angaben zum Materialfluss, Informationsfluss, zu notwendigen Dokumenten sowie weitere Zusatzinformationen beinhaltet. Diese Momentaufnahme ist die Ausgangssituation für das darauf folgende Wertstromdesign, in welchem beispielsweise der Material- und Informationsfluss des Prozesses anhand von Lean-Production-Methoden oder Industrie-4.0-Technologien verbessert werden soll. (GORECKI & PAUTSCH 2014, S. 103 ff., ROTHER & SHOOK 2003)

Methode	Ziel	Kurzbeschreibung
Total Productive Maintenance	Vermeidung von Produktivitätsverlusten zur Erreichung einer hohen Produktionsanlagenvorfügbarkeit, geringer Nacharbeits- und Ausschussmengen (VDI 2870-2, S. 105)	TPM ist eine Methode für eine kontinuierliche und effiziente vorbeugende Instandhaltung von Maschinen, Anlagen und Werkzeugen unter Selbstverantwortung der Mitarbeitenden (autonome Instandhaltung). Die Tätigkeiten des Instandhaltungspersonals fokussieren sich auf komplexe Reparaturtätigkeiten, Optimierungsaufgaben und Inspektionen anstatt einfacher, wiederkehrender Wartungsaufgaben (reinigen, einstellen, schmieren und in Betrieb nehmen). Die fünf Säulen des TPM bestehen aus: (1) kontinuierlicher Anlagenverbesserung, (2) autonomer Instandhaltung, (3) geplanter Instandhaltung, (4) Schulung und Training, (5) Instandhaltungspräventionen (VDI 2870-2, S. 105, BRUNNER 2008, S. 73 ff.)
Single Minute Exchange of Die	Reduzierung von Rüstzeiten und Erzielung einer nivellierten Produktion, um mit kleinen Losgrößen und damit verbundenen häufigen Rüstwechseln wirtschaftlich zu produzieren (VDI 2870-2, S. 74)	Single Minute Exchange of Die (dt. Werkzeugwechsel im einstelligen Minutenbereich) bzw. Schnellrüstverfahren sind Techniken zur Rüstzeitreduzierung, um Produktionsmaschinen in unter zehn Minuten umrüsten zu können. Entscheidend ist die Trennung interner und externer Rüstzeiten. Interne Rüstzeitanteile gilt es zu reduzieren, da diese nur bei Stillstand der Maschinen erfolgen können, während externe Rüstzeitanteile hauptzeitparallel während des Betriebs der Produktionsanlage durchgeführt werden können. (VDI 2870-2, S. 74, BICHENO & HOLWEG 2016, S. 148 ff., AULL 2012, S. 72 ff.)
Poka Yoke	Verhinderung und Vermeidung (Yoke) zufälliger Fehler (Poka) (VDI 2870-2, S. 33)	Poka Yoke ist eine Methode zur Vermeidung unabsichtlicher Fehler. Mithilfe einfacher und zuverlässiger Vorrichtungen, die sich an Maschinen, Werkzeugen oder Produkten befinden, sollen Defekte vermieden oder unmittelbar erkannt werden. Hierbei handelt es sich um zumeist kostengünstige und sofort einführbare Lösungen, die durch eine technische Vorkehrung oder eine Vorgehensweise den unbeabsichtigten Fehler vermeiden. (VDI 2870-2, S. 33, AULL 2012, S. 74)
Kaizen	Gemeinsames Streben nach kontinuierlicher Verbesserung (IMAI 1986)	Kaizen bezeichnet eine strukturierte Vorgehensweise für einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess (KVP). Der aus Japan stammende Begriff besteht aus den Wortsilben ‚Kai‘ (dt. Veränderung, Wandel) und ‚Zen‘ (dt. zum Besseren). Die Verbesserungsvorschläge der Mitarbeitenden werden den Phasen des PDCA-Zyklus folgend umgesetzt: ‚Plan – Do – Check – Act‘ (dt. ‚Planung – Anwendung – Überprüfung – Anpassung‘). (AULL 2012, S. 76 ff., BICHENO & HOLWEG 2016, S. 62 ff.)
Kanban	Einrichtung einer nachfrageorientierten Produktionssteuerung, um entsprechend dem Kundenbedarf zu produzieren (VDI 2870-2, S. 85)	Kanban (dt. Karte) ist eine Methode der Produktionsprozesssteuerung, die sich ausschließlich am tatsächlichen Kundenbedarf von Materialien oder Bauteilen orientiert und folgende Grundprinzipien berücksichtigt: (1) Pull-Prinzip, (2) Fertigung nach Kundenauftrag (Materialentnahme), (3) dezentrale Selbststeuerung, (4) Auftragsauslösung durch Kanban-Signal. (VDI 2870-2, S. 85, AULL 2012, S. 60, ÖNO 2013, S. 93)
Just in Time (JiT)	Reduzierung der Bestände und Durchlaufzeiten durch synchronisierte Prozesse zwischen Lieferant und Kunde (VDI 2870-2, S. 83)	Eine Just-in-Time-Bereitstellung von Teilen, Materialien oder Baugruppen beschreibt eine nachfragegerechte Anlieferung ohne Lagerhaltung in der richtigen Menge, Zeit, Qualität, Information und an der richtigen Stelle innerhalb der Produktion. Die Bestände zwischen den Prozessen sind auf ein Minimum beschränkt, um Wartezeiten zu vermeiden. (VDI 2870-2, S. 83, AULL 2012, S. 59 f.)
Produktionsnivellierung (Heijunka)	Gleichmäßige Auslastung der Produktionskapazitäten und Reduzierung der Durchlaufzeit (VDI 2870-2, S. 92)	Durch die Produktionsnivellierung werden unregelmäßig eingehende Kundenaufträge in ein regelmäßiges, wiederkehrendes und standardisiertes Produktionsprogramm überführt. Die Aufteilung der Kundenaufträge bewirkt eine Entkopplung der Auftragsmenge und zeitlichen Reihenfolge. Dabei bestimmen die Produktionserfordernisse die Prozesskapazität, wogegen Produkte, Kundenintegration und Reaktionszeit die Auswahl der Produktionsstrategie bedingen. (VDI 2870-2, S. 92, AULL 2012, S. 57 ff., SHINGŌ 1992, S. 254)

Methode	Ziel	Kurzbeschreibung
Synchronisation (Taktzeit)	Anpassung der Arbeitsumfänge an eine einheitliche Taktzeit (AULL 2012, S. 56, DOMBROWSKI & MIELKE 2015, S. 315)	Die Synchronisation beschreibt die Harmonisierung aller Arbeitsprozesse, um eine einheitliche Taktzeit zu erreichen. Dies kann exemplarisch durch nachstehende Maßnahmen erfolgen: Zusammenfassung von Einzelprozessen zu Gesamtbearbeitungsprozessen, Geschwindigkeitsanpassung von Anlagen oder Anpassung der Mitarbeitendenanzahl an den Arbeitsstationen. (AULL 2012, S. 56, DOMBROWSKI & MIELKE 2015, S. 315)
Flexibles Layout	Transparente Anordnung von Fertigungs- und Montageeinheiten zur Flexibilisierung der Ausbringung (VDI 2870-2, S. 80)	Das flexible Layout ist eine Maßnahme zur Flexibilitätssteigerung von Arbeitsabläufen bei einhergehender Senkung der Betriebskosten durch folgendes Vorgehen: (1) Definition von Materialflusssequenzen, (2) Abgrenzung eines definierten Shopfloorbereichs, (3) autarkes Team pro Shopfloorbereich, (4) multidisziplinär ausgebildete Mitarbeitende für einen Shopfloorbereich. (VDI 2870-2, S. 80)
Einzelstückflusses	Minimierung der Durchlaufzeiten durch die Reduzierung der Losgröße (VDI 2870-2, S. 71)	Der Begriff Einzelstückfluss bedeutet eine einzelstückbezogene Produktion mit Losgröße ‚1‘, die synchron zum Kundentakt verläuft. Eine Weitergabe der Bauteile oder Produkte an die nächste Prozessstufe erfolgt unmittelbar, ohne auf die Beendigung des kompletten Arbeitsloses zu warten. Eine verbesserte Fehlererkennung ist durch eine schnelle Rückkopplung bei auftretenden Störungen anzunehmen. (VDI 2870-2, S. 71)
Produktion im Fluss	Kontinuierlicher Materialfluss durch den Produktionsbereich (AULL 2012, S. 54, SHINGŌ 1992, S. 256)	Produktion im Fluss bedeutet die Ausrichtung des Wertstroms auf die Kundennachfrage („Pull“) durch fünf Grundprinzipien: (1) Erzeugen eines Prozessflusses entlang der Wertschöpfungskette, (2) Fokussierung auf End-to-End-Prozesse, (3) Abstimmung des Wertstromflusses auf die Kundennachfrage, (4) stetiges Streben nach Verbesserung. (AULL 2012, S. 54, SHINGŌ 1992, S. 256)
Mehrmaschinenbedienung	Gestaltung der Arbeitsabfolge für die mitarbeitenden Personen, sodass keine Wartezeiten entstehen (AULL 2012, S. 62, SHINGŌ 1992, S. 258)	Im Zuge der Mehrmaschinenbedienung bestehen die Aufgaben der Mitarbeitenden primär im Rüsten der Maschinen, Durchführen der Bestückungsprozesse und der Entnahme der Fertigteile. Somit werden niedrigere Anlagenauslastungsgrade in Kauf genommen, um eine hohe Mitarbeitendenauslastung sicherzustellen. Begründet liegt dies in der Annahme, dass die Mitarbeitendenkosten höher als die Kosten für ungenutzte Maschinenkapazitäten sind. (AULL 2012, S. 62, SHINGŌ 1992, S. 258)
Multidisziplinär ausgebildete Mitarbeitende	Flexible Zuteilung von Mitarbeitenden auf verschiedene Arbeitsplätze und Vermeidung von Mitarbeitendenausfällen (AULL 2012, S. 63)	Multidisziplinär ausgebildete Mitarbeitende beherrschen unterschiedliche Arbeitsabläufe. Dafür werden die operativ mitarbeitenden Personen gezielt für mehrere Arbeitsstationen trainiert und ausgebildet. Zur Vertiefung und Wiederholung des Erlernten wechseln die Mitarbeitenden in definierten Zyklen die Arbeitsplätze. (AULL 2012, S. 63)
Flexibler Mitarbeitendeinsatz	Unkomplizierte und schnelle Anpassung der Mitarbeitenden an die Schwankungen des Produktionsbedarfs in Arbeitssystemen (AULL 2012, S. 62)	Eine flexible Personaleinteilung der Belegschaft, etwa aufgrund von Absatzschwankungen, wird durch Schulungen der Mitarbeitenden, z. B. durch Job-Rotation, ermöglicht. Die Mitarbeitenden entwickeln eine Vielfalt an Fertigkeiten und sind dadurch flexibel einsetzbar. (AULL 2012, S. 62, MANN 2005, S. 140 ff. MONDEN 2011, S. 159)

5.1.2 Auswahl und Strukturierung der Industrie-4.0-Technologien

Für die Entwicklung der Lean-4.0-Implementierungsstrategie sind neben den Lean-Methoden auch relevante Industrie-4.0-Technologien auszuwählen und zu strukturieren. Die Vorgehensweise dieses Abschnitts untergliedert sich in zwei übergeordnete Phasen, wobei in der ersten Phase die Auswahl und in der zweiten Phase die Strukturierung der Technologien erfolgt. In Phase 1 wurde zunächst in Anlehnung an VERNIM ET AL. (2021) eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Zudem wurden Anwendungsfälle aus der

Industrie basierend auf der Plattform Industrie 4.0 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) sowie des BMBF analysiert. Die vorausgewählten Technologien wurden anschließend mithilfe einer Befragung von Fachleuten validiert. Die zweite Phase zielte darauf ab, die identifizierten Technologien zu strukturieren. Dies erfolgte durch eine Mapping- und Clustering-Analyse unter Anwendung der Software VOSviewer. Die Ergebnisse sind in der Publikation von DILLINGER ET AL. (2021b) veröffentlicht.

Phase 1: Auswahl: Den ersten Schritt zur Auswahl der Industrie-4.0-Technologien bildete eine umfassende Literaturanalyse, die im Zuge der vom Autor angeleiteten Forschungsarbeit von MEßMER (2021) durchgeführt wurde und sich an der Vorgehensweise nach VERNIM ET AL. (2021) orientierte (siehe Anhang D). Diesem Ansatz folgend wurden zunächst sechs Forschungskategorien wie ‚Smart‘ oder ‚Factory‘ gebildet, denen weitere Schlüsselbegriffe wie ‚Industry 4.0‘, ‚Production‘ oder ‚Digital‘ zugeordnet wurden (siehe Anhang E). Die identifizierten Forschungskategorien und Begriffe wurden für einen ersten Suchdurchlauf in der Literaturdatenbank Scopus mit Operatoren der booleschen Algebra für Konjunktion (UND) und Disjunktion (ODER) verknüpft. Durch iterative Suchdurchläufe wurden die Begriffe anschließend modifiziert und mit einer Disjunktion-Funktion in Beziehung gesetzt. Die Recherche umfasste einen Veröffentlichungszeitraum von Januar 2016 bis Oktober 2020 und war auf Konferenzbeiträge, Review-Artikel und Journal-Artikel aus dem Forschungsfeld Engineering limitiert (MEßMER 2021, S. 52 ff.). Der finale Suchdurchlauf lieferte 103 Forschungsarbeiten, woraus 43 (57 %) Fachbeiträge als für diese Arbeit relevant deklariert werden konnten. In den ausgewählten Publikationen konnten abschließend 34 Industrie-4.0-Technologien identifiziert werden (siehe Anhang F) (MEßMER 2021, S. 55 ff.).

Ergänzend zur Literaturanalyse wurden Anwendungsfälle der Plattform Industrie 4.0 des BMWK sowie des BMBF untersucht (KREUZER 2021, S. 40 ff.). Die Industrie-4.0-Plattform führt über 400 Industrieprojekte und zielt auf die Vernetzung von Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen ab, um die Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen in Deutschland durch die Einführung innovativer Technologien zu stärken (BMWK & BMBF 2022). Der für die vorliegende Arbeit gewählte Fokus liegt auf der Analyse von Anwendungsfällen aus dem Wertschöpfungsbereich Produktion und Lieferkette und umfasst insgesamt 308 Projektbeschreibungen (Stand 01.09.2021). Der Reifegrad der darin aufgeführten Industrie-4.0-Technologien reicht von der Forschungs- und Entwicklungsphase (12,5 %) über die Demonstratorphase (18,2 %) und die Markteinführungsphase (22,7 %) bis zur Marktreifephase (46,6 %) (BMWK & BMBF 2022). Durch die unterschiedliche Technologiereife ist sichergestellt, dass sowohl etablierte als auch emergente Technologien berücksichtigt wurden. Aus den 308 Anwendungsfällen wurden insgesamt 32 Industrie-4.0-Technologien identifiziert, die in Anhang G aufgeführt sind.

Die Ergebnisse der Literaturanalyse und der Anwendungsfallanalyse bildeten die Grundlage für die abschließende Online-Umfrage mit Fachleuten aus der Industrie sowie für die semistrukturierten Interviews mit Expertinnen und Experten aus der Forschung. Im Rahmen der Online-Umfrage wurde bewertet, ob die vorausgewählten Technologien zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen beitragen. Das Teilnehmendenfeld setzte sich analog zur Auswahl der Lean-Methoden zusammen (siehe Abschnitt 5.1.1). Im Zuge der Online-Umfrage konnten die in der Literatur- und Anwendungsfallanalyse identifizierten Industrie-4.0-Technologien bestätigt werden. Zudem konnten einzelne Technologien durch strukturierte Interviews mit Fachleuten aus der Industrie und Forschung zu übergeordneten Technologien subsumiert werden. Die resultierenden 26 Industrie-4.0-Technologien dienten als Eingangsgröße für die Technologie-Strukturierung (Phase 2).

Phase 2: Strukturierung: Für die Strukturierung der Industrie-4.0-Technologien wurde die Software VOSviewer verwendet, die eine Mapping- und Clustering-Analyse bibliometrischer Daten ermöglicht (WALTMAN ET AL. 2010, S. 629 ff.). Die Auswahl der notwendigen wissenschaftlichen Publikationen basierte auf der in der ersten Phase durchgeführten Literaturanalyse nach MEßMER (2021), die um weitere Forschungsbeiträge aus dem Themenfeld Industrie 4.0 ergänzt wurde. Als weitere Suchbegriffe fungierten neben dem Begriff ‚Industrie 4.0‘ die Industrie-4.0-Haupttechnologiefelder aus Abbildung 2-3. Die Suche wurde durch einen Veröffentlichungszeitraum zwischen den Jahren 2011 bis 2021 sowie die Einschränkung auf Konferenzbeiträge, Review-Artikel und Journal-Artikel aus dem Forschungsfeld Engineering limitiert. Insgesamt konnten in der Literaturdatenbank Scopus etwa 4000 wissenschaftliche Beiträge für die bibliometrische Netzwerkanalyse identifiziert werden (DILLINGER ET AL. 2021b). Darauf aufbauend wurden mithilfe des Text-Mining-Algorithmus der Software VOSviewer 18 249 Begriffe identifiziert, die im Titel, in den Schlüsselwörtern oder in der Kurzzusammenfassung der Publikation mehrfach genannt sind. Die am häufigsten aufgeführten Terminologien wurden nach den darin enthaltenen Industrie-4.0-Technologien gefiltert und die Duplikate entfernt. Zudem wurde eine Thesaurus-Datenbank für synonym verwendete Terminologien wie ‚additiv Manufacturing‘ und ‚additive Fertigung‘ angelegt (DILLINGER ET AL. 2021b). Dies bildete die Grundlage für die Clustering- und Mapping-Untersuchung der Technologien unter Anwendung einer Kookkurrenz-Analyse. Bei dieser Analyse liegen wiederholt gemeinsam genannte Terminologien in einem zweidimensionalen Netzwerk näher zusammen. Aufgrund der Cluster-Analyse ließen sich die 26 Industrie-4.0-Technologien den neun Haupttechnologiefeldern aus Abschnitt 2.2.2 zuordnen. Die Ergebnisse der Analyse wurden zudem abschließend von Fachleuten aus der Industrie und Forschung geprüft (DILLINGER ET AL. 2021b). Abbildung 5-3 zeigt die für diese Arbeit relevanten Industrie-4.0-Technologien, die in neun Technologiefelder segmentiert sind. Zusätzlich sind die Technologiefelder wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben in die

Bereiche Smart Operations, Smart Systems und Smart Data subsumiert (KAGERER 2021, S. 20 f.). Es sei angemerkt, dass das Vorgehen zur Clustering- und Mapping-Analyse nochmals ausführlich in Abschnitt 5.2.2 im Rahmen der Industrie-4.0-Interdependenzanalyse beschrieben ist.

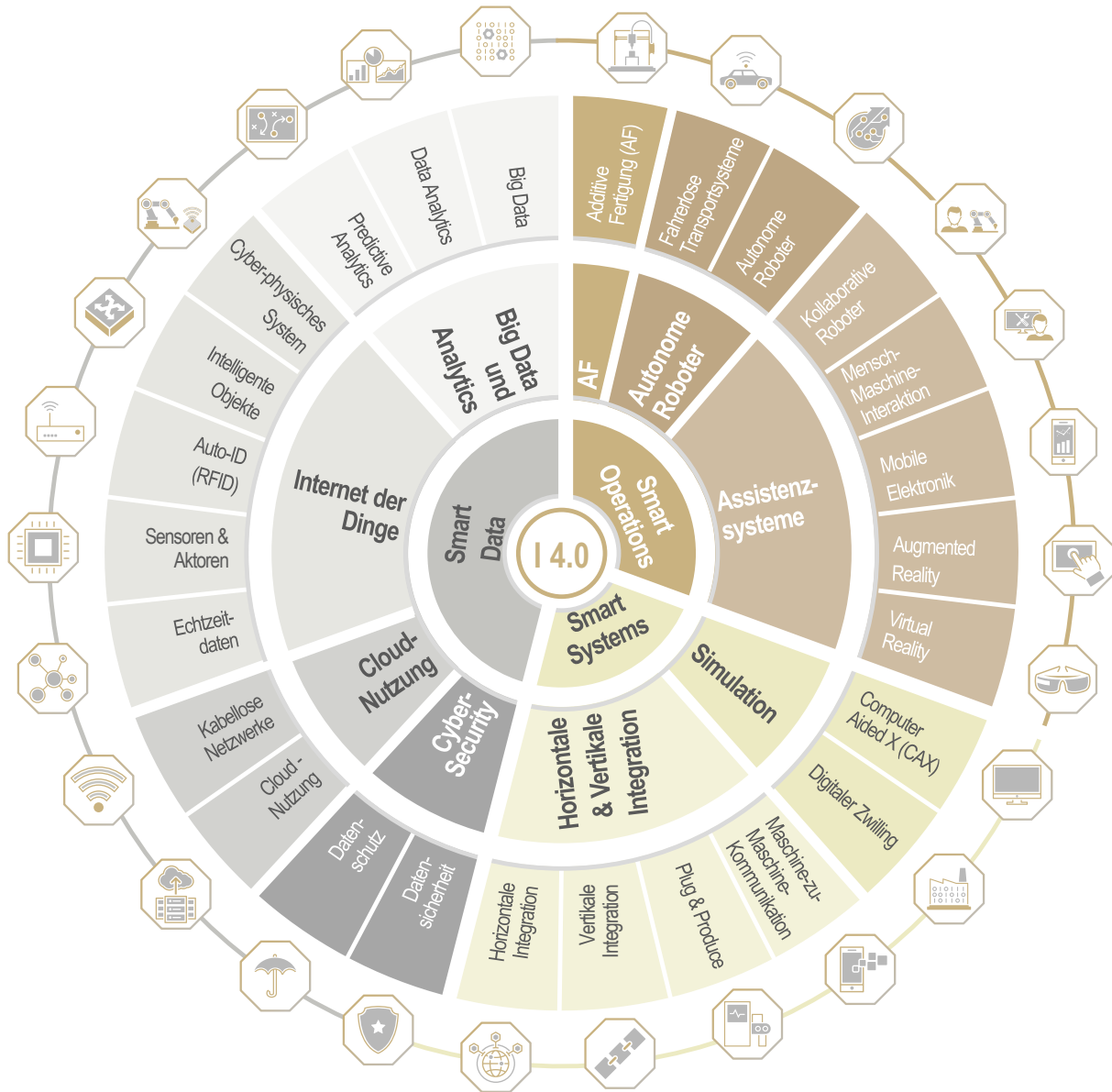


Abbildung 5-3: Übersicht der 26 Industrie-4.0-Technologien (DILLINGER ET AL. 2021b)

Die 26 Industrie-4.0-Technologien werden in nachfolgender Tabelle 5-2 vorgestellt. Die Kurzzusammenfassungen der Technologien beziehen sich auf eine umfassende Auswahl an begleitender Literatur, beispielsweise BARTODZIEJ (2017), BAUERNHANSL ET AL. (2014), REINHART (2017), PISTORIUS (2020) oder HUBER (2016).

Tabelle 5-2: Kurzbeschreibung der ausgewählten Industrie-4.0-Technologien in Anlehnung an FISCHER (2021, S. 28 ff.), KAGERER (2021, S. 14 ff.) KOPHAL (2021, 21 ff.) und MARTL (2021, S. 84 ff.)

Technologie	Ziel	Kurzbeschreibung
Additive Fertigung	Herstellung geometrisch komplexer, funktionsoptimierter und teilweise mechatronischer Bauteile bei kundenindividueller Umsetzung bis hin zur Losgröße ,1‘ (HAAS 2018, S. 44 REINHART ET AL. 2017a, S. 718 ff.)	Als additive Fertigung wird ein automatisierter Prozess bezeichnet, bei dem ein Bauteil durch schichtweises Hinzufügen eines Werkstoffs (verschiedene Kunststoffe, Metalle und Verbundwerkstoffe) aufgebaut wird. Dies basiert vornehmlich auf digitalen 3D-Konstruktionsdaten (CAD). Die additive Fertigung ist ein wirtschaftliches Herstellungsverfahren von Prototypen, Werkzeugen und Endprodukten. (HAAS 2018, S. 44, PISTORIUS 2020, S. 55 ff. REINHART ET AL. 2017a, S. 718 ff.)
Fahrerlose Transportsysteme	Verringerung der Durchlaufzeiten und Herstellungskosten bei gleichzeitig hoher Flexibilität und Zuverlässigkeit durch fahrerlose Transporte (VDI 2510, S. 7)	Fahrerlose Transportsysteme sind überwiegend innerbetriebliche, flurgebundene Fördersysteme. Sie ermöglichen die Implementierung automatisch gesteuerter Flurförderzeuge in die Intralogistik, die effizient den Waren- und Materialfluss innerhalb und außerhalb von Gebäuden übernehmen. (PISTORIUS 2020, S. 61 ff., VDI 2510, S. 7)
Autonome Roboter	Flexible Reaktion auf Belastungsspitzen und veränderte Kundenwünsche sowie Minimierung von zeitaufwändigen Umbauvorgängen (PISTORIUS 2020, S. 58 ff.)	Autonome Roboter können sich in ihrer Umgebung selbstständig, präzise und ohne Unterstützung bewegen. Sie sind in der Lage, autonom zu agieren und sich zu vernetzen. Zudem können sie sich situativ selbst steuern und konfigurieren. Sie können dabei flexibel zwischen Arbeitsabläufen wechseln. (PISTORIUS 2020, S. 58 ff., MICHNIEWICZ & REINHART 2016, S. 175)
Kollaborative Roboter	Physische Unterstützung der Mitarbeitenden durch unmittelbar in der Nähe arbeitende Roboter (ohne Schutzeinhausung) (HUBER 2016, S. 50)	Kollaborative Roboter sind mittels Sensoren in der Lage, ohne zusätzliche Schutzeinhausung mit den Mitarbeitenden zu kollaborieren und ermöglichen so den flexiblen Einsatz innerhalb sich verändernder Produktionsumgebungen. (PISTORIUS 2020, S. 58 ff.)
Mensch-Maschine-Interaktion	Unterstützung von Mitarbeitenden bei der Ausführung von Tätigkeiten (HUBER 2016, S. 289 ff.)	Mensch-Maschine-Interaktion ist ein integraler softwarebasierter Bestandteil von Anlagensystemen, um Informationen und Kontrollelemente bereitzustellen und somit die Mitarbeitenden möglichst personenindividuell in der Ausführung ihrer Tätigkeit zu unterstützen (BARTODZIEJ 2017, S. 69).
Mobile Elektronik	Unterstützung von Mitarbeitenden beim Zugang zu Informationen, Diensten und Applikationen in beliebiger Umgebung (BAUERNHANSL ET AL. 2014, S. 551, PISTORIUS 2020, S. 42 ff.)	Mobile Elektronik beschreibt den zeit- und ortsunabhängigen Einsatz von Computern, der den Zugang zu Informationen und Applikationen erlaubt. Alle Devices zeichnen sich durch ihre drahtlose Kommunikationsfähigkeit, Mobilität und Tragbarkeit aus. Bei den Geräteklassen kann zwischen Notebooks, Tablets, Mobiltelefonen und Wearables unterschieden werden. (BAUERNHANSL ET AL. 2014, S. 551, PISTORIUS 2020, S. 42 ff.)
Augmented Reality (AR)	Computergestützte Erweiterung der menschlichen Umgebungswahrnehmung (HAAS 2018, S. 44)	Bei Augmented Reality wird die reale Umgebung mit virtuellen Informationen (Darstellung virtueller Objekte und zusätzlicher Informationen in Form von Texten) überlagert, sodass die reale und die virtuelle Welt gleichzeitig und in Echtzeit wahrgenommen werden. Damit sollen die mitarbeitenden Personen durch die gezielte Bereitstellung von Informationen bei ihren Aufgaben unterstützt werden. (BAUERNHANSL ET AL. 2014, S. 486 f., HAAS 2018, S. 44)
Virtual Reality (VR)	Darstellung einer vollständig computergenerierten, interaktiven, virtuellen Umgebung (HAAS 2018, S. 51)	Die Virtual-Reality-Technologie ist eine Mensch-Maschine-Schnittstelle und ermöglicht den mitarbeitenden Personen den Zugang in eine computergenerierte, dreidimensionale virtuelle Welt. Durch das Tragen von VR-Brillen und Datenhandschuhen kann die virtuelle Welt als Realität wahrgenommen werden. Somit ist es möglich, Bestandteil einer virtuellen Welt zu sein und mit ihr zu interagieren. Die Technologie kann beispielsweise für Planungs- und Anlernfälle eingesetzt werden. (HAAS 2018, S. 51, REINHART 2017, S. 466 ff.)

Technologie	Ziel	Kurzbeschreibung
Computer-aided X	Bestmögliche Nutzung und Pflege von Produktdaten über den gesamten Produktlebenszyklus und damit einhergehende Reduzierung der Konstruktionszeit von Produkten (BRACHT ET AL. 2018, S. 192)	Computer-aided X ist ein Sammelbegriff für alle computergestützten Ingenieurarbeiten (Entwicklung, Planung, Berechnung, Simulation und Analyse) im Bereich der Neukonstruktion oder auftragsbezogenen Projektierung. Das ‚X‘ dient als Variable für unterschiedliche Ausprägungen (z. B. Computer-aided Design (CAD) oder Computer-aided Engineering (CAE)). Eine definierte konsistente Datenbasis der Produkte ist immanent für die einheitliche Informationsnutzung. (BRACHT ET AL. 2018, S. 192 SCHNECK 2015)
Digitaler Zwilling	Reduktion der Planungskosten und -zeiten (PISTORIUS 2020, S. 47 ff.)	Der digitale Zwilling ist ein virtuelles Abbild von Produkten, Produktionsstrukturen oder Prozessen, der möglichst alle Informationen über sein reales Spiegelbild (z. B. reales Produkt oder Produktionslinie) enthält. Die Versorgung des Zwillings mit Daten aus dem laufenden Betrieb in Echtzeit ermöglicht die Speicherung von Lebenszyklusinformationen und die Durchführung von Simulationen. (BRACHT ET AL. 2018, S. 13, HAAS 2018, S. 46, PISTORIUS 2020, S. 47 ff.)
Maschine-zu-Maschine-Kommunikation	Kommunikation und Interaktion der Anlagen untereinander, um eine anpassungsfähige, flexible Produktion zu realisieren (HUBER 2016, S. 41)	Die Maschine-zu-Maschine-Kommunikation steht für den automatisierten Datenaustausch zwischen den Maschinen über verschiedene Datenebenen. Im Zuge der industriellen Umsetzung werden Feldbus-, Industrial-Ethernet- und Internet-Schnittstellen verwendet. (STAHL ET AL. 2015, S. 15)
Plug & Produce	Inbetriebnahme vernetzter, technischer Systeme mit geringem manuellen Aufwand (BAUERNHANSL ET AL. 2014, S. 187)	Plug & Produce beschreibt die Fähigkeit von Produktionsanlagen, sich über standardisierte Schnittstellen flexibel an Anlagen anzudocken und deren volle Funktionalität konfigurationslos zu nutzen. (BAUERNHANSL ET AL. 2014, S. 187, DÜRKOP & JASPERNEITE 2017, S. 13)
Vertikale Integration	Entwicklung und Etablierung eines netzwerkartigen Wertschöpfungs-systems zur Verbesserung des Datenaustauschs (SCHUH ET AL. 2017, S. 18 f.)	Die Technologie der vertikalen Integration beschreibt die barrierefreie Kopplung von Systemblöcken unterschiedlicher Hierarchieebenen (z. B. ERP, PLM, MES und MRO) über geeignete Schnittstellen. Die klassischen Strukturen der Automatisierungspyramide innerhalb eines produzierenden Unternehmens werden somit aufgelöst. (PISTORIUS 2020, S. 10 f., SCHUH ET AL. 2017, S. 18 f.)
Horizontale Integration	Generierung von herstellerübergreifenden, flexiblen Entwicklungs- und Produktionsnetzwerken (SCHUH ET AL. 2017, S. 19 f.)	Die horizontale Integration beschreibt die ganzheitliche Verknüpfung verschiedener IT-Systeme für die Verarbeitung von Energie-, Material- und Informationsflüssen innerhalb eines Unternehmens sowie unternehmensübergreifend entlang der Wertschöpfungskette. Zentrale Bestandteile dieser Technologie sind die Vernetzung mit Zulieferern und Wertschöpfungspartnern, die innerbetriebliche Vernetzung sowie die Vernetzung mit Kunden. (PISTORIUS 2020, S. 10 f., SCHUH ET AL. 2017, S. 19 f.)
Datensicherheit	Schutz von Daten vor unberechtigtem Zugriff (BRACHT ET AL. 2018, S. 177 ff.)	Unternehmensübergreifende, technische und organisatorische Konzepte, die gewährleisten, dass interne Daten vor externem Zugriff geschützt sind. Sie umfassen Maßnahmen, um Daten und Programme vor Verfälschung und Vernichtung, gegen Zerstörung durch Fehlfunktionen der Rechenanlage oder durch Fehlbedienung des Benutzers abzusichern. (BRACHT ET AL. 2018, S. 177 ff.)
Datenschutz	Schutz vor missbräuchlicher Verarbeitung von Nutzendaten (SCHUH ET AL. 2017, S. 22, HORNUNG & HOFMANN 2017, S. 205)	Im Rahmen des Datenschutzes werden Maßnahmen ergriffen, um sensible Informationen und Daten vor Cyberangriffen zu schützen. Dieser Schutz wird priorisiert, da mit dem sukzessiven Fortschritt der digitalen Plattformen umfassende Daten bereitgestellt werden. Mögliche betriebs- und volkswirtschaftliche Schäden gilt es zu verhindern. Zur Erhebung und Verwendung personenbezogener Daten ist gemäß datenschutzrechtlichem Verbotsprinzip (§ 4 Abs. 1 BDSG) eine Einwilligung oder eine gesetzliche Ermächtigung notwendig. (HORNUNG & HOFMANN 2017 S. 197, SCHUH ET AL. 2017, S. 22)

Technologie	Ziel	Kurzbeschreibung
Cloud-Nutzung	Flexible und bedarfsgesteuerte Bereitstellung von IT-Ressourcen über das Internet (HUBER 2016, S. 60)	Die Cloud-Nutzung umfasst Technologien zur Vernetzung von Computersystemen, mit denen IT-Ressourcen über das Internet und ohne lokale Installation bedarfsgerecht in Form von Dienstleistungen zur Verfügung gestellt werden. (HUBER 2016, S. 6, REINHART 2017, S. 89 ff., PISTORIUS 2020, S. 15 ff.)
Kabellose Netzwerke	Vermeidung aufwändiger Verkabelungen, wodurch eine räumlich flexiblere Anordnung der zu vernetzenden Endgeräte möglich wird (KRÜGER ET AL. 2017, S. 106)	Der Begriff ‚kabellose Netzwerke‘ beschreibt eine Vielzahl von zusammengeschalteten Knotenpunkten, die sich eigenständig zu einem wandelbaren Netzwerk konfigurieren und die Datenübermittlung von Sensordaten zulassen. (PISTORIUS 2020, S. 42)
Echtzeitdaten	Zeitverzugsminimierung bei Rückmeldungen und Beschleunigung von Abfragen (NIEHUES ET AL. 2017, S. 141)	Echtzeitdaten ermöglichen die permanente Generierung eines virtuellen Abbildes der Realität. Programme sind durchgehend betriebsbereit, anfallende Daten zu verarbeiten, um Ergebnisse innerhalb eines vorgegebenen Zeitraumes zur Verfügung zu stellen. Die Daten können weiterführend bei Entscheidungsfindungen innerhalb der Produktionssteuerung unterstützend genutzt werden. (BAUERNHANSL ET AL. 2014, S. 16)
Sensoren & Aktoren	Automatische Steuerung von Maschinen und Prozessen (HUBER 2016, S. 42)	Die Sensorik übernimmt die Generierung von verschiedenen Prozess-, Maschinen- und Umgebungsdaten, die hoch aufgelöst, räumlich und zeitlich erfasst werden können. Die Aktorik wirkt auf die Umgebung ein, indem sie bestimmte Signale in reale, physikalische Vorgänge umsetzt. (GORECKY ET AL. 2017, S. 557 ff., BUDAK ET AL. 2018, S. 253, PISTORIUS 2020, S. 10)
Auto-ID (RFID)	Eindeutige Identifizierung und Standortbestimmung von Objekten in Echtzeit (PISTORIUS 2020, S. 13)	Die Technologien zur automatischen Identifizierung (Auto-ID) sind in der Lage, Daten von Objekten über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg zu erheben und zu übertragen. Ein gängiges System ist die Radiofrequenzidentifikation (RFID), die eine kontaktlose Kommunikation auf Basis eines elektromagnetischen Feldes ermöglicht. Informationen werden dabei über das elektromagnetische Feld vom Sender an den Empfänger übermittelt. Weitere Systeme sind beispielsweise Barcodes oder 2D-Matrix-Codes. (GORECKY ET AL. 2017 S. 560, BUDAK ET AL. 2018, S. 253, PISTORIUS 2020, S. 13 ff.)
Intelligente Objekte	Dezentral steuerbare/autonome Produktionssysteme (NIEHUES ET AL. 2017, S. 143, REINHART ET AL. 2017b, S. 61)	Intelligente Objekte sind Bauteile, die mittels Mikro-Chips, Sensoren o. Ä. mit einer eigenen Intelligenz ausgestattet sind. Sie sind in der Lage, sich untereinander zu identifizieren, selbstständig mit ihrer Umgebung zu kommunizieren und steuerungsrelevante Entscheidungen zu treffen. (NIEHUES ET AL. 2017, S. 143, REINHART ET AL. 2017b, S.61)
Cyber-physische Systeme	Realisierung einer anpassungsfähigen Produktion (HUBER 2016, S. 38)	Cyber-physische Systeme können als eingebettete Systeme definiert werden, die durch die digitale Erweiterung von realen, physischen Systemen (z. B. Produktionsanlagen etc.) entstehen. Sie sind in der Lage, mit Sensoren physikalische Daten zu generieren und mit Aktoren reale Vorgänge zu beeinflussen. Digitale Netze erlauben die Verknüpfung und selbstständige Kommunikation untereinander sowie die ortsunabhängige Nutzung weltweit verfügbarer Daten und Dienste, unabhängig davon, ob diese lokal oder global sowie drahtlos oder drahtgebunden vorliegen. Die Kommunikation und Steuerung von cyber-physischen Systemen geschieht über multimodale Mensch-Maschine-Schnittstellen. (BAUERNHANSL ET AL. 2014, S. 239 ff., BRACHT ET AL. 2018, S. 419, HUBER 2016, S. 38, REINHART 2017, S. 281)
Predictive Analytics	Treffen von Vorhersagen anhand datenbasierter Analysen (HAAS 2018, S. 49)	Predictive Analytics bezeichnet die Ableitung von Vorhersagen über künftige Entwicklungen mithilfe historischer Daten und statistischer Auswertungen. Angewandte Techniken und Methoden sind etwa das Erkennen von Korrelationen, die Entwicklung von Modellen oder die Textanalyse. Predictive Maintenance ist ein Beispiel für diese Technologie, wodurch die Wartung nicht mehr zeit- oder ergebnisgesteuert, sondern bedarfs- und planorientiert erfolgt. (REINHART 2017, S. 10 ff., HUBER 2016, S. 57, BOGNER ET AL. 2017, S. 675)

Technologie	Ziel	Kurzbeschreibung
Data Analytics	Steigerung der Produkt- und Prozessqualität (NIEHUES ET AL. 2017, S. 157)	Als Folge der Anwendung von Sensoren und Kommunikations- und Vernetzungssystemen in Werkzeugmaschinen und Produktionsanlagen sowie der Verbreitung von IT-Systemen in Unternehmen steht ein großes Volumen an Daten zur Verfügung. Data Analytics bezeichnet die Untersuchung dieser Datenbestände unter Anwendung von beispielsweise neuronalen Netzen, um komplexe Muster, Korrelationen, Zusammenhänge oder Abweichungen zu finden, von denen Unternehmen profitieren. Es erlaubt den Anwendenden, das Geschehen zu erklären und anhand aktueller Daten vorherzusagen, was in Zukunft passieren wird. (NIEHUES ET AL. 2017, S. 157 f. PISTORIUS 2020, S. 27 ff.)
Big Data	Einsicht in bisher unbekannte Informationen und Erzeugung eines wirtschaftlichen Nutzens für Unternehmen (REINHART 2017, S. 10 ff., PISTORIUS 2020, S. 27 ff.)	Big Data bezeichnet große Datenmengen, die im Kontext von Industrie 4.0 (Internet der Dinge, cyber-physische Systeme etc.) mit einer hohen Geschwindigkeit erzeugt werden und eine große Vielfalt an Informationen beinhalten. Kennzeichnend sind die vier Dimensionen: Menge an Daten (Volume), Vielfalt der Daten (Variety), Geschwindigkeit der Datenerzeugung und -verarbeitung (Velocity) sowie Glaubwürdigkeit der Daten (Veracity). (BRACHT ET AL. 2018, S. 417, PISTORIUS 2020, S. 27 ff. KRÜGER ET AL. 2017, S. 97 ff.)

5.1.3 Morphologischer Kasten zur Spezifizierung der Elemente

Das Ziel dieses Abschnitts besteht in der Entwicklung eines morphologischen Kastens zur Spezifizierung der ausgewählten Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien. Der Einsatz dieser zweidimensionalen Matrix eignet sich, um Probleme systematisch zu analysieren sowie Methoden oder Technologien in ihre Bestandteile und Ausprägungen aufzuschlüsseln (SCHAWEL & BILLING 2018, S. 219 ff., LIEBRECHT 2020, S. 11). Die Typisierung soll Unternehmen dazu befähigen, zielgerichtet und strukturiert adäquate Lean-Methoden oder Industrie-4.0-Technologien auszuwählen (siehe Abschnitt 5.3.4). Die nachfolgende Entwicklung des morphologischen Kastens basierte auf einer Literaturanalyse sowie der Befragung von Fachleuten, um kontextrelevante Merkmale zu identifizieren.

Zunächst wurde unter Anwendung der Literaturdatenbank Scopus eine Recherche zu bestehenden strukturgebenden Analyseverfahren für die Typisierung von Produktionsbereichen durchgeführt (MARTL 2021, S. 23 ff.). Die identifizierten und für relevant erachteten Arbeiten werden nachfolgend vorgestellt. WIRTH ET AL. (2011) erarbeiteten einen morphologischen Kasten, um Fabriken nach Art und Typ zu klassifizieren. Dem morphologischen Kasten liegen diverse Kriterien zugrunde, die durch 18 Merkmale charakterisiert sind. Die möglichen Kombinationen führen zu einer Vielzahl unterschiedlicher Fabrikarten, die sich in ihre Funktion, Dimension, Struktur, Gestaltung oder Wirtschaftlichkeit unterscheiden und entsprechend den Merkmalsausprägungen geclustert werden können. Einen weiteren Ansatz liefern BEINKE UND BEINKER (2012). Die Autoren zeigen mithilfe einer Typisierungsmatrix, dass Lean-Ansätze auf Produktionskonzepte wie die Kleinserienfertigung von Windkraftanlagen übertragbar sind. Hierzu nutzen sie zehn strukturgebende Merkmale,

etwa die Anzahl der gefertigten Produkte pro Jahr, das Produktionskonzept oder die Beschaffungsart. Neben BEINKE UND BEINKER (2012) verwenden auch PETER (2009) sowie SCHUH UND STICH (2012) zweidimensionale Typisierungsmatrizen, um verschiedene Produktionsausprägungen im Bereich von Lean Production darzustellen. Ebenso entwickelte LIEBRECHT (2020, S. 69) einen morphologischen Kasten für Produktionstypologien, um relevante Industrie-4.0-Attribute zu identifizieren. Die beiden Merkmale fokussieren sich dabei auf den ‚Anteil manueller Arbeitsschritte‘ sowie die ‚Fertigungsart‘.

Die vorgestellten Publikationen bildeten die Grundlage für die Ableitung eines morphologischen Kastens zur Spezifizierung der Methoden und Technologien. Die im Zuge der Recherche vorselektierten Merkmale wurden durch einen halbtägigen Workshop mit Fachleuten aus Industrie und Forschung modifiziert. Insgesamt besteht der entwickelte morphologische Kasten aus zwei übergeordneten Dimensionen, elf Merkmalen sowie 62 Merkmalsausprägungen und ist nachstehend in Abbildung 5-4 dargestellt.



 Dimension 1: Typisierung der Lean- und Industrie-4.0-Elemente								
1.1	Anwendungsbereich	Produktion		Logistik		Instandhaltung		
1.2	Anwendungsebene	Arbeitsplatz-ebene	Zell-ebene	Segment-ebene	Fabrik-ebene	Netzwerk-ebene		
1.3	Relevanz für die Wettbewerbsfähigkeit	Sehr niedrig	Eher niedrig	Eher hoch	Sehr hoch			
1.4	Implementierungsdauer	1 ≤ t ≤ 3 Quartale	3 < t ≤ 6 Quartale	6 < t ≤ 12 Quartale	12 < t ≤ 20 Quartale			
1.5	Entwicklungsstufen	Forschung und Entwicklung	Demonstrator	Markteinführung/Pilot		Marktreife		
 Dimension 2: Einfluss auf produktionsrelevante Zielgrößen								
2.1	Zeit	-3 sehr negativ	-2 negativ	-1 eher negativ	0 neutral	+1 eher positiv	+2 positiv	+3 sehr positiv
2.2	Kosten	-3 sehr negativ	-2 negativ	-1 eher negativ	0 neutral	+1 eher positiv	+2 positiv	+3 sehr positiv
2.3	Qualität	-3 sehr negativ	-2 negativ	-1 eher negativ	0 neutral	+1 eher positiv	+2 positiv	+3 sehr positiv
2.4	Flexibilität	-3 sehr negativ	-2 negativ	-1 eher negativ	0 neutral	+1 eher positiv	+2 positiv	+3 sehr positiv
2.5	Ökologische Nachhaltigkeit	-3 sehr negativ	-2 negativ	-1 eher negativ	0 neutral	+1 eher positiv	+2 positiv	+3 sehr positiv
2.6	Soziale Nachhaltigkeit	-3 sehr negativ	-2 negativ	-1 eher negativ	0 neutral	+1 eher positiv	+2 positiv	+3 sehr positiv

Abbildung 5-4: Morphologischer Kasten zur Spezifizierung der Lean- und Industrie-4.0-Elemente

Die erste Dimension umfasst die Merkmale des Anwendungsbereichs und der -ebene sowie die Relevanz für die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen, die Implementierungsdauer und die Entwicklungsstufe. Der Anwendungsbereich der Lean- und Industrie-4.0-Elemente untergliedert sich in die Produktion sowie die produktionsnahen Bereiche der Logistik und Instandhaltung. Die Merkmalsausprägungen der Anwendungsebene sind angelehnt an WIENDAHL ET AL. (2007) und beinhalten die Arbeitsplatz-, Zell-, Segment-, Fabrik- und Netzwerkebene. WIENDAHL ET AL. (2007) folgend wird die unterste Ebene durch die Arbeitsplätze repräsentiert, in denen Tätigkeiten durch Mitarbeitende oder Maschinen ausgeführt werden. Diese sind oftmals entsprechend dem Materialfluss angeordnet und in Produktionszellen zusammengefasst. Die darauf aufbauende Segmentebene enthält Bereiche wie die Fertigung, Montage, Logistik oder Instandhaltung und befindet sich in einer Produktionseinheit an einem Fabrikstandort, der als Knotenpunkt eines Produktionsnetzes oder einer Lieferkette dienen kann. Die Netzwerkebene bildet die oberste Ebene, in der geografisch getrennte Standorte durch Material- und Informationsflüsse entlang der Wertschöpfungskette verbunden sind (WIENDAHL ET AL. 2007, S. 785 f.).

Neben dem Anwendungsbereich und der -ebene werden die Elemente hinsichtlich ihrer Relevanz für die Unternehmen, der Implementierungsdauer sowie der Entwicklungsstufen eingeordnet. Die Merkmalsausprägungen unterteilen sich dabei in eine sehr niedrige, eher niedrige, eher hohe bis hohe Relevanz. Es wurde eine gerade Anzahl an Skalenpunkten gewählt, um die Tendenz zur Mitte auszuschließen, womit in der empirischen Sozialforschung die Neigung von Studienteilnehmenden beschrieben wird, bevorzugt die mittig platzierten Skalenpunkte auszuwählen (BAUR & BLASIUS 2014, S. 432 f.). Zur Bewertung des Aufwands wird die Dauer für die Implementierung einer Lean-Methode oder Industrie-4.0-Technologie betrachtet. Die vierstufige Bewertungsskala orientiert sich an den Forschungsarbeiten von MERL (2016) und LIEBRECHT (2020). Diese untergliedern den zeitlichen Aufwand in vier Wertebereiche, die jeweils durch Minimal- und Maximalwerte definiert sind. Dabei entsprechen ein bis drei Quartale einem niedrigen zeitlichen Implementierungsaufwand und zwölf bis 20 Quartale einem hohen Aufwand.

Als letztes Merkmal in dieser Dimension sind die Entwicklungsstufen der Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien aufgeführt. Diese orientieren sich an der Bewertungsskala der Plattform Industrie 4.0 des BMBF und BMWK (BMWK & BMBF 2022). Hierbei werden die Elemente entsprechend ihrem Technologiereifegrad in die vier Phasen (1) Forschungs- und Entwicklungs-, (2) Demonstrator-, (3) Markteinführungs- und Pilot- sowie (4) Marktreifephase eingeordnet. Die gewählten Reifegradphasen lassen sich, wie in Abbildung 5-5 aufgeführt, dem in Industrie und Forschung anerkannten und verbreiteten Technology-Readiness-Level-Modell (TRL) nach MANKINS (2009, S. 1219) zuordnen.

Technology Readiness Levels (TRL)		Entwicklungsstufen der Plattform Industrie 4.0	
Stufe	Beschreibung	Stufe	Beschreibung
1	Die Grundprinzipien der Technologie sind bekannt und untersucht.	1	Forschungs- und Entwicklungsphase
2	Das Technologiekonzept und/oder die Anwendung ist/sind formuliert.		
3	Es liegt ein experimenteller Konzeptnachweis in einer Laborumgebung vor.		
4	Die Technologie und relevante Bauteile sind identifiziert und Demonstrationsprojekte werden in einer Laborumgebung validiert.	2	Demonstratorphase
5	Die Technologie wurde in der realen Umgebung validiert.		
6	Das System-/Teilsystemmodell oder der Prototyp ist in einer realen Umgebung validiert und hat das industrielle Nutzenpotenzial nachgewiesen.	3	Markteinführungs- und Pilotphase
7	Der Systemprototyp ist in einer erwartbaren Einsatzumgebung validiert und hat bewiesen, dass er in einer vorkommerziellen Stufe einsatzfähig ist.		
8	Das System ist finalisiert und durch Tests und Demonstrationen erprobt.		
9	Das aktuelle System ist einsatzfähig und hat sich in der entsprechenden Umgebung bewiesen.	4	Marktreifephase

Abbildung 5-5: Entwicklungsstufen in Anlehnung an MANKINS (2009, S. 1219) sowie BMWK UND BMBF (2022)

Die zweite Dimension untersucht den Einfluss der Lean- und Industrie-4.0-Elemente auf die produktionsrelevanten Zielgrößen Zeit, Kosten, Qualität, Flexibilität sowie ökologische und soziale Nachhaltigkeit. In diesem Zusammenhang sei auf Unterkapitel 2.4 verwiesen, das den wissenschaftstheoretischen Rahmen für die Zielgrößen bildet. Die Bewertung des Einflusses erfolgt durch eine siebenstufige Likert-Skala, die von einem sehr negativen Einfluss (-3) bis hin zu einem sehr positiven Einfluss (+3) der Lean- und Industrie-4.0-Elemente auf die Zielgrößen reicht. Die Skala zur Analyse des Einflusses auf die Zielgrößen ist angelehnt an LIEBRECHT (2020, S. 99) und in Abbildung 5-6 dargestellt.

Einfluss	Wert	Beschreibung
Sehr negativ	-3	Durch die Einführung der Technologie/Methode verschlechtert sich der Ausgangswert der Zielgröße sehr stark im Vergleich zu anderen Methoden/Technologien.
Negativ	-2	Durch die Einführung der Technologie/Methode verschlechtert sich der Ausgangswert der Zielgröße stark im Vergleich zu anderen Methoden/Technologien.
Eher negativ	-1	Durch die Einführung der Technologie/Methode verschlechtert sich der Ausgangswert der Zielgröße leicht im Vergleich zu anderen Methoden/Technologien.
Neutral	0	Die Einführung der Technologie/Methode nimmt keinen Einfluss auf die Zielgröße.
Eher positiv	+1	Durch die Einführung der Technologie/Methode verbessert sich der Ausgangswert der Zielgröße leicht im Vergleich zu anderen Methoden/Technologien.
Positiv	+2	Durch die Einführung der Technologie/Methode verbessert sich der Ausgangswert der Zielgröße stark im Vergleich zu anderen Methoden/Technologien.
Sehr positiv	+3	Durch die Einführung der Technologie/Methode verbessert sich der Ausgangswert der Zielgröße sehr stark im Vergleich zu anderen Methoden/Technologien.

Abbildung 5-6: Bewertungsskala der Zielgrößen in Anlehnung an LIEBRECHT (2020, S. 99)

5.1.4 Spezifizierung der Lean- und Industrie-4.0-Elemente

Dieser Abschnitt widmet sich der Spezifizierung der in den Abschnitten 5.1.1 und 5.1.2 identifizierten Lean- und Industrie-4.0-Elementen unter Anwendung der Merkmale des morphologischen Kastens (siehe Abbildung 5-4) und dient folglich der Beantwortung von Forschungsfrage 1 (siehe Abschnitt 1.2). Hierfür wurden Online-Umfragen, eine Analyse von Industrie-4.0-Anwendungsfällen sowie Workshops mit Fachleuten aus den Bereichen Lean Production und Industrie 4.0 durchgeführt. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden abschließend in Steckbriefen für die Lean- und Industrie-4.0-Elemente festgehalten.

Dimension 1 – Typisierung der Lean- und Industrie-4.0-Elemente: Die erste Dimension des morphologischen Kastens (siehe Abbildung 5-4) beinhaltet mitunter die Einordnung des Anwendungsbereichs und der Anwendungsebene. Die Einteilung der Industrie-4.0- und Lean-Elemente erfolgte im Rahmen eines Workshops, an dem sechs Fachleute aus Industrie und Forschung partizipierten. Die teilnehmenden Personen einte ihre umfassende Erfahrung in den Bereichen Lean Production und Industrie 4.0. Im Zuge der Einordnung durch die Expert*innen konnten einer Lean-Methode oder einer Industrie-4.0-Technologie mehrere Anwendungsbereiche oder -ebenen zugeordnet werden. Hierbei kann beispielsweise der Einzelstückfluss Auswirkungen auf die Produktion und zugleich auf die Logistik haben. Die Workshop-Ergebnisse für die Einteilung der 20 Methoden und 26 Technologien sind in einer Spezifizierungsmatrix in den Tabelle 0-6 und Tabelle 0-7 im Anhang H dargestellt.

Als weitere Attribute sind in der ersten Dimension des morphologischen Kastens die Relevanz für produzierende Unternehmen sowie die geschätzte Implementierungsdauer einer Methode oder Technologie verortet. Diese beiden Merkmale wurden im Rahmen der in Abschnitt 5.1.1 vorgestellten Online-Umfrage analysiert (DILLINGER ET AL. 2021c). An der Studie partizipierten 32 Expertinnen und Experten mit mehrjähriger praktischer Berufserfahrung in den Bereichen Lean Production und Industrie 4.0. Dabei wurde die Studie nach den vorherrschenden Richtlinien und Methoden der empirischen Sozialforschung nach PORST (2014) konzipiert und als Online-Umfrage mit ‚Google Formulare‘ durchgeführt. Zur Feststellung der Relevanz der Lean- und Industrie-4.0-Elemente für produzierende Unternehmen wurde eine vierstufige Likert-Skala verwendet. Die Skala war entsprechend dem morphologischen Kasten in sehr niedrig bis sehr hoch aufgeschlüsselt (siehe Abbildung 5-4). Zudem wurde basierend auf der Bewertungsskala entsprechend dem morphologischen Kasten die Implementierungsdauer mit Zeitbausteinen auf Quartalsebene spezifiziert. Die an der Umfrage teilnehmenden Personen konnten das Feld ‚keine Angabe‘ auswählen, sollte es ihnen bei vereinzelt Elementen nicht möglich sein, den zeitlichen Implementierungsaufwand oder die Relevanz zu beurteilen (DILLINGER ET AL. 2021c). Die finale Einteilung der Methoden und Technologien erfolgte durch die Berechnung des arithmetischen

Mittels für die Relevanz und Implementierungsdauer je Methode bzw. Technologie, welche sich aus den Antworten der befragten Fachleute errechnet. Die in Anhang I dargestellte Tabelle 0-8 nach DILLINGER ET AL. (2021c) fasst die Ergebnisse der Umfrage zusammen. Dabei wurde die Relevanz für produzierende Unternehmen bei allen 20 Lean-Methoden als eher hoch (55 %) oder hoch (45 %) eingestuft. Eine analoge Einschätzung der Fachleute zeigte sich bei den Technologien, denen mehrheitlich eine eher hohe oder hohe Relevanz zugewiesen wurde. Die Implementierungsdauer der Lean- und Industrie-4.0-Elemente wurde zu etwa zwei Drittel (69 %) als eher hoch oder hoch eingestuft (siehe Anhang I).

Der Technologiereifegrad für die Industrie-4.0-Technologien wurde mithilfe der Anwendungsfälle der Plattform Industrie 4.0 bestimmt (BMWK & BMBF 2022). Die darin geführten Anwendungsbeispiele wurden analog zur Einteilung des morphologischen Kastens (siehe Abbildung 5-4) in die vier Phasen Forschungs- und Entwicklungs- (1), Demonstrator- (2), Markteinführungs- und Pilot- (3) sowie Marktreifephase (4) segmentiert. Im Rahmen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Analyse nach KREUZER (2021) wurden 308 Anwendungsbeispiele aus dem Wertschöpfungsbereich Produktion und Lieferkette untersucht. Die darin aufgeführten Technologien wurden anschließend entsprechend der angegebenen Entwicklungsstufe eingeordnet. Hierbei waren die im zeitlichen Verlauf zuletzt genannten Anwendungsfälle entscheidend. Befand sich eine Technologie im Jahr 2016 beispielsweise in der Demonstratorphase und wurde in einem weiteren Anwendungsbeispiel im Jahr 2020 der Markteinführungsphase zugeteilt, so war die letztgenannte Entwicklungsstufe maßgebend. Zudem wurden die einzelnen Anwendungsfälle tiefergehend analysiert, um potenzielle Abweichungen in der Entwicklung der Technologiereifegrade zu detektieren. Die Einteilung der Industrie-4.0-Technologien entsprechend ihren Entwicklungsstufen ist in Anhang H in Tabelle 0-7 aufgeführt. Die Analyse der Anwendungsfälle der Plattform Industrie 4.0 ergab, dass sich zum Zeitpunkt der Untersuchung (Stand 01.09.2021) die Mehrzahl der ausgewählten Industrie-4.0-Technologien in der Marktreifephase befinden. Lediglich die Technologien Virtual Reality, Autonome Roboter und Predictive Analytics sind in der Markteinführungsphase anzusiedeln (KREUZER 2021). Zudem wurde eine Reifegradeinordnung für die 20 Lean-Methoden in Tabelle 0-6 (siehe Anhang H) durchgeführt. Diese befinden sich alle in der höchsten Reifegradstufe, da die Methoden bereits erfolgreich in einer Vielzahl von unterschiedlichen Unternehmen eingesetzt werden.

Dimension 2 – Einfluss auf produktionsrelevante Zielgrößen: Die zweite Dimension des morphologischen Kastens widmet sich den Einflüssen der Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien auf die Zielgrößen Zeit, Kosten, Qualität, Flexibilität sowie soziale und ökologische Nachhaltigkeit. Die Bewertung erfolgt auf der Basis einer siebenstufigen Bewertungsskala, wie sie in Abbildung 5-4 dargestellt ist. Die Zielgrößen Zeit, Kosten und

Qualität für 18 Lean-Production-Methoden wurden bereits von AULL (2012, S. 156) im Rahmen einer Delphi-Befragung untersucht und sind unverändert in diese Arbeit eingeflossen. Die noch fehlenden Lean-Production-Methoden Shopfloor-Management und Wertstrommanagement wurden in Anlehnung an die Bewertungsergebnisse der VDI 2870-2 ebenfalls von Expertinnen und Experten bewertet.

Die Bewertung der verbliebenen Zielgrößen erfolgte durch eine Online-Umfrage, deren Ergebnisse in der Publikation von DILLINGER ET AL. (2022a) veröffentlicht sind. Die 32 teilnehmenden Fachleute besaßen umfassendes produktionstechnisches Fachwissen und stammten aus verschiedenen Industriesegmente. Dazu zählen die Automobilindustrie (28 %), die Beratung (25 %), der Maschinen- und Anlagenbau (16 %) sowie Bildungseinrichtungen (16 %). Weitere Probanden kamen aus dem Bauwesen (6 %), von Prüforganisationen (3 %), aus der Lebensmittelproduktion (3 %) sowie der angewandten Forschung (3 %) (DILLINGER ET AL. 2022a). Die Umfrage wurde über einen Zeitraum von drei Monaten, beginnend im Juli 2021, durchgeführt. Die Fragen der Studie wurden anhand der im morphologischen Kasten vorgestellten (siehe Abbildung 5-4) siebenstufigen Likert-Skala beantwortet und die Ergebnisse sind in Tabelle 0-6 sowie Tabelle 0-7 in Anhang H veranschaulicht.

Nachfolgend wurden, basierend auf den Erkenntnissen der Analysen der 20 Lean- und 26 Industrie-4.0-Elemente, Steckbriefe erarbeitet. Diese dienten als Grundlage für eine unternehmensindividuelle Auswahl von Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien. Die Steckbriefe enthalten in der Kopfzeile den Titel des Elements. Zudem werden bei den Industrie-4.0-Technologien das strukturgebende Haupttechnologiefeld (siehe Abbildung 5-3) sowie bei den Lean-Production-Methoden die Orientierungskategorie nach AULL (2012) angegeben (siehe Abbildung 5-2). Darüber hinaus beinhalten die Steckbriefe eine Kurzbeschreibung sowie die Zielstellung. Diese sind Tabelle 5-1 für die Lean-Production-Methoden sowie Tabelle 5-2 für die Industrie-4.0-Technologien entnommen. Der Anwendungsbereich und die Anwendungsebene sind entsprechend den Ergebnissen aus Anhang H (siehe Tabelle 0-6 und Tabelle 0-7) hinterlegt. Zudem werden die Auswirkungen auf die Zielgrößen, die Relevanz der Elemente, die Implementierungsdauer und das Entwicklungsstadium aufgeführt.

In Abbildung 5-7 wird exemplarisch der Steckbrief für den Einzelstückfluss abgebildet. Es sei angemerkt, dass der Einzelstückfluss-Steckbrief bereits die wesentlichen vorauszusetzenden Interdependenzen zu anderen Elementen enthält, um alle relevanten Informationen zu vereinen. Die Interdependenzen werden in nachfolgendem Lösungsbaustein 2 umfassend analysiert.

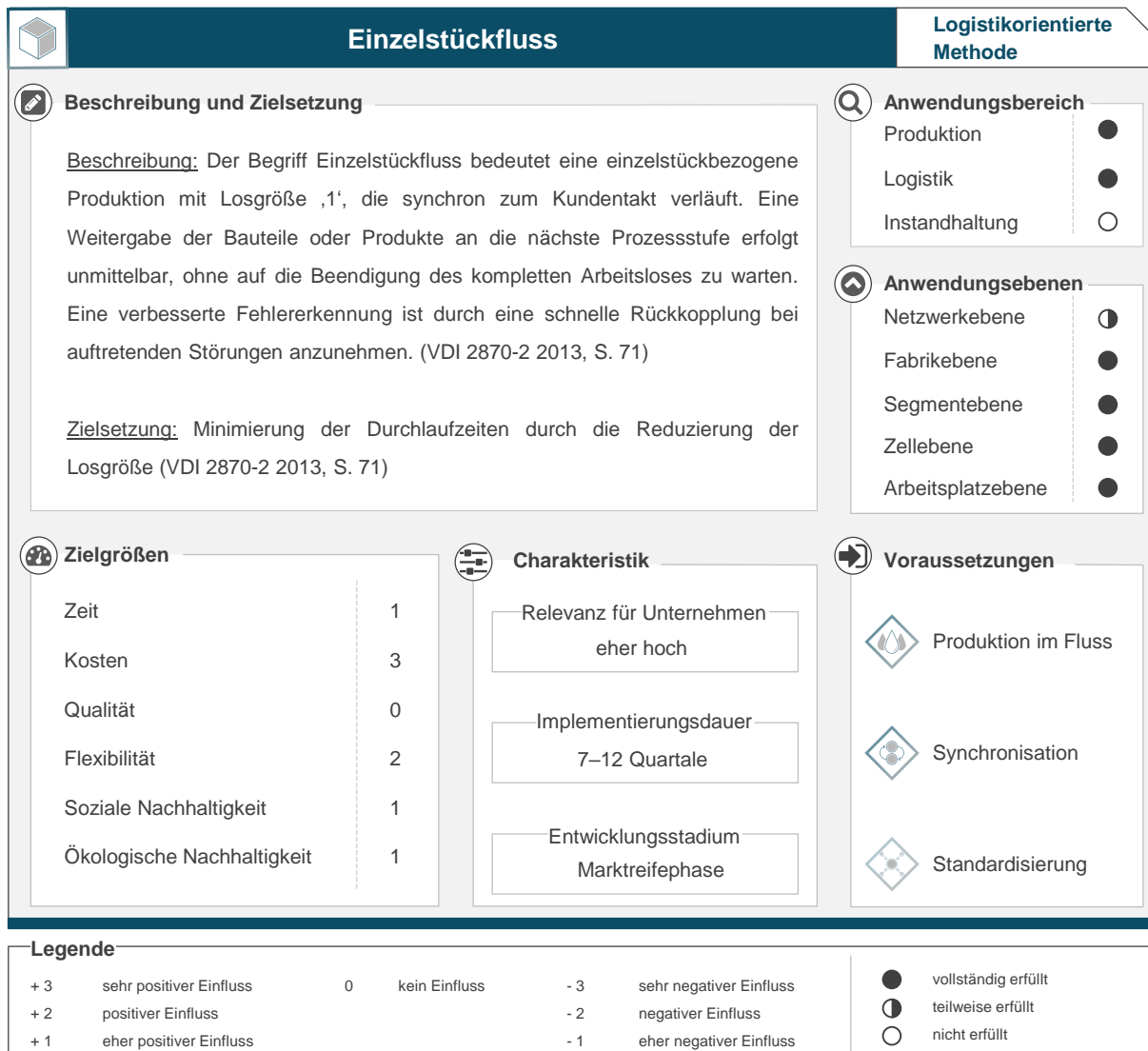


Abbildung 5-7: Steckbrief am Beispiel der Lean-Production-Methode Einzelstückfluss

5.2 Lösungsbaustein 2 | Interdependenzanalysen

Der zweite Lösungsbaustein widmet sich der Analyse der Interdependenzen in den Untersuchungsbereichen Lean Production und Industrie 4.0 sowie zwischen den Lean-Production-Methoden und den Industrie-4.0-Technologien. Somit zielt dieses Unterkapitel auf die Beantwortung von Forschungsfrage 2 (siehe Abschnitt 1.2) ab. Die Interdependenzanalysen in den Untersuchungsbereichen schaffen die Datengrundlage, um darauf aufbauend eine Implementierungsstrategie für Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien zu entwickeln (siehe Lösungsbaustein 3).

Die Analyse der Wirkbeziehungen erfordert ein mehrstufiges Vorgehen, das in Anlehnung an die Autoren AULL (2012, S. 155), LIEBRECHT (2020, S. 64) und DILLINGER ET AL. (2021a) entwickelt wurde. Das Vorgehen subsumierte sich, wie in Abbildung 5-8 aufgeführt, in zwei Hauptphasen und wird nachstehend erläutert.

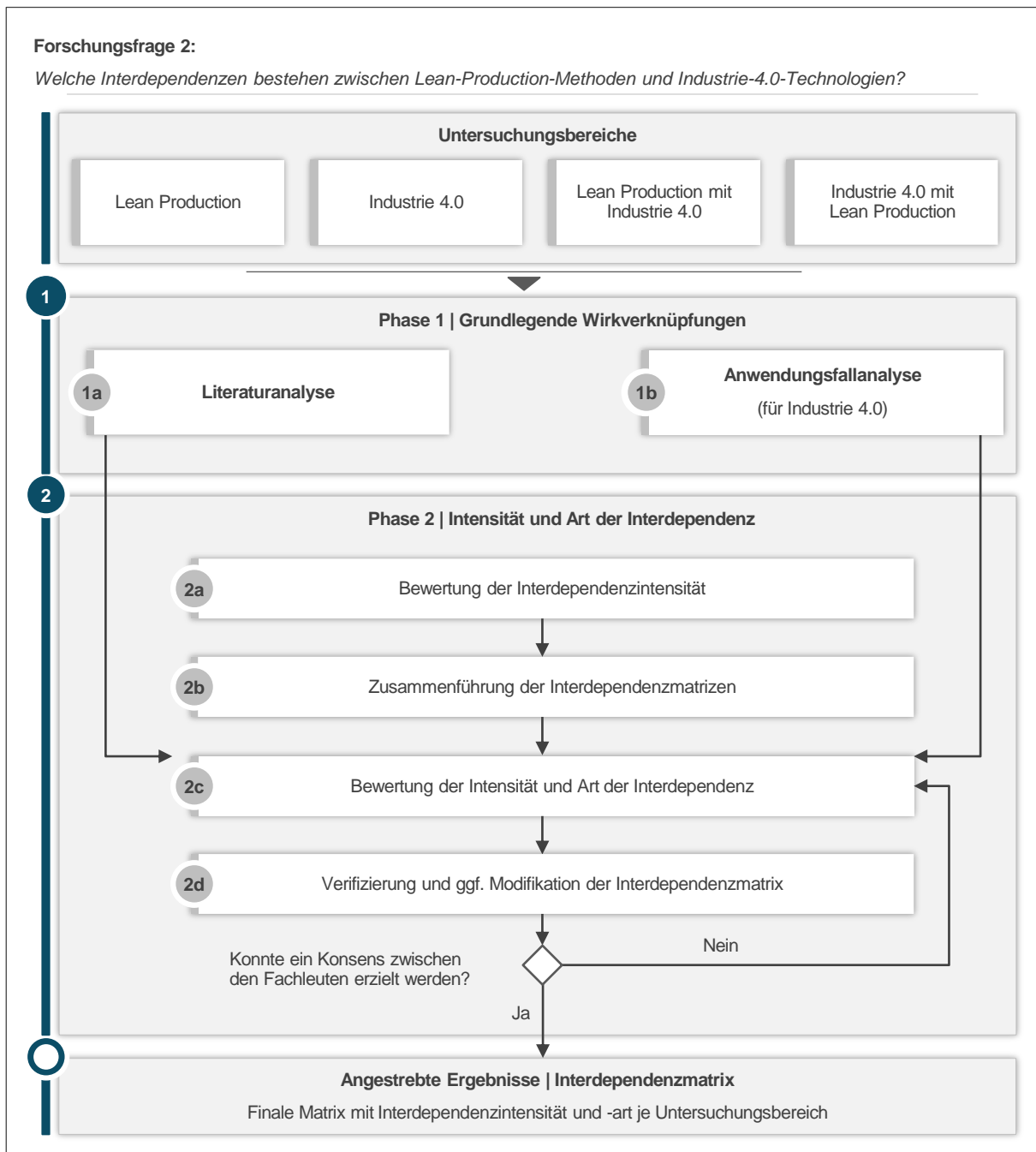


Abbildung 5-8: Vorgehen zur Erarbeitung der Datengrundlage

In der ersten Phase wurde für jeden Untersuchungsbereich eine Literaturanalyse mit Fokus auf die Wechselwirkungen der in den Abschnitten 5.1.1 und 5.1.2 vorgestellten 20 Lean-Production-Methoden und 26 Industrie-4.0-Technologien durchgeführt. Ergänzend erfolgte für das Themenfeld Industrie 4.0 eine Untersuchung bestehender Anwendungsfälle aus der Praxis, basierend auf der Plattform Industrie 4.0 (BMWK & BMBF 2022). Das Ergebnis aus Phase 1 ist eine Interdependenzmatrix je Untersuchungsbereich, die die Erkenntnisse aus der Literaturanalyse sowie ggf. der Industrie-4.0-Anwendungsfallanalyse bündelt.

Die zweite Phase bestand aus der Durchführung einer Delphi-Studie, um mithilfe von Fachleuten die Interdependenzart und -intensität zu spezifizieren. Die Delphi-Methode ist eine mehrstufige, strukturierte Befragungstechnik von Expert*innen mit dem Ziel, eine fundierte Einschätzung eines komplexen Sachverhalts oder einer Problemstellung zu generieren (LINSTONE & TUROFF 1975, S. 3). Dabei ist gemäß den Autor*innen GRIME UND WRIGHT (2014) bei der Konzeptionierung einer Delphi-Studie auf ein heterogenes Teilnehmendenfeld zu achten, das 5 bis 20 Fachleute umfassen soll. Zudem erfolgte die Befragung der Expertinnen und Experten unter Wahrung ihrer Anonymität in schriftlicher Form, um eine gegenseitige Beeinflussung und Voreingenommenheit zu vermeiden (DALKEY & HELMER 1963, GRIME & WRIGHT 2014).

In der vorliegenden Arbeit wurden die anonymen Feedbackrunden der Delphi-Studie iterativ in schriftlicher Form durchlaufen, bis ein Konsens zwischen den Fachleuten hinsichtlich der Interdependenzen vorherrschte. In der ersten Delphi-Befragungsrunde erhielten die Expertinnen und Experten entsprechend dem Untersuchungsbereich eine Kurzbeschreibung der Lean-Production-Methoden (siehe Tabelle 5-1) und der Industrie-4.0-Technologien (siehe Tabelle 5-2) sowie eine Erläuterung des weiteren Vorgehens. Die Aufgabe der Fachleute war es, in einer leeren Interdependenzmatrix ihre Einschätzung zur Intensität der Wirkbeziehungen abzugeben. Die Intensität sollte den Grad des Einflusses wiedergeben und wurde unter Anwendung einer mehrstufigen Likert-Skala (siehe Tabelle 5-3) erhoben. Die Ergebnisse aus der ersten Delphi-Runde wurden mit den Erkenntnissen aus der vorhergehenden Literatur- und Anwendungsfallanalyse verglichen und in einer Interdependenzmatrix zusammengefasst. In der zweiten Runde erhielten die Expertinnen und Experten die gewonnenen Erkenntnisse in Form einer zusammengefassten Interdependenzmatrix, verbunden mit der Aufgabe, die Intensität zu verifizieren und die Art der Wirkbeziehung zu bewerten. Die Interdependenzart kann gemäß AULL (2012, S. 152) in eine voraussetzende und eine unterstützende Interdependenz unterteilt werden. Eine voraussetzende Wirkbeziehung liegt vor, wenn die Implementierung eines Lean-Production- oder Industrie-4.0-Elements stark oder gänzlich von der Einführung eines anderen Elements abhängt. Hingegen ist für die Wirksamkeit eines Elements die vorherige Einführung des als unterstützend definierten Elements nicht notwendig. Allerdings ermöglicht ein bereits eingeführtes unterstützendes Element eine effektivere und effizientere Implementierung (AULL 2012, S. 152). Vor Beginn der folgenden dritten Runde wurden die einzelnen Interdependenzmatrizen der Fachleute erneut zusammengeführt und an die Gruppe unter Wahrung der Anonymität verteilt. Die Expertinnen und Experten konnten nun die Ergebnisse verifizieren und gegebenenfalls modifizieren. Das Vorgehen der dritten Runde wurde so lange wiederholt, bis eine finale Interdependenzmatrix je Untersuchungsbereich vorlag, die der Einschätzung der Fachleute entsprach. Die generierten finalen

Interdependenzmatrizen dienten als Datengrundlage für das in Lösungsbaustein 3 erarbeitete Simulationsmodell zur Entwicklung der Lean-4.0-Implementierungsstrategien.

In den folgenden Abschnitten werden die Interdependenzanalysen für die Untersuchungsbereiche beschrieben. Es sei darauf verwiesen, dass die durch den Autor angeleiteten wissenschaftlichen Studienarbeiten von AMORTH (2020), DERVIS (2020), FU (2021), FORMANN (2022), KAGERER (2021), KREUZER (2021), KOPHAL (2021), RONGE (2021) und TAACK-TRAKRANEN (2021) maßgebend zur Erstellung der Interdependenzanalysen beigetragen haben.

5.2.1 Interdependenzanalyse von Lean-Production-Methoden

Der vorliegende Abschnitt zielt auf die Analyse der Interdependenzen zwischen den in Abschnitt 5.1.1 identifizierten Lean-Production-Methoden ab. Basierend auf den Erkenntnissen einer umfassenden Literaturrecherche mit Fokus auf das bestehende Lean-Production-Implementierungsvorgehen (siehe Abschnitt 3.3.1) wurde die Forschungsarbeit von AULL (2012, S. 152 ff.) als Grundlage für die Lean-Production-Interdependenzmatrix verwendet.

AULL (2012, S. 152 ff.) identifizierte für die 18 von ihm ausgewählten Lean-Production-Methoden eine Vielzahl an Wirkverknüpfungen, die er entsprechend ihrer Art und Intensität in einer Matrixstruktur klassifizierte. Hierzu wählte er ein zweistufiges Vorgehen, das zunächst eine strukturierte Literaturanalyse sowie darauf aufbauend eine leitfadengestützte Befragung von Expertinnen und Experten aus der Industrie und der angewandten Forschung vorsah. Das Ziel der Befragung war es, die in der Literatur identifizierten Wirkzusammenhänge zu evaluieren und gegebenenfalls zu komplettieren. Durch die Differenzierung zwischen der Interdependenzart und -intensität sowie durch das gewählte Vorgehen diente die Lean-Production-Interdependenzmatrix von AULL (2012, S. 152 ff.) als Basis für die vorliegende Forschungsarbeit (siehe Anhang B, Tabelle 0-2) und wurde um die Lean-Production-Methoden Shopfloor-Management und Wertstrommanagement erweitert.

Für die Integration der beiden Lean-Production-Methoden in die Interdependenzmatrix nach AULL (2012, S. 152 ff.) wurde zunächst eine strukturierte Literaturanalyse durchgeführt. So listet die VDI-Richtlinie 2870-2 für Shopfloor-Management beispielsweise die ergänzenden Methoden Prozessstandardisierung und visuelles Management sowie für das Wertstrommanagement die Methoden Kanban und Einzelstückfluss auf. Gemäß der in Abbildung 5-8 vorgestellten zweiten Phase wurden von ausgewählten Fachleuten die Interdependenzen von Shopfloor-Management und Wertstrommanagement zu den 18 weiteren Methoden bewertet und diese Bewertung wurde in einer Interdependenzmatrix erfasst. Die Gruppe an Probanden mit fundierten Lean-Production-Kenntnissen wurde heterogen zusammengestellt und beinhaltete vier Expertinnen und Experten aus der angewandten

Forschung sowie fünf weitere Fachleute aus unterschiedlichen Industriebranchen. In der folgenden Runde wurden die Ergebnisse der Teilnehmenden sowie der Literaturanalyse in eine gebündelte Interdependenzmatrix überführt und den Fachleuten vorgelegt. Die Aufgabe bestand darin, die Intensität der Interdependenzen sowie die Art der Wirkbeziehung zu hinterlegen und dabei jeweils die Erkenntnisse aus den vorherigen Runden zu evaluieren. Die Intensitätsstufen konnten durch eine siebenstufige Likert-Skala bewertet werden, die in der nachfolgenden Tabelle 5-3 abgebildet ist. Zudem bestand die Möglichkeit, keine Einschätzung abzugeben und dies mit ‚k. A.‘ für ‚keine Angabe‘ kenntlich zu machen. Die Art der Interdependenz wurde in eine unterstützende und eine voraussetzende Wirkbeziehung unterschieden, die entsprechend mit ‚U‘ für ‚unterstützend‘ und ‚V‘ für ‚voraussetzend‘ gekennzeichnet werden sollte.

Tabelle 5-3: Likert-Skala zur Bewertung der Intensität der Interdependenzen

Intensität der Interdependenzen								
Gewichtung	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	k. A.
Beschreibung	sehr negativ	negativ	eher negativ	neutral	eher positiv	positiv	sehr positiv	keine Angabe

Das Ergebnis dieser iterativen Befragung der Fachleute ist eine Interdependenzmatrix, die die Art und Intensität der Wirkbeziehungen enthält. Die Gesamtübersicht der Wirkverknüpfungen zwischen den 20 Lean-Production-Methoden sind in Tabelle 5-4 festgehalten. Die Leserichtung der nachfolgenden Matrix orientiert sich von Zeile nach Spalte. Bei der Einführung einer Methode in einer Spalte herrscht eine voraussetzende (‚V‘) oder unterstützende (‚U‘) Wirkbeziehung zur Methode in der Zeile. Beispielhaft besitzt die Methode Einzelstückfluss (Zeile) eine eher positive unterstützende Wirkung auf die Methode Produktion im Fluss (Spalte).

Tabelle 5-4: Interdependenzmatrix für Lean-Production-Methoden als Datengrundlage des Simulationsmodells in Anlehnung an AULL (2012, S. 156)

	Lean-Production-Methoden																						
	Einzelstückfluss	Flexibles Layout	Produktion im Fluss	Synchronisation	Produktionsnivellierung	Just in Time	Kanban	Mehrmaschinenbedienung	Multidisziplinär ausgebildete Mitarbeitende	Flexibler Mitarbeiteneinsatz	Autonomation (Jidoka)	5S	Standardisierung	Visuelles Management	Total Productive Maintenance (TPM)	Schnellrüsten (SMED)	Poka Yoke	Kaizen	Shopfloor-Management	Wertstrommanagement			
Legende:																							
Leserichtung: Die Methode in der Zeile ist unterstützend ‚U‘ oder voraussetzend ‚V‘ für die Methode in der Spalte.																							
Auswirkung: + 3 sehr positiv + 2 positiv + 1 eher positiv 0 neutral - 1 eher negativ - 2 negativ - 3 sehr negativ																							
Einzelstückfluss			U1			U2	U1																
Flexibles Layout	U1					U1		V2	U1	V2													
Produktion im Fluss	V3	V1				U2	U1																
Synchronisation	V2		V1		V2	U1	V1						U1										
Produktionsnivellierung	U1		U1	U1		U2	U1																
Just in Time														U1									
Kanban						U3								U1					U1				
Mehrmaschinenbedienung	U1	U1																					
Multidisziplinär ausgebildete Mitarbeitende	U2	U3			V1			V2		V2			U1		U1	U1	U1	U1					
Flexibler Mitarbeiteneinsatz	U1	U1			U1	U1		U1	U1						U1	U1		U1					
Autonomation (Jidoka)	U1					U1	U1	V2															
5S		U1				U1			U1	U1				V1	U1	U1	U2		U1	U2	V1		
Standardisierung	V3		V1	V1	U1		U1	V1	V1	V1		U1			V1	U1		U2	U2	U2			
Visuelles Management				V1	V1	U1	V1		V1	V1	V2	U1	V1		V1	U1		U3	U3	U3			
Total Productive Maintenance (TPM)			U2	U1		U1	U1	U1		U1													
Schnellrüsten (SMED)	U2	U1	U1	U1	V1	U1	U1																
Poka Yoke		U1	U1			U1		U1			V1												
Kaizen	U1	U1	U1	U1	U1	U1	V1	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U1	V1			U1			
Shopfloor-Management				U1									U2	V1	U1				U2		U2		
Wertstrommanagement	U2	U1	U1	U1	U1	V1	U3							U3					U3	U2			

5.2.2 Interdependenzanalyse von Industrie-4.0-Technologien

Das Ziel dieses Abschnitts besteht darin, die Wirkverknüpfungen zwischen den in Abschnitt 5.1.2 identifizierten Industrie-4.0-Technologien zu analysieren. Das mehrstufige Vorgehen für die Interdependenzanalyse folgte dabei jenem aus Abbildung 5-8 und

beinhaltete eine bibliometrische Literaturanalyse, die Analyse von Anwendungsfällen aus der Industrie sowie eine Delphi-Studie. Es sei angemerkt, dass die Ergebnisse und Erkenntnisse bereits im Forschungsbeitrag von DILLINGER ET AL. (2022b) publiziert wurden.

Zur Analyse der Interdependenzen wurde im ersten Schritt eine bibliometrische Literaturrecherche durchgeführt. Dieser Rechercheansatz ermöglicht die quantitative Untersuchung einer großen Anzahl an Forschungsbeiträgen, wodurch beispielsweise Wirkverknüpfungen zwischen Forschungsthemen oder Begrifflichkeiten identifiziert werden können (BALL & TUNGER 2005, S. 24 ff.). Für die bibliometrische Literaturanalyse wurde die Software VOSviewer verwendet, die eine mehrdimensionale Mapping- und Clustering-Analyse von bibliometrischen Textdatensätzen ermöglicht. Als methodische Grundlage für die Mapping- und Clustering-Analyse diente eine Okkurrenz- und Kookkurrenzanalyse, die zunächst eine strukturierte Literaturanalyse erforderte, um eine breite Datenbasis an relevanten Publikationen aus dem Themengebiet Industrie 4.0 zu generieren. In einem folgenden Schritt konnte der generierte Textdatensatz in VOSviewer analysiert und in eine zweidimensionale Netzwerkdarstellung überführt werden, die die Wirkverknüpfungen zwischen den Elementen aufzeigt. Als Basis für die Literaturanalyse fungierte die Forschungsdatenbank Scopus. Die Schlüsselbegriffe für die Recherche leiteten sich aus den Haupttechnologiefeldern nach RÜBMANN ET AL. (2015) ab (siehe Abbildung 2-3) und wurden mit booleschen Operatoren mit den Begriffen ‚Industrie 4.0‘ sowie ‚Produktion‘ verknüpft. Die relevanten Publikationen wurden auf einen Zeitraum von 2011 bis 2021 sowie auf Konferenzbeiträge, Review- und Journal-Artikel aus dem Forschungsgebiet Engineering limitiert. Durch die Literaturanalyse konnten mehr als 4000 wissenschaftliche Veröffentlichungen für die Mapping- und Clustering-Analyse identifiziert werden. Die Textdaten der Publikationen wurden anschließend in VOSviewer übertragen, um mithilfe eines Text-Mining-Ansatzes, basierend auf dem Apache-OpenNLP-Toolkit, die Okkurrenzen und Kookkurrenzen von Industrie-4.0-Technologien zu analysieren und grafisch aufzubereiten (VAN ECK & WALTMAN 2009). Der Text-Mining-Ansatz verband hierzu zunächst die auftretenden Nomen mit den dazugehörigen Adjektiven, z. B. fahrerlose Transportsysteme (FTS), und belegte diese mit einem Relevanzscore. Dabei wies das Scoring-Modell Begriffen mit einer allgemeinen Bedeutung einen niedrigen Wert zu, während themenspezifische Begrifflichkeiten einen hohen Wert erzielten. Dies ermöglichte die Selektion von Industrie-4.0-Technologien entsprechend ihrer kontextspezifischen Relevanz. Abschließend wurden mögliche Duplikate, z. B. autonome Fahrzeuge und FTS, unter Anwendung einer Thesaurus-Datenbank entfernt. Das Ergebnis der Analyse wurde in einem zweidimensionalen bibliometrischen Netzwerk dargestellt. Dabei wurden die Industrie-4.0-Technologien als Knotenpunkte abgebildet, wobei der Radius der Knotenpunkte mit der Anzahl an Okkurrenzen korreliert. Je häufiger eine Technologie genannt wurde, desto größer war der Knotenpunkt

im Netzwerkdiagramm. Für den Abstand zweier Technologien war die vorherrschende Kookkurrenz maßgebend. Auch hierbei galt: Je häufiger zwei Technologien miteinander genannt werden, desto näher liegen diese im Netzwerk zusammen. Zudem wurde jede Technologie basierend auf den Kookkurrenzen einem Cluster zugeteilt und durch eine Farbcodierung gekennzeichnet (VAN ECK & WALTMAN 2009). Das in nachfolgender Abbildung 5-9 vorgenommene Clustering der Technologien findet ebenfalls im Industrie-4.0-Technologiekreis in Abschnitt 5.1.2 Berücksichtigung.

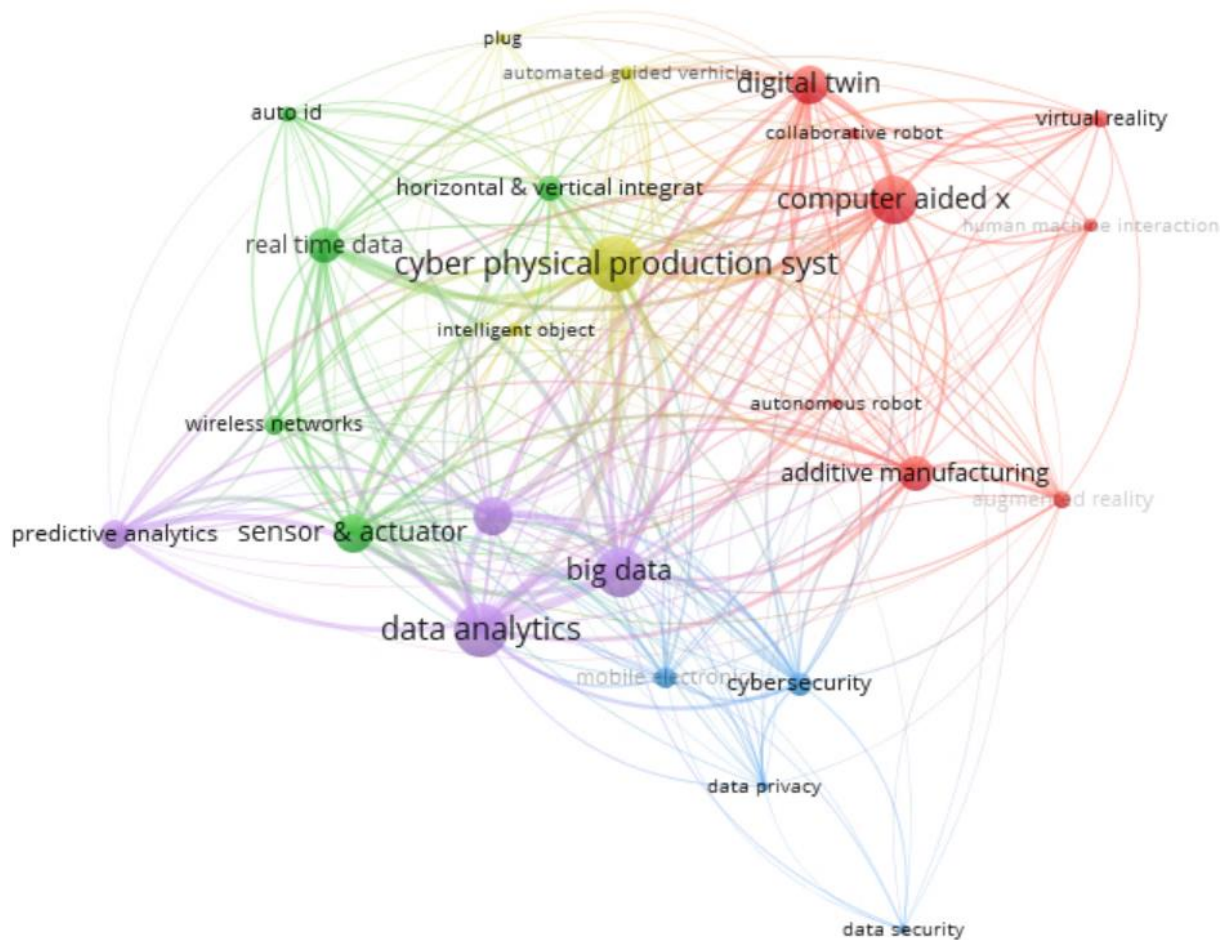


Abbildung 5-9: Bibliometrische Netzwerkanalyse für Industrie-4.0-Technologien basierend auf der Software VOSviewer (DILLINGER ET AL. 2022b)

Zusätzlich zur Literaturrecherche erfolgte im Zuge der vom Autor angeleiteten Studienarbeit von KREUZER (2021) eine Analyse von Industrie-4.0-Anwendungsfällen basierend auf der Industrie-4.0-Plattform (BMW & BMBF 2022). Der Fokus der Analyse lag dabei auf den in den Anwendungsfällen aufgeführten Interdependenzen zwischen den Industrie-4.0-Technologien. Insgesamt wurden 308 relevante Anwendungsfälle deutscher Unternehmen aus dem Wertschöpfungsbereich Produktion und Lieferkette untersucht (Stand 01.09.2021) und die identifizierten Verknüpfungen zwischen den Industrie-4.0-Technologien unter Angabe der Anzahl an Anwendungsfällen in eine Beziehungsmatrix übertragen (siehe Anhang J). Die Ergebnisse der Literatur- und Anwendungsfallanalyse waren wesentliche

Eingangsgrößen für die folgende Delphi-Studie. Es sei angemerkt, dass die Analyse der Industrie-4.0-Anwendungsfälle ebenfalls in Abschnitt 5.1.2 Anwendung findet, um relevante Industrie-4.0-Technologien zu identifizieren.

Die Delphi-Studie wurde mit neun Fachleuten aus der Industrie und Forschung über mehrere Runden durchgeführt. Zunächst bewerteten die Expertinnen und Experten die Intensität der Wirkverknüpfungen zwischen den Technologien sowie deren Einfluss auf die produktionsrelevanten Zielgrößen, um anschließend die Art der Interdependenz zu bestimmen. Wie in Tabelle 5-5 dargestellt, wurde für die Stichprobe aus Fachleuten eine heterogene Zusammensetzung gewählt, um möglichen Untersuchungsfehlern vorzubeugen.

Tabelle 5-5: Übersicht der Fachleute für die Delphi-Studie zur Analyse der Industrie-4.0-Interdependenzen

Expert*innen	Berufsbezeichnung	Unternehmen	Industriesegment
Expert*in 1	Leitung Lean Production	A	Automobilindustrie
Expert*in 2	Leitung Instandhaltung	B	Logistik Dienstleistung
Expert*in 3	Wissenschaftliche*r Mitarbeitende*r	C	Forschung und Entwicklung
Expert*in 4	Produktionsleitung	D	Maschinen- und Anlagenbau
Expert*in 5	Projektleitung Digitalisierung	E	Maschinen- und Anlagenbau
Expert*in 6	Leitung Engineering	A	Automobilindustrie
Expert*in 7	Projektleitung	F	Maschinen- und Anlagenbau
Expert*in 8	Projektleitung	G	Beratung
Expert*in 9	Wissenschaftliche*r Mitarbeitende*r	C	Forschung und Entwicklung

Zunächst bewerteten die Fachleute die Wirkbeziehungen sowie den Einfluss auf die Zielgrößen anonym anhand einer leeren Interdependenzmatrix. Die Bewertung erfolgte mithilfe einer siebenstufigen Likert-Skala, die von einer sehr negativen bis zu einer sehr positiven Intensität reichte und in Tabelle 5-3 dargestellt ist. Nach dieser Runde wurden die individuellen Interdependenzmatrizen der Expertinnen und Experten mit den Ergebnissen der Literaturrecherche und der Interdependenzmatrix der Anwendungsfallanalyse zusammengeführt und gegenübergestellt. In den folgenden zwei Runden der Delphi-Studie validierten und modifizierten die Fachleute die zusammengeführte Interdependenzmatrix und bestimmten die Art der Interdependenz. Die Interdependenzart zwischen zwei Technologien sollte analog zu den Interdependenzen im Bereich Lean Production (siehe Abschnitt 5.2.1) in eine voraussetzende (,V‘) oder unterstützende (,U‘) Wirkbeziehung unterschieden werden. Die folgende Interdependenzmatrix (siehe Tabelle 5-6) stellt das finale Ergebnis der Delphi-Studie dar und bildete einen wesentlichen Teil der Datengrundlage für die Entwicklung der Lean-4.0-Implementierungsstrategien. Die Leserichtung der Interdependenzmatrix orientiert sich vom Element in der Zeile zum Element in der Spalte. Somit ist die Technologie in der Zeile eine Voraussetzung oder Unterstützung für die Technologie in der Spalte.

Tabelle 5-6: Interdependenzmatrix für Industrie 4.0 als Datengrundlage des Simulationsmodells aus DILLINGER ET AL. (2022b)

	Industrie-4.0-Technologien																										
	Big Data	Data Analytics	Autonome Roboter	Fahrerlose Transportsysteme	Computer-aided X (CAX)	Predictive Analytics	Digitaler Zwilling	Vertikale Integration	Maschine-zu-Maschine-Kommunikation	Plug & Produce	Horizontale Integration	Auto ID (RFID)	Sensoren & Aktoren	Intelligente Objekte	Cyber-physisches System	Echtzeitdaten	Datensicherheit	Datenschutz	Cloud-Nutzung	Kabellose Netzwerke	Additive Fertigung	Augmented Reality	Virtual Reality	Mobile Elektronik	Mensch-Maschine-Interaktion	Kollaborative Roboter	
	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	I-7	I-8	I-9	I-10	I-11	I-12	I-13	I-14	I-15	I-16	I-17	I-18	I-19	I-20	I-21	I-22	I-23	I-24	I-25	I-26	
I-1		V3	V1	V1	U2	V3	V2	U2			U2			V1	V2						U2	U1	U1	U1		U1	
I-2	U3		V2	V2	U2	V3	V3	U2		U1	U2			V2	V3						U2	U2	U2	U1		U1	
I-3	U2	U1		U1							U1			U2	U2	U1					U2						
I-4			U2								U1			U1	U2	U1										U2	
I-5	U1	U1	U1	U1		U1	V2	U1		U1	U2				U2						V3	U1	V1			U1	
I-6	U1	U3	U2	U1			U1	U1			U2			U1	V1						U2					U1	
I-7	U2	U2	U1	U1	U2	U1			U1	U1	U2			U1	V1						U2	U2	U3			U1	
I-8	U2	V2	U2	U1	U2	V2	U2		U1	U2	U2			U1	V2	U2					U1					U1	
I-9	U2	U2	V3	U2		U2	U1	U1		V2	U2			V3	V3	U2					U1	V1	V2	U1	U1	U2	
I-10			U1	U1				U1	U2		U1			U1	U2	U1										U1	U2
I-11	U2	U2	U2	U2	U2	U1	U1	U2	U1	U2				U1	U2	U2					U1	U1	U1		U1	U1	
I-12	U1	U1	U1	V1		U1	U1	U1	V1	V1	U1			V3	V3	U2						V1	U2	U2	U2	U2	
I-13	V3	V2	V3	V3	U1	V3	V2	V1	V2	V2	V1	U1			V3	V3	V3		U1		U2	V2	V2	U2	V3	V3	
I-14	U2	U2	U1	U1		U2	U2		U1	U1	U1				V2	U2						U2	U1	U1	U1	U1	
I-15	U2	U2	U2	U2	U1	U2	U2	U2	U2	U2	U2					U2						U2	U2	U2	U2	U2	
I-16	U3	U2	V3	V3	U1	V3	V3	V2	V2	V2	V2			V3	V3			U1		U2	U2	V2	V2	U2	V2	V2	
I-17	V3	V3	V2	V2	V1	V3	V1	V2	V2	V2	V3	V1	V1	V2	V3	V2		U3	V3	V3	V2	V2	V2	V2	V2	V2	
I-18	V2	V3	V1	V1	V2	V1	V1	V3	V1	V1	V3	V1	V1	V2	V2	V2	U2		V1	V1	V2	V2	V2	V2	V3	V1	
I-19	U3	U3	U2	U1		U2	U1	U1	U1	U1	U2		U1	U2	U3	U3					U2		U1	U2			
I-20	U3	U3	U1	V2		U2	V1	V2	U2	U2	V2	U2	U2	V2	V2	V2		V3		U2	V1	V1	V3	U2	U1		
I-21															U1												
I-22					U1	U1				U1					U1	U2										U2	
I-23					U2	U1	U2			U1					U1	U1					U1					U1	
I-24	U2	U1	U1		U1	U2	U1		U1	U1	U1	U2	U2	U2	U2	U3			U1	U2		V1	V1		U2	U2	
I-25	U1	U1		U2		U1		U1		U1	U1				U2	U1					U2	V2	V2	U2		V3	
I-26	U1	U1	U1	U1						U1					U2	U1										U3	

5.2.3 Interdependenzanalyse von Lean- und Industrie-4.0-Elementen

Der vorliegende Abschnitt zielt darauf ab, die Interdependenzen zwischen den 20 identifizierten Lean-Production-Methoden (siehe Abschnitt 5.1.1) und den 26 Industrie-4.0-Technologien aus Abschnitt 5.1.2 aufzuzeigen und deren Interdependenzen zu spezifizieren. Dabei sollen gemäß Forschungsfrage 2 (siehe Abschnitt 1.2) sowohl der Einfluss von Lean-Production-Methoden auf Industrie-4.0-Technologien als auch jener der Industrie-4.0-Technologien auf die Lean-Production-Methoden untersucht werden. Die Identifikation der Wirkbeziehungen orientierte sich an der in Abbildung 5-8 aufgezeigten Vorgehensweise und umfasste eine strukturierte Literaturanalyse sowie eine Delphi-Befragung mit Expertinnen und Experten aus der Industrie und Forschung. Die daraus resultierenden Forschungsergebnisse in Form einer Interdependenzmatrix bildeten gemeinsam mit der Lean-Production- und Industrie-4.0-Interdependenzmatrix (siehe Abschnitte 5.2.1 und 5.2.2) die Datengrundlage für das Simulationsmodell zur Entwicklung einer Lean-4.0-Implementierungsstrategie (siehe Unterkapitel 5.3).

Für die Erarbeitung der Interdependenzmatrix zwischen den Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien bildete die vorherrschende Fachliteratur eine essenzielle Grundlage und diente als Eingangsgröße für die nachfolgende Delphi-Studie. Das Vorgehen der Literaturanalyse ist in Abbildung 5-10 dargestellt und ist an BERTONI ET AL. (2017) angelehnt.

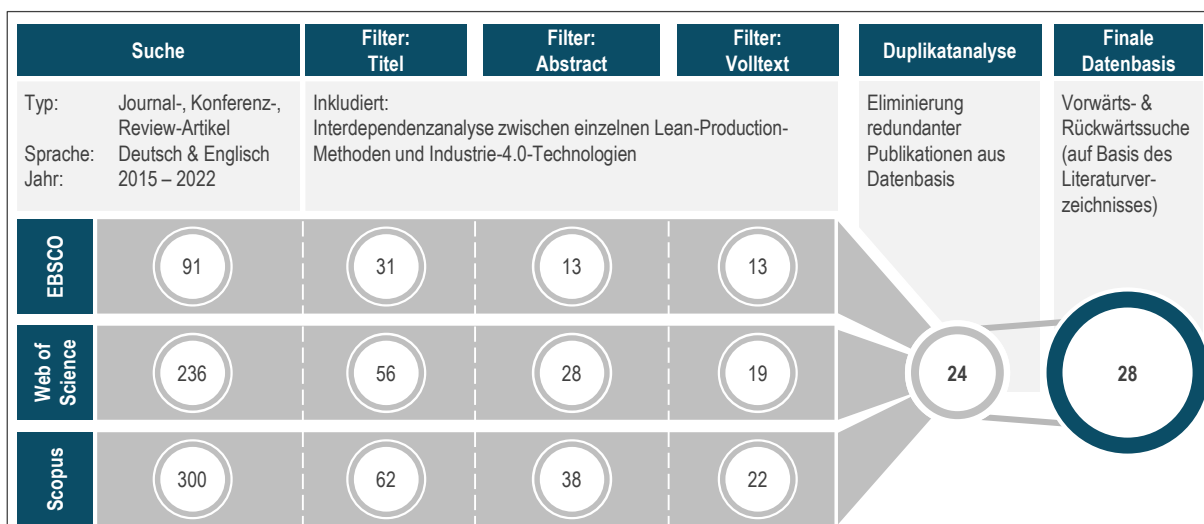


Abbildung 5-10: Vorgehensweise bei der Literaturanalyse zur Identifikation der Fachliteratur für die Interdependenzanalyse zwischen Lean Production und Industrie 4.0

Für die Literaturanalyse wurden die Datenbanken Scopus, EBSCO und Web of Science verwendet. Die Suchbegriffe wurden mit booleschen Operatoren verknüpft und setzten sich aus ‚Lean‘, ‚Schlank‘, ‚Industry 4.0‘, ‚Industrie 4.0‘ sowie ‚Lean 4.0‘ zusammen. Außerdem wurde die Suche auf englisch- und deutschsprachige Konferenzbeiträge sowie auf Review- und Journal-Artikel aus den Jahren 2015 bis 2021 beschränkt. Dem Ablauf in Abbildung

5-10 folgend wurden die wissenschaftlichen Artikel zunächst auf Basis ihrer Titel und Zusammenfassungen sowie nachfolgend auf der Grundlage ihres Volltexts gefiltert. Gemäß dem Filterkriterium eint die ausgewählte Fachliteratur, dass die Publikationen Wirkverknüpfungen zwischen einzelnen Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien berücksichtigen. In einem folgenden Schritt wurden redundante Veröffentlichungen aus verschiedenen Datenbanken verglichen und entfernt und das Ergebnis wurde durch ein systematisches Backward- und Forward-Snowballing-Verfahren gemäß WOHLIN (2014) um weitere Beiträge aus der Fachliteratur ergänzt. Insgesamt konnten so 28 wissenschaftliche Publikationen identifiziert werden, die die Wirkbeziehung zwischen Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien im produktionstechnischen Kontext betrachten. Die gewählten Fachbeiträge sind identisch zu denen aus Tabelle 3-1, die eine positive Ausprägung bei Merkmal 2c aufweisen.

In der nachfolgenden Tabelle 5-7 ist ein Auszug der Beziehungsmatrix basierend auf der Literaturanalyse dargestellt. Die gesamten Ergebnisse der Literaturanalyse sind in Tabelle 0-10 in Appendix K aufgeführt. Da die Wirkrichtung der Interdependenzen zwischen Lean- und Industrie-4.0-Elementen in der Literatur nur unzureichend Berücksichtigung findet, konnte der Einfluss einer Lean-Production-Methode (Zeile) auf eine Industrie-4.0-Technologie (Spalte) nicht bestimmt werden. Daher sind die Wirkverknüpfungen in Tabelle 5-7 sowie in Tabelle 0-10 (siehe Anhang K) mit einem ‚X‘ symbolisiert, das keinen Rückschluss auf die Wirkrichtung liefert.

Tabelle 5-7: Literaturbasierte Interdependenzanalyse zwischen Lean- und Industrie-4.0-Elementen

		Industrie-4.0-Technologien																									
		Big Data	Data Analytics	Autonome Roboter	Fahrerlose Transportsysteme	Computer-aided X (CAX)	Predictive Analytics	Digitaler Zwilling	Vertikale Integration	Maschine-zu-Maschine-Kommunikation	Plug & Produce	Horizontale Integration	Auto ID (RFID)	Sensoren & Aktoren	Intelligente Objekte	Cyber-physisches System	Echtzeitdaten	Datensicherheit	Datenschutz	Cloud-Nutzung	Kabellose Netzwerke	Additive Fertigung	Augmented Reality	Virtual Reality	Mobile Elektronik	Mensch-Maschine-Interaktion	Kollaborative Roboter
Lean-Methoden	Einzelstückfluss	X	X	X		X			X		X					X	X				X	X	X	X			
	Flexibles Layout		X					X			X	X		X							X						X
	Produktion im Fluss	X	X	X	X	X		X	X	X	X		X			X				X		X		X	X	X	X
	Synchronisation	X	X		X			X	X	X	X	X	X	X	X	X				X				X	X		

Auf Grundlage der strukturierten Literaturrecherche erfolgte in der zweiten Phase unter Anwendung der Delphi-Methode die Spezifizierung der Intensität und Art der Interdependenzen zwischen den Lean-Methoden und den Industrie-4.0-Technologien in beide Wirkrichtungen. Hierzu wurden 14 Fachleute aus Industrie und Forschung unter Wahrung ihrer Anonymität befragt (siehe Vorgehen in Abbildung 5-8). Die Fachleute einte deren mehrjährige Erfahrung im Bereich von Lean Production und Industrie 4.0 im produktionstechnischen Kontext. Eine Übersicht der ausgewählten Expertinnen und Experten ist in Tabelle 5-8 aufgeführt.

Tabelle 5-8: Übersicht der Fachleute für die Delphi-Studie zur Analyse der Interdependenzen zwischen Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien

Expert*innen	Berufsbezeichnung	Unternehmen	Industriesegment
Expert*in 1	Leitung Lean Production	A	Automobilindustrie
Expert*in 2	Projektleitung Operation	B	Beratung
Expert*in 3	Projektleitung	C	Forschung und Entwicklung
Expert*in 4	Wissenschaftliche*r Mitarbeitende*r	D	Forschung und Entwicklung
Expert*in 5	Leitung Qualitätsmanagement	E	Maschinen- und Anlagenbau
Expert*in 6	Projektleitung	F	Beratung
Expert*in 7	Projektleitung	C	Forschung und Entwicklung
Expert*in 8	Leitung Instandhaltung	G	Logistik
Expert*in 9	Projektleitung	B	Beratung
Expert*in 10	Wissenschaftliche*r Mitarbeitende*r	D	Forschung und Entwicklung
Expert*in 11	Leitung der Produktion	H	Maschinen- und Anlagenbau
Expert*in 12	Projektleitung Produktionsplanung	I	Automobilindustrie
Expert*in 13	Projektleitung Digitalisierung	J	Maschinen- und Anlagenbau
Expert*in 14	Wissenschaftliche*r Mitarbeitende*r	D	Forschung und Entwicklung

Im Zuge der Delphi-Studie bewerteten die Expertinnen und Experten in der ersten Runde anonym die Wirkverknüpfung zwischen Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien. Dabei untersuchten sie sowohl den Einfluss der Lean-Production-Methoden auf Industrie-4.0-Technologien als auch den der Industrie-4.0-Technologien auf die Lean-Production-Methoden. Hierzu erhielten die teilnehmenden Expert*innen zwei Interdependenzmatrizen mit jeweils unterschiedlicher Leserichtung, die in Tabelle 5-9 und Tabelle 5-10 dargestellt sind. Die Bewertung der Intensität erfolgte unter Anwendung einer siebenstufigen Likert-Skala, die in Tabelle 5-3 aufgeführt ist. Zudem erhielten die Fachleute eine Kurzbeschreibung der Lean-Production- und Industrie-4.0-Elemente in Form eines Glossars, um eine konsistente Wissensgrundlage zu schaffen. Nach der ersten Runde wurde für die befüllten Interdependenzmatrizen der Fachleute der Mittelwert aus den Intensitäten je Wirkbeziehung gebildet. Zudem wurden die Erkenntnisse aus der Literaturrecherche integriert und die Abweichungen zwischen der Meinung der Fachleute und der Literaturanalyse hervorgehoben. In der folgenden Runde wurde die zusammengefasste Interdependenzmatrix an die Expertinnen und Experten verteilt, um sie zu verifizieren und die Art der

Tabelle 5-10: Interdependenzmatrix für den Einfluss von Industrie-4.0-Technologien auf Lean-Methoden

Legende: <u>Leserichtung:</u> Das Element in der Zeile ist unterstützend ‚U‘ oder voraussetzend ‚V‘ für das Element in der Spalte. <u>Auswirkung:</u> + 3 sehr positiv + 2 positiv + 1 eher positiv 0 neutral - 1 eher negativ - 2 negativ - 3 sehr negativ		Lean-Production-Methoden																			
		Einzelstückfluss	Flexibles Layout	Produktion im Fluss	Synchronisation	Produktionsnivellierung	Just in Time	Kanban	Mehrmaschinenbedienung	Multidisziplinär ausgebildete Mitarbeitende	Flexibler Mitarbeitereinsatz	Autonomation (Jidoka)	5S	Standardisierung	Visuelles Management	Total Productive Maintenance (TPM)	Schnellrüsten (SMED)	Poka Yoke	Kaizen	Shopfloor-Management	Wertstrommanagement
Industrie-4.0-Technologien	Big Data	U2	U2	U2	U2	U1	U2	U1	U1	U1	U2	U1	U2	U1	U2	U1	U1	U1	U2	U2	
	Data Analytics	U2	U1	U2	U2	U3	U2	U2	U1	U1	U2	U1	U2	U2	U3	U2	U1	U2	U2	U3	
	Autonome Roboter	U1	U1			U1	U1	U1			U2										
	Fahrerlose Transportsysteme	U1	U1			U1	U2	U1		U1						U1					
	Computer-aided X (CAX)	U1	U1	U1	U2	U1	U1	U1	U1			U1	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U2	
	Predictive Analytics	U1	U1	U1	U1	U1		U1							U3	U1				U2	
	Digitaler Zwilling	U1	U1	U1	U1	U2	U1	U1	U1						U1	U1	U1	U2	U1	U2	
	Vertikale Integration	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U2	U1		U1	U1			U2	U1	U1	U2	U3	U2	
	Maschine-zu-Maschine-Kommunikation	U1		U1	U1	U1	U1	U1	U2	U1	U2			U1	U1	U2	U1				
	Plug & Produce	U2	U1	U2	U1	U2			U2	U2	U1				U1	U3	U2				
	Horizontale Integration	U1	U1	U1	U1	U2	U3	U2	U1	U1	U1	U2			U2	U1	U1	U1	U2	U3	
	Auto ID (RFID)	U1		U1	U1	U1	U2	U2	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U2	
	Sensoren & Aktoren	U1		U1	U1	U1	U2	U2	U1	U1	U1	U2	U1	U1	U1	U2	U2	U1	U1	U2	
	Intelligente Objekte	U2	U1	U1		U1	U2	U2	U1	U1	U1	U2	U1	U1	U1	U2	U2	U1	U1	U2	
	Cyber-physisches System	U2	U1	U2		U2	U2	U1	U1	U1	U1	U2	U1	U2	U1	U2	U2	U1	U1	U3	
	Echtzeitdaten	U1		U1	U1	U2	U3	U1	U1	U1	U1	U3	U1	U1	U2	U2	U1	U1	U1	U3	
	Datensicherheit																				
	Datenschutz																				
	Cloud-Nutzung			U1	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U2	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U2	
	Kabellose Netzwerke					U1	U1	U1	U1	U1	U1	U2	U1	U1	U1	U1				U2	
	Additive Fertigung	U1					U1	U1	U2												
	Augmented Reality	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U3	U2	U2	U1	U2	U2	U2	U2	U2	U1	U1	U1	
	Virtual Reality	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U2	U2	U2	U1	U2	U2	U2	U1	U1	U1	U1	U1	
	Mobile Elektronik			U1	U1		U1	U1	U2	U2	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U1		
Mensch-Maschine-Interaktion		U1	U1	U1	U1	U1	U1	U3	U3	U2	U1	U1	U1	U2	U2	U3	U2	U1	U1		
Kollaborative Roboter	U1	U1						U3	U2	U2						U1					

Die vier Interdependenzmatrizen dienten gemeinsam mit den Erkenntnissen aus Lösungsbaustein 1 als Datengrundlage für das in Abschnitt 5.3 entwickelte Simulationsmodell.

5.3 Lösungsbaustein 3 | Simulation der Lean-4.0-Implementierungsstrategien

Das Ziel von Lösungsbaustein 3 leitet sich aus der dritten Forschungsfrage (siehe Abschnitt 1.2) ab und besteht aus der Entwicklung eines systemdynamischen Simulationsmodells, das Unternehmen dazu befähigt, allgemeingültige und unternehmensspezifische Lean-4.0-Implementierungsstrategien abzuleiten.

Die Basis für die Erarbeitung des Simulationsmodells wurde in den vorherigen Kapiteln und Abschnitten gelegt. So konnte ein grundlegendes Verständnis zu den Themenbereichen Lean Production (siehe Abschnitt 2.1) und Industrie 4.0 (siehe Abschnitt 2.2) sowie zu deren Verschränkung in Form von Lean 4.0 (siehe Abschnitt 2.3) erarbeitet werden. Des Weiteren wurde in Kapitel 2 der wissenschaftstheoretische Rahmen zu den produktionsrelevanten Zielgrößen (siehe Abschnitt 2.4) und zur Ablaufsimulation in Abschnitt 2.5 gelegt. Diesen Erkenntnissen folgend und unter Würdigung des Stands der Forschung (siehe Kapitel 3) wurden anschließend die Anforderungen an das Simulationsmodell sowie dessen Grundstruktur festgelegt (siehe Kapitel 4) und darauf basierend in Lösungsbaustein 1 die relevanten Lean- und Industrie-4.0-Elemente (siehe Abschnitt 5.1) ausgewählt und spezifiziert. Lösungsbaustein 2 zielte auf die umfassende Analyse der Interdependenzen zwischen den Lean- und Industrie-4.0-Elementen ab und schaffte die Datengrundlage für das Simulationsmodell (siehe Abschnitt 5.2). Somit ist die erforderliche Wissensbasis geschaffen, um in Lösungsbaustein 3 ein systemdynamisches Simulationsmodell für die Ableitung von Lean-4.0-Implementierungsstrategien zu erarbeiten. Zudem wird in diesem Abschnitt eine Anwendungsmethode entwickelt, die den benutzenden Personen Hilfsmittel in Form von Leitfäden oder Bewertungsmatrizen zur Verfügung stellt, um eine strukturierte und transparente Anwendung des Simulationsmodells sicherzustellen (siehe Abschnitt 5.3.4).

Im Zuge der Vorgehensweise zur Erstellung des Simulationsmodells wurden zunächst die notwendigen Modellparameter identifiziert und definiert (siehe Abschnitt 5.3.1), um darauf aufbauend die Wirkbeziehungen und Modellstrukturen für die Lean- und Industrie-4.0-Elemente sowie die produktionsrelevanten Zielgrößen abzuleiten (siehe Abschnitt 5.3.2). Die Entwicklung des systemdynamischen Simulationsmodells erfolgte mit der Software AnyLogic, wobei der Simulationsablauf und die angestrebten Ergebnisse in Abschnitt 5.3.3 vorgestellt werden. Im letzten Schritt wurde ein Anwendungsleitfaden für das Simulationsmodell bereitgestellt (siehe Abschnitt 5.3.4). Es sei angemerkt, dass die Konzeptionierung und Ausarbeitung von Lösungsbaustein 3 in Anlehnung an die vom Autor betreuten wissenschaftlichen Studienarbeiten von BERNHARD (2022), DERVIS (2021), FORMANN (2022), MEßMER (2022) und WÖLFL (2021) erfolgte. In Abbildung 5-11 sind die Vorgehensweise sowie die angestrebten Ergebnisse von Lösungsbaustein 3 zusammengefasst.

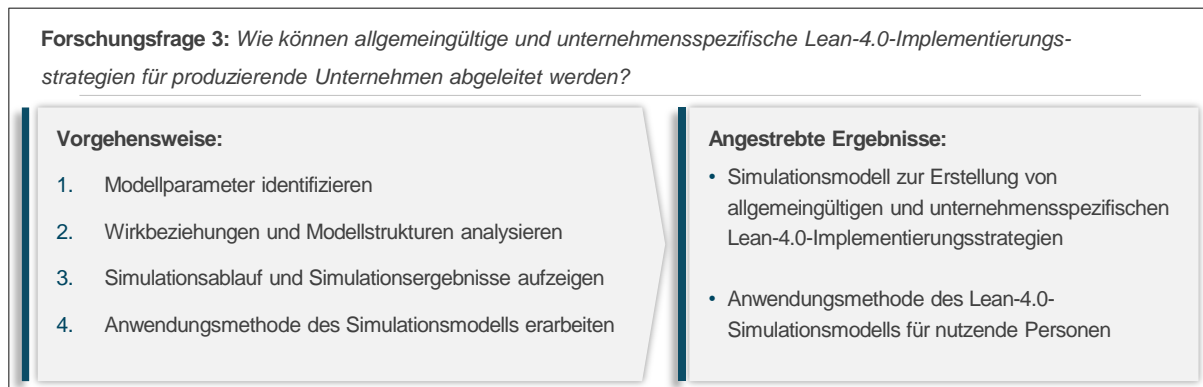


Abbildung 5-11: Vorgehensweise zur Ableitung des Lean-4.0-Simulationsmodells

5.3.1 Modellparameter

Das Ziel dieses Abschnitts besteht in der Identifikation von Modellparametern, die sich auf eine Lean-4.0-Implementierung in produzierenden Unternehmen auswirken. Die Parameter wurden dabei unter Berücksichtigung der in Abschnitt 4.1 vorgestellten Anforderungen an das Simulationsmodell abgeleitet. Zudem beruhen sie auf den Erkenntnissen von umfassenden Literaturrecherchen sowie einer leitfadengestützten Befragung von Fachleuten unter Anwendung eines Ursachen-Wirkungs-Diagramms (BERNHARD 2022, S. 87 f.). Das Diagramm ist eine grafische Darstellungsform zur systematischen Analyse und Identifikation von Einflussfaktoren auf ein Ergebnis oder Problem, um Ursachen zu identifizieren und deren Abhängigkeiten darzustellen (SCHULTE-ZURHAUSEN 2014, S. 513).

An der durchgeführten leitfadengestützten Befragung nahmen zwölf Fachleute aus der Industrie teil, die umfassende Erfahrungen mit der Einführung von Lean- und Industrie-4.0-Elementen in der Produktion aufwiesen. Die partizipierenden Personen waren in unterschiedlichen Funktionen tätig, so wurden neben leitenden Angestellten aus dem indirekten Bereich auch Führungspersonen aus den operativen Bereichen befragt. Die Fachgespräche erfolgten anhand eines Interviewleitfadens in der Struktur eines Ursachen-Wirkungs-Diagramms und dauerten etwa 30 bis 45 Minuten pro Expert*in (BERNHARD 2022, S. 85 ff.). Komplettiert wurden die Ergebnisse der Expert*innenbefragung durch eine strukturierte Literaturanalyse. Die identifizierten Einflussfaktoren stützten sich auf die in Abschnitt 3.3 ausgewählte Fachliteratur, in der unterschiedliche Implementierungsansätze aus den Themenbereichen Lean Production, Industrie 4.0 und Lean 4.0 untersucht wurden. Das daraus resultierende und in Abbildung 5-12 dargestellte Ursachen-Wirkungs-Diagramm enthält die für das Simulationsmodell relevanten Einflussgrößen. Die aufgeführten Modellparameter sind in die Kategorien Management, projektbeteiligte Personen, Produktionsbereich, Elemente sowie Modell segmentiert und lassen sich in unternehmensspezifische und unternehmensübergreifende Parameter untergliedern.

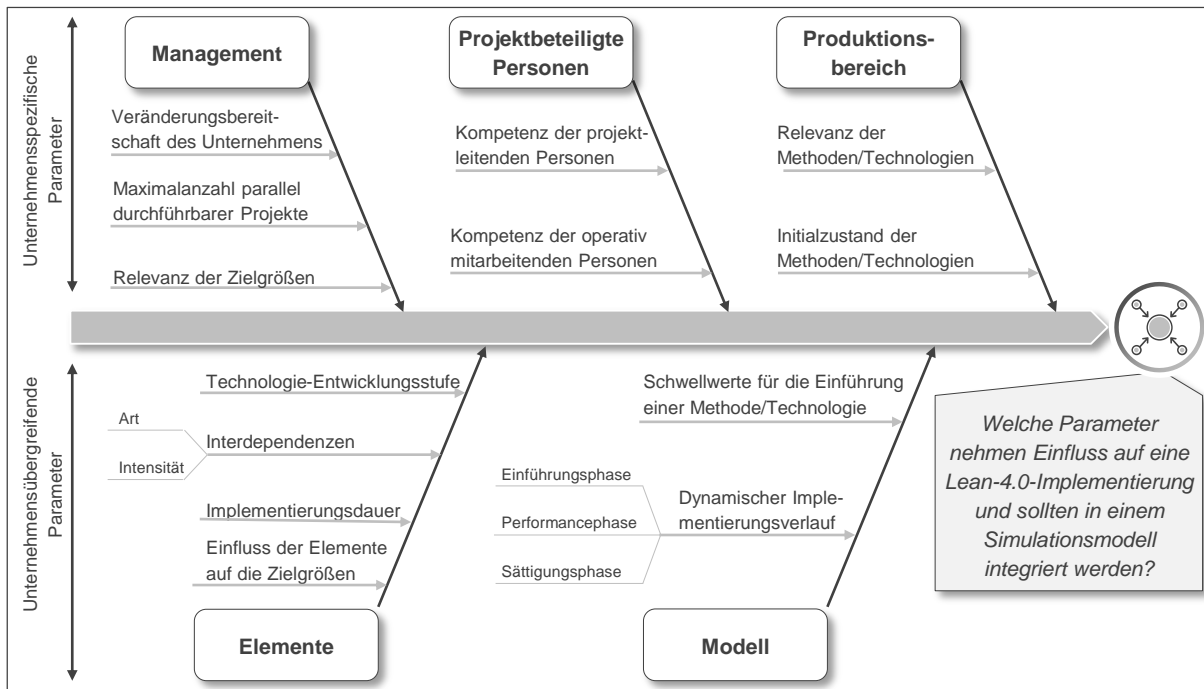


Abbildung 5-12: Ursachen-Wirkungs-Diagramm zur Identifikation der Modellparameter

Die unternehmensspezifischen Parameter werden vor der Erstellung der Implementierungsstrategie vom jeweiligen Unternehmen beispielsweise im Rahmen von Workshops definiert. Zur Unterstützung der Anwendenden werden für die unternehmensindividuellen Modellparameter daher nachfolgend Leitfragen sowie Bewertungsmöglichkeiten bereitgestellt, die in Abschnitt 5.3.4 in eine Anwendungsmethode überführt werden. Die unternehmensübergreifenden Parameter wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit festgelegt und sollen vom Unternehmen vor der Anwendung überprüft und gegebenenfalls an unternehmensspezifische Gegebenheiten angepasst werden. Die Aufteilung in unternehmensspezifische und -übergreifende Modellparameter soll eine strukturierte und effiziente Ableitung der Implementierungsstrategien ermöglichen. Im weiteren Verlauf des Abschnitts werden die in Abbildung 5-12 aufgeführten Parameter spezifiziert.

Veränderungsbereitschaft des Unternehmens: Für viele Unternehmen stellt es eine große Herausforderung dar, eine veränderungsbereite Organisation zu schaffen (BURKHART 2020, S. 82). Diese ist allerdings für eine erfolgreiche Einführung von Industrie-4.0- und Lean-Production-Elementen zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit von entscheidender Bedeutung. Als Veränderungsbereitschaft werden im Kontext dieser Arbeit die Einstellungen, Überzeugungen und Intentionen der Mitarbeitenden eines Unternehmens bezogen auf einen Veränderungsbedarf verstanden (ARMENAKIS ET AL. 1993, S. 681). Folglich ist für diesen Parameter maßgebend, ob die projektbeteiligten Personen die Veränderungen, die mit der Einführung von Lean-Production- und Industrie-4.0-Elementen einhergehen, als erforderlich erachten und aktiv unterstützen. Dies impliziert im Sinne der Lean-Kultur das

Streben nach einer stetigen Verbesserung. Für die Bewertung der Veränderungsbereitschaft wird eine vierstufige Werteskala in Anlehnung an die Ebenen der Veränderungsbereitschaft nach SACK (2006, S. 73) verwendet, die gemeinsam mit der Leitfrage sowie der Beschreibung des Modellparameters in Abbildung 5-13 aufgeführt ist.




Modellparameter Veränderungsbereitschaft			
Leitfrage zur Bewertung der Veränderungsbereitschaft des Unternehmens:			
<i>Wie ausgeprägt ist die Veränderungsbereitschaft der Belegschaft eines Unternehmens in Bezug auf die Einführung von Industrie-4.0-Technologien und Lean-Production-Methoden und den daraus resultierenden Veränderungen?</i>			
Ausprägung	Symbole	Stufe	Beschreibung
Keine Bereitschaft		0	Die Belegschaft verschließt sich der notwendigen Veränderung.
Geringe Bereitschaft		1	Die Belegschaft ist offen für marginale Veränderungen und akzeptiert diese.
Mittlere Bereitschaft		2	Die Belegschaft identifiziert Veränderungen und unterstützt bei deren Umsetzung.
Hohe Bereitschaft		3	Die Belegschaft greift erforderliche Veränderungen proaktiv auf, ist motiviert und pflegt eine Unternehmenskultur der stetigen Verbesserung.

Abbildung 5-13: Modellparameter zur Berücksichtigung der Veränderungsbereitschaft des Unternehmens

Maximalanzahl parallel durchführbarer Projekte: Dieser Modellparameter beschreibt, wie viele Lean-Production- und Industrie-4.0-Projekte gleichzeitig im ausgewählten Anwendungsbereich vom jeweiligen Unternehmen durchgeführt werden können. Die Anzahl der gleichzeitig maximal einführbaren Methoden und Technologien kann vom Unternehmen als limitierender Faktor hinterlegt werden. Sollte die Anzahl der vom Simulationsmodell zeitgleich vorgeschlagenen Lean-Methoden oder Industrie-4.0-Technologien die Maximalmenge überschreiten, so erfolgt eine Priorisierung anhand der Relevanz der Methode oder Technologie für das Unternehmen. Die Leitfrage sowie der Bewertungsbereich sind in nachfolgender Abbildung 5-14 aufgeführt.

Modellparameter Maximalanzahl parallel durchführbarer Projekte	
Leitfrage zur Bewertung der Maximalanzahl der parallel einführbaren Projekte:	
<i>Wie viele Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien können in einem Anwendungsbereich in der Produktion gleichzeitig eingeführt werden?</i>	
Range	Beschreibung
1 – n	Die Anzahl der gleichzeitig einführbaren Elemente liegt aktuell zwischen 1 bis n, da die 20 Lean-Production-Methoden und 26 Industrie-4.0-Technologien ergänzt werden könnten.

Abbildung 5-14: Modellparameter zur Berücksichtigung der Maximalanzahl an parallel durchführbaren Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien in einem Anwendungsbereich

Relevanz der Zielgrößen: Für eine zielorientierte Implementierung der Lean- und Industrie-4.0-Elemente gilt es, die für das Unternehmen und den Produktionsbereich relevanten

Zielgrößen zu gewichten. Als Zielgrößen werden die in Abschnitt 2.4 vorgestellten Dimensionen Zeit, Kosten, Qualität, Flexibilität sowie soziale und ökologische Nachhaltigkeit aufgeführt. Die Gewichtung der Zielgrößen nimmt Einfluss auf den Auswahlprozess sowie die Einführungsreihenfolge der Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien, da Elemente mit einem ausgeprägten Einfluss auf die Zielgrößen unter Berücksichtigung der Interdependenzen priorisiert eingeführt werden. Die Leitfrage sowie die Ausprägungen des Modellparameters sind in nachfolgender Abbildung 5-15 aufgeführt.

Modellparameter Relevanz der Zielgrößen			
Leitfrage zur Bewertung der Relevanz der Zielgrößen des Unternehmens: <i>Wie bewerten Sie die Relevanz der Zielgröße für den vorgesehenen Anwendungsbereich?</i>			
Ausprägung	Symbole	Stufe	Beschreibung
Nicht relevant		0	Die Zielgröße ist für den Anwendungsbereich nicht relevant.
Eher relevant		1	Die Zielgröße ist für den Anwendungsbereich eher relevant.
Relevant		2	Die Zielgröße ist für den Anwendungsbereich relevant.
Sehr relevant		3	Die Zielgröße ist für den Anwendungsbereich sehr relevant.

Abbildung 5-15: Modellparameter zur Berücksichtigung der Relevanz der Zielgrößen für das Unternehmen

Kompetenz der operativ Mitarbeitenden und projektleitenden Personen: Als Kompetenz wird gemäß ERPENBECK (2012, S. 16) die Fähigkeit von Personen bezeichnet, in Situationen selbstorganisiert und kreativ handeln zu können. Im Kontext der Anwendung des Modells dieser Arbeit ist daher eine umfassende Fach- und Methodenkompetenz der projektbeteiligten Personen in den Bereichen Lean Production und Industrie 4.0 erforderlich. Zudem sind für die erfolgreiche Durchführung von Veränderungsprojekten und für die Schaffung einer kontinuierlichen Verbesserungskultur weitere Kompetenzen, beispielsweise eine hohe Lernbereitschaft, von Bedeutung. Die Ausprägungen der Kompetenzen der projektbeteiligten Personen fließen daher als Parameter in das systemdynamische Simulationsmodell ein. Die Bewertung der Kompetenzen erfolgt unter Anwendung der Einteilung nach BREITKOPF (2018, S. 77). Dieser differenziert die Kompetenzausprägung in die Stufen Beginn, Basis, Fortgeschritten und Expertise. Die gewählte Skala ist in nachstehender Abbildung 5-16 beschrieben. Die Leitfrage zielt dabei auf die Fach- und Methodenkompetenzen der Mitarbeitenden ab, da weitere Sozial- und kommunikative oder Aktivitäts- und Handlungskompetenzen im Rahmen dieser Arbeit als immanente Grundvoraussetzungen für eine erfolgreiche Projektbearbeitung durch die Belegschaft angesehen werden.





Modellparameter Kompetenz der operativ Mitarbeitenden und der Projektleitung			
Leitfrage zur Bewertung der Kompetenz der operativ Mitarbeitenden:			
<i>Wie ausgeprägt ist die Fach- und Methodenkompetenz der operativ Mitarbeitenden für die Einführung und Umsetzung der vorliegenden Lean-Production-Methode/Industrie-4.0-Technologie im jeweiligen Anwendungsbereich?</i>			
Leitfrage zur Bewertung der Kompetenz der Projektleitung:			
<i>Wie ausgeprägt ist die Fach- und Methodenkompetenz der projektleitenden Personen für die Einführung und Projektierung der vorliegenden Lean-Production-Methode/Industrie-4.0-Technologie im jeweiligen Anwendungsbereich?</i>			
Ausprägung	Symbole	Stufe	Beschreibung
Beginn		0	Es liegen keine Kompetenzen für die Methode oder Technologie vor. Die Mitarbeitenden müssen umfassend geschult werden.
Basis		1	Es liegen einzelne Grundkompetenzen für die Methode oder Technologie vor. Die Mitarbeitenden benötigen eine Aufbauschulung.
Fortgeschritten		2	Es liegen weitreichende Kompetenzen für die Methode oder Technologie vor. Die Mitarbeitenden können diese anwenden.
Expertise		3	Es liegen umfassende Kompetenzen für die Methode oder Technologie vor. Die Mitarbeitenden können diese anwenden und weitergeben.

Abbildung 5-16: Modellparameter zur Berücksichtigung der Kompetenz der operativ mitarbeitenden sowie projektleitenden Personen

Relevanz der Methoden/Technologien: Dieser Parameter dient zur Bewertung der Relevanz eines Lean- oder Industrie-4.0-Elements für das Unternehmen. Neben einer priorisierten Einführung nimmt eine höhere Relevanz der Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien Einfluss auf die Implementierungsdauer im Simulationsmodell, die sich durch eine hohe Relevanz verkürzt (siehe Abschnitt 5.3.2). Der Parameter soll von jedem Unternehmen zu Beginn mithilfe der in Abbildung 5-17 gezeigten Skala für jede Lean-Methode und Industrie-4.0-Technologie bestimmt werden.

Modellparameter Relevanz der Methoden/Technologien			
Leitfrage zur Bewertung der Relevanz der Methoden/Technologien:			
<i>Wie bewerten Sie die Relevanz der jeweiligen Lean-Production-Methode bzw. Industrie-4.0-Technologie für den vorgesehenen Anwendungsbereich?</i>			
Ausprägung	Symbole	Stufe	Beschreibung
Nicht relevant		0	Die Methode oder Technologie ist für den Anwendungsbereich nicht relevant.
Eher relevant		1	Die Methode oder Technologie ist für den Anwendungsbereich eher relevant.
Relevant		2	Die Methode oder Technologie ist für den Anwendungsbereich relevant.
Sehr relevant		3	Die Methode oder Technologie ist für den Anwendungsbereich sehr relevant.

Abbildung 5-17: Modellparameter zur Berücksichtigung der Relevanz einer Lean-Production-Methode oder Industrie-4.0-Technologie

Initialwert: Der Initialwert bewertet den zu Beginn vorherrschenden Implementierungsstand eines Lean- oder Industrie-4.0-Elements im ausgewählten Anwendungsbereich des Unternehmens. Dadurch wird die Anpassung der Implementierungsstrategie an die unternehmensspezifische Ausgangssituation ermöglicht. Der Wertebereich des Initialwerts ist in sechs Stufen untergliedert, die sich an den Umsetzungsstufen gemäß LICHTBLAU ET AL. (2015, S. 77 ff.) orientieren (siehe Abbildung 5-18). Der Initialwert soll vor der Ableitung der Lean-4.0-Implementierungsstrategie im entsprechenden Anwendungsbereich vonseiten der projektleitenden Personen in Zusammenarbeit mit den Bereichsverantwortlichen erfasst werden (siehe Abschnitt 5.3.4). Die nachfolgende Abbildung zeigt die Beschreibung der Wertebereiche des Initialwerts sowie die Leitfrage.

Modellparameter Initialwert der Methoden/Technologien			
Leitfrage zur Bewertung des Initialwerts der Methoden/Technologien:			
<i>Welchen Initialwert weist die Lean-Production-Methode oder Industrie-4.0-Technologie im jeweiligen Anwendungsbereich in der Produktion auf?</i>			
Ausprägung	Symbole	Stufe	Beschreibung
Außenstehend		0	Es existieren keine Erfahrungen bzgl. dieser Methode/Technologie, weder im vorgesehenen Anwendungsbereich noch im Unternehmen.
Beginn		1	Es existieren bereits erste Erfahrungen mit der Anwendung dieser Methode/Technologie im Anwendungsbereich.
Fortgeschritten		2	Die Methode/Technologie befindet sich momentan in der Einführung im vorgesehenen Anwendungsbereich (finale Rolloutphase).
Erfahren		3	Die Methode/Technologie ist vollständig ausgerollt, die Standards werden eingehalten.
Expertise		4	Die Methode/Technologie ist vollständig ausgerollt, die Standards werden eingehalten und stetig durch die Projektleitung verbessert.
Exzellenz		5	Die Methode/Technologie ist im Anwendungsbereich eingeführt und dient als Benchmark, der von den operativen Mitarbeitenden stetig verbessert wird.

Abbildung 5-18: Modellparameter zur Berücksichtigung des Initialwerts der Lean-Production-Methoden oder Industrie-4.0-Technologien

Die bislang aufgeführten Modellparameter ermöglichen eine unternehmensspezifische Anpassung der Lean-4.0-Implementierungsstrategie. Die nachfolgenden Parameter sind unternehmensübergreifend gültig und entstammen den Ergebnissen dieser Forschungsarbeit. Im Zuge der Anwendung gilt es für die Unternehmen, die Parametereinstellungen zu prüfen und im Ausnahmefall an unternehmensspezifische Gegebenheiten anzupassen.

Implementierungsdauer: Die Implementierungsdauer repräsentiert die für die Einführung der Lean- oder Industrie-4.0-Elemente notwendigen Implementierungszeiten. Entsprechend den Analysen in Abschnitt 5.1.4 lassen sich die Methoden und Technologien in vier Kategorien segmentieren. Diese sind über die minimal sowie maximal zu erwartende Implementierungsdauer in Anlehnung an LIEBRECHT (2020, S. 95) wie folgt gruppiert:

- Kategorie 1: 1 bis 3 Quartale
- Kategorie 2: 4 bis 6 Quartale
- Kategorie 3: 7 bis 12 Quartale
- Kategorie 4: 13 bis 20 Quartale

Unter Berücksichtigung der Systemzusammenhänge zwischen den Modellparametern, die in Abschnitt 5.3.2 erläutert werden, kann die Implementierungsdauer je Lean-Production-Methode und Industrie-4.0-Technologie mit der Software AnyLogic simuliert werden. Für eine Methode oder Technologie bewegt sich die erwartbare Implementierungsdauer dabei innerhalb ihrer minimalen und maximalen Implementierungsdauer, die in Abschnitt 5.1.4 untersucht wurden und in Anhang I in Tabelle 0-8 festgehalten sind.

Technologie-Entwicklungsstufen: Dieser Parameter erfasst den technologischen Reifegrad eines Elements und ist, wie in Abbildung 5-5 (siehe Abschnitt 5.1.3) beschrieben, an das Technology-Readiness-Level-Modell (TRL) gemäß MANKINS (2009, S. 1017 ff.) angelehnt. Die Technologie-Entwicklungsstufen untergliedern sich in die Forschungs- und Entwicklungs- (Stufe 1), die Demonstrator- (Stufe 2), die Markteinführungs- und Pilot- (Stufe 3) sowie die Marktreife-Phase (Stufe 4). Im Zuge von Lösungsbaustein 1 wurden die 20 Lean-Production-Methoden und 26 Industrie-4.0-Technologien bereits analysiert und den entsprechenden Entwicklungsstufen zugeteilt (siehe Abschnitt 5.1.4). Die in Appendix H aufgeführten Entwicklungsstufen je Element sind im Modell zunächst als unternehmensübergreifende Parameter hinterlegt, können bei Bedarf allerdings angepasst werden.

Einfluss der Elemente auf die Zielgrößen: Dieser Parameter beschreibt die Auswirkungen der Lean- und Industrie-4.0-Elemente auf die produktionsrelevanten Zielgrößen Zeit, Kosten, Qualität, Flexibilität sowie ökologische und soziale Nachhaltigkeit (siehe Abbildung 2-6). Die Ergebnisse und die Datengrundlage der Bewertung der Methoden und Technologien sind in Abschnitt 5.1.4 beschrieben und in den Tabellen in Anhang H zusammengefasst. Die verwendete Bewertungsskala (siehe Abbildung 5-6) umfasst sieben Stufen und reicht von einem sehr negativen Einfluss (-3) bis hin zu einem sehr positiven Einfluss (+3), den eine Methode oder Technologie auf eine Zielgröße ausüben kann. Basierend auf dieser Erkenntnis sollen die potenziellen Auswirkungen einer strukturierten Lean-4.0-Implementierung auf die Zielgrößen im Anwendungsbereich simuliert werden. Die dafür erforderliche Modellstruktur des System-Dynamics-Modells wird in Abschnitt 5.3.2 erarbeitet.

Interdependenzen: Wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, kann sowohl bei den Industrie-4.0-Technologien als auch den Lean-Methoden zwischen voraussetzenden und unterstützenden Interdependenzen unterschieden werden. Zudem wird die Intensität untersucht, um die Ausprägung der Wirkbeziehung zu quantifizieren. Im Zuge der Simulation kann bei einer voraussetzenden Wirkverknüpfung eine Methode oder Technologie erst dann

implementiert werden, wenn alle vorausgesetzten Elemente einen definierten Schwellwert erreicht haben. Ist diese Bedingung erfüllt, so erhält der in der Simulation vorgesehene Voraussetzungsfaktor den Wert ‚1‘ ansonsten behält er seinen Ausgangswert ‚0‘ bei. Die Einführung eines Elements wird entsprechend den Ausführungen in Unterkapitel 5.2 neben den voraussetzenden Wirkbeziehungen auch durch bereits implementierte unterstützende Technologien und Methoden beeinflusst. Die unterstützenden Interdependenzen wirken sich im Simulationsmodell auf die Implementierungsdauer aus und werden durch einen Unterstützungsfaktor (UF) beschrieben. Der Wertebereich des Unterstützungsfaktors liegt zwischen 0 und 1 und wird in Anlehnung an LIEBRECHT (2020, S. 98) und WÖLFL (2021, S. 81) mit nachstehender Formel berechnet:

$$\text{Unterstützungsfaktor} = \frac{\text{Summe}(\text{Intensität} * \text{Implementierungsstand})}{3 * \text{Gesamtanzahl der unterstützenden Methoden}} \quad (5-1)$$

Die in dieser Arbeit generierte Datengrundlage für das Simulationsmodell ist in Form von Interdependenzmatrizen in Abschnitt 5.2 beschrieben. Dabei sind die voraussetzenden und unterstützenden Wirkbeziehungen sowie deren Intensität in Tabelle 5-4, Tabelle 5-6, Tabelle 5-9 sowie Tabelle 5-10 hinterlegt.

Schwellwerte für die Einführung einer Methode/Technologie: Der Schwellwert für die Einführung von Lean- und Industrie-4.0-Elementen legt die Untergrenze des zu erreichenden Implementierungsstandes fest, ab dem die Voraussetzung für den Implementierungsstart erfüllt ist. Der Schwellwert repräsentiert damit den Implementierungsfortschritt, ab dem ein anderes, davon abhängiges Element eingeführt werden kann. Beispielsweise kann mit der Implementierung des visuellen Managements erst begonnen werden, wenn die in Tabelle 5-4 als Voraussetzung definierte Methode 5S ihren Schwellwert erreicht hat. Den Analysen von AULL (2012, S. 169) folgend, liegt der Schwellwert in der industriellen Praxis bei etwa 20 %. Nach Rücksprache mit Fachleuten aus der Industrie wird dieser Schwellwert für das Simulationsmodell auch für die Lean- und Industrie-4.0-Elemente angenommen.

Dynamischer Implementierungsverlauf: AULL (2012, S. 160) und LIEBRECHT (2020, S. 103) weisen darauf hin, dass die Implementierung der Lean- und Industrie-4.0-Elemente in der Realität nicht linear verläuft. Diese Annahme wird durch die Analysen von NETLAND UND FERDOWS (2016) bestätigt, die im Zuge einer Studie mit 32 Fabriken festgestellt haben, dass der Implementierungsverlauf von Lean Production in einem Unternehmen einer S-Kurve folgt. Dieser Verlauf soll im angestrebten System-Dynamics-Modell abgebildet werden. Zudem sollen die in diesem Abschnitt identifizierten und beschriebenen Modellparameter Einfluss auf den Implementierungsverlauf nehmen. Die erforderliche Modellstruktur, die es ermöglicht, die Wirkzusammenhänge zwischen den vorgestellten Modellparametern abzubilden, wird in nachfolgendem Abschnitt erarbeitet.

5.3.2 Wirkbeziehungen und Modellstrukturen

Dieser Abschnitt beschreibt die Wirkbeziehungen und Modellstrukturen der in Abschnitt 5.3.1 identifizierten Modellparameter sowie der in den Lösungsbausteinen 1 und 2 erarbeiteten Datengrundlage. Dies erfordert zunächst die Ableitung mathematischer Wirkbeziehungen zur Generierung der Implementierungsreihenfolge (Schritt 1). Zudem gilt es, die Einflüsse auf die produktionsrelevanten Zielgrößen zu bestimmen (Schritt 2), um anschließend die Teilmodelle abzuleiten (Schritt 3). Somit wird die Grundlage geschaffen, um in Abschnitt 5.3.3 mithilfe der Software AnyLogic ein Simulationsmodell zu erstellen, das auf die Generierung von Lean-4.0-Implementierungsstrategien abzielt.

Schritt 1 – Wirkbeziehungen zur Bestimmung der Implementierungsreihenfolge: Zu Beginn werden die Wirkzusammenhänge zwischen den Modellparametern aufgezeigt und mit mathematischen Gleichungen beschrieben. Dies bildet die Basis für die Ableitung der Implementierungsreihenfolge, die die interdependenzbasierte Implementierungsabfolge, die zeitliche Implementierungsdauer sowie die Auswirkungen auf die produktionsrelevanten Zielgrößen enthält. Die interdependenzbasierte Implementierungsabfolge wird in Abhängigkeit von den vorherrschenden Wirkbeziehungen zwischen den Lean- und Industrie-4.0-Elementen sowie von der maximalen Anzahl an gleichzeitig durchführbaren Verbesserungsprojekten in einem Anwendungsbereich bestimmt. Eine wesentliche Restriktion des Simulationsmodells besteht darin, dass ein Element erst eingeführt werden kann, wenn alle dafür vorausgesetzten Elemente einen definierten Schwellwert überschreiten. Ergänzend darf die vom Unternehmen festgelegte Anzahl der gleichzeitig einfühbaren Verbesserungsprojekte nicht übertroffen werden. Eine Überschreitung der Obergrenze hat zur Folge, dass mit der Einführung weiterer Projekte gewartet wird, bis die entsprechenden Kapazitäten im Unternehmen verfügbar sind. Dabei erfolgt die Priorisierung anhand der zu Beginn von den Benutzenden definierten Relevanz der Methoden und Technologien.

Zudem wurde für jedes Lean- und Industrie-4.0-Element in Abschnitt 5.1.4 eine minimale und maximale Implementierungsdauer festgelegt. Die anwendungsfallsspezifische Implementierungsdauer je Element bewegt sich zwischen der minimalen und der maximalen Implementierungsdauer und ist von verschiedenen Modellparametern abhängig. Dabei wird zunächst die maximal mögliche Implementierungsdauer je Element angenommen, die durch die Modellparameter bis zur minimalen Implementierungsdauer verkürzt werden kann. Hierzu wird ein Verkürzungsfaktor errechnet, der sich aus verschiedenen Parametern wie dem Unterstützungsfaktor (UF) zusammensetzt. Der Unterstützungsfaktor berücksichtigt, dass sich bereits eingeführte Elemente mit einer unterstützenden Wirkung entsprechend ihrer Intensität positiv auf den Implementierungsverlauf eines anderen Elements auswirken. Dieser Faktor wird dabei mit der in Abschnitt 5.3.1 vorgestellten Formel 5-1

bestimmt. Zudem nehmen die Relevanz (R) eines Elements für das Unternehmen, die Technologie-Entwicklungsstufe (TES), die Veränderungsbereitschaft des Unternehmens (VDU), die Kompetenz der operativ mitarbeitenden Personen (KOM) und die Kompetenz der projektleitenden Personen (KPL) Einfluss auf die Implementierungsdauer.

Um den Einfluss der Parameter auf die Implementierungsdauer in Relation zu setzen, wurde ein paarweiser Vergleich mit acht Fachleuten durchgeführt. Die Ergebnisse des Vergleichs sind in Abbildung 5-19 dargestellt. Entsprechend der Leserichtung werden jeweils die Parameter in der Zeile den Spaltenelementen gegenübergestellt und mithilfe einer Skala bewertet (siehe Abbildung 5-19). Die vorgenommene initiale Gewichtung der Parameter kann im Zuge der Anwendung durch die Benutzenden angepasst werden.

Parameter	TES	KPL	KOM	VDU	R	UF	Summe	Rang	Faktor
Technologie-Entwicklungsstufe (TES)		-1	0	-2	-1	-2	-6	6	4,8 %
Kompetenz der projektleitenden Personen (KPL)	1		0	-1	-1	-1	-2	4	14,3 %
Kompetenz der operativ mitarbeitenden Personen (KOM)	0	0		-1	-1	-1	-3	5	9,5 %
Veränderungsbereitschaft des Unternehmens (VDU)	2	1	1		1	1	6	1	28,6 %
Relevanz des Elements für das Unternehmen (R)	1	1	1	-1		0	2	3	19 %
Unterstützungsfaktor (UF)	2	1	1	-1	0		3	2	23,8 %

Legende:

- 2: Das Zeilenelement besitzt einen deutlich geringeren Einfluss auf die Implementierungsdauer als das Spaltenelement.
- 1: Das Zeilenelement besitzt einen geringeren Einfluss auf die Implementierungsdauer als das Spaltenelement.
- 0: Das Zeilen- und Spaltenelement besitzen den gleichen Einfluss auf die Implementierungsdauer.
- +1: Das Zeilenelement besitzt einen höheren Einfluss auf die Implementierungsdauer als das Spaltenelement.
- +2: Das Zeilenelement besitzt einen deutlich höheren Einfluss auf die Implementierungsdauer als das Spaltenelement.

Abbildung 5-19: Paarweiser Vergleich und Gewichtung der Parameter

Den Ergebnissen des Vergleichs folgend, besitzen die Veränderungsbereitschaft des Unternehmens (Rang 1) sowie der Unterstützungsfaktor (Rang 2) den größten Einfluss auf die Implementierungsdauer eines Elements. In absteigender Sortierung folgen die Relevanz für das Unternehmen, die Kompetenz der projektleitenden sowie operativ mitarbeitenden Personen und die Technologie-Entwicklungsstufe. Entsprechend der Rangordnung werden die Parameter mit einem Gewichtungsfaktor belegt und zur Berechnung des Verkürzungsfaktors (VF) in Formel 5-2 mithilfe ihrer maximal möglichen Merkmalsausprägung normiert. Der Unterstützungsfaktor (UF) fließt dabei direkt in die Formel ein, da er bereits als normiertes Ergebnis aus der Formel 5-1 vorliegt.

$$VF = \left(28,6 \% * \frac{VDU}{3} + 23,8 \% * UF + 19 \% * \frac{R}{3} + 14,3 \% * \frac{KPL}{3} + 9,5 \% * \frac{KOM}{3} + 4,8 \% * \frac{TES}{4} \right) \quad (5-2)$$

Die Modellparameter in Formel 5-2 können addiert werden, da sie alle eine verkürzende Wirkung auf die Implementierungsdauer eines Elements ausüben. Besitzen die Modellparameter beispielsweise ihre maximal mögliche positive Ausprägung – das heißt, das Element ist marktreif ($TES = 4$), es ist sehr relevant ($R = 3$), das Unternehmen verfügt über eine sehr hohe Veränderungsbereitschaft ($VDU = 3$), alle unterstützenden Elemente sind vollumfänglich implementiert ($UF = 1$) und zudem ist die Kompetenz der projektleitenden ($KPL = 3$) sowie der operativ mitarbeitenden Personen sehr hoch ($KOM = 3$) –, so wird das Element im Simulationsmodell, entsprechend der Formel 5-3, in der minimalen Dauer (T_{min}) vollständig implementiert. Werden die Modellparameter hingegen mit 0 bewertet, so werden die Elemente mit der maximal möglichen Dauer (T_{max}) umgesetzt. Aufgrund des systemdynamischen Modellverhaltens muss die Implementierungszeit iterativ in jeder Simulationsrunde bestimmt werden (siehe Abschnitt 5.3.3). Die mathematische Gleichung zur Berechnung der dynamischen Implementierungszeit (T_{dyn}) ist in Formel 5-3 aufgeführt.

$$T_{dyn} = T_{max} - (T_{max} - T_{min}) * Verkürzungsfaktor \quad (5-3)$$

Der reziproke Wert der dynamischen Implementierungszeit ist die Implementierungsrate, die der Steigerung des Implementierungsfortschritts in Prozent, abhängig von der Zeiteinheit entspricht (LIEBRECHT 2020, S. 102). Diese ist in Formel 5-4 nachfolgend aufgeführt.

$$Implementierungsrate = \frac{1}{T_{dyn}} \quad (5-4)$$

Wie in Abschnitt 5.3.1 beschrieben, merken die Autoren LIEBRECHT (2020, S. 103), AULL (2012, S. 180) sowie NETLAND UND FERDOWS (2016) an, dass der Implementierungsfortschritt der Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien in der Praxis nicht linear verläuft. Der Verlauf entspricht in seiner Charakteristik einer S-Kurve, wobei die Implementierungsgeschwindigkeit durch eintretende Erfahrungs- und Sättigungseffekte verlangsamt wird. Diese Erkenntnisse waren im Simulationsmodell zu berücksichtigen und sie sind in Abbildung 5-20 grafisch veranschaulicht. Die Abbildung zeigt, dass der Implementierungsfortschritt (IF) während der Einführungsphase ($0 \leq IF < 0,1$) eine geringe Steigung mit $m = 0,5$ aufweist. In dieser Phase gilt es beispielsweise, erste Pilotprojekte zu tätigen oder gegebenenfalls die Kompetenzen der operativ mitarbeitenden oder projektleitenden Personen zu schulen. Nachdem die anfänglichen Herausforderungen überwunden sind, erfolgt die Performancephase ($0,1 \leq IF \leq 0,8$) bei der sich die Steigung des Implementierungsfortschritts auf $m = 2$ erhöht. Die Steigung nimmt gegen Ende der Implementierung im Zuge der Sättigungsphase ($0,8 < IF \leq 1$) mit $m = 0,5$ ab, da hier beispielsweise Ressourcen umverteilt werden und der Projektfokus wechselt (AULL 2012, S. 170).

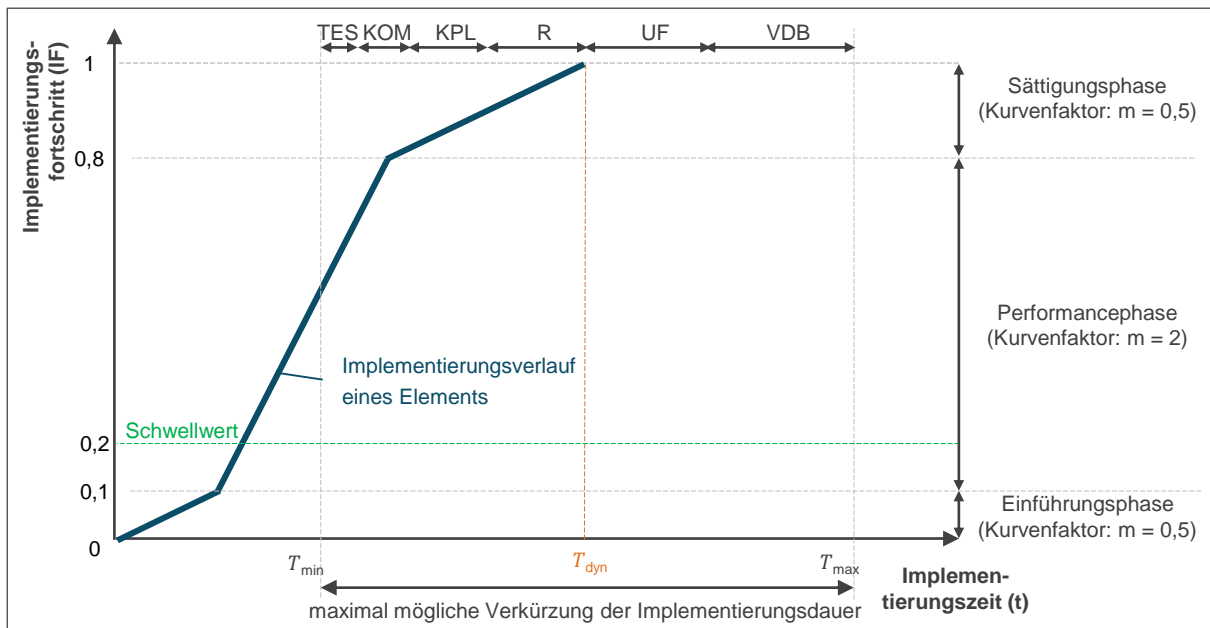


Abbildung 5-20: Zusammenhang zwischen den Modellparametern und der Implementierungskurve in Anlehnung an LIEBRECHT (2020, S. 104)

Schritt 2 – Einfluss auf die produktionsrelevanten Zielgrößen: Die Implementierung der Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien zielt auf eine nachhaltige Verbesserung der produktionsrelevanten Kenngrößen Zeit, Kosten, Qualität, Flexibilität sowie soziale und ökologische Nachhaltigkeit ab. Basierend auf dem in Abschnitt 2.4 geschaffenen wissenschaftstheoretischen Rahmen wurden die Einflüsse der Methoden und Technologien auf die Zielgrößen zunächst in Abschnitt 5.1 untersucht und mithilfe einer Gewichtungsskala von Fachleuten bewertet. Die Ergebnisse der Einflussanalyse sind in Anhang H festgehalten. Dies ermöglicht es, die prozentuale Veränderung der Zielgrößen über den Implementierungsfortschritt der Lean- und Industrie-4.0-Elemente zu bestimmen, wobei ein Gewichtungspunkt gemäß den Erkenntnissen von LIEBRECHT (2020, S. 100) das Äquivalent zu einem Prozentpunkt darstellt.

Die Zielgrößen Qualität, Flexibilität sowie soziale und ökologische Nachhaltigkeit besitzen eine positive Korrelation zum Implementierungsfortschritt der Lean- und Industrie-4.0-Elemente. Ein Fortschritt bei der Implementierung führt bei entsprechend hinterlegter Wirkverknüpfung zu einer Verbesserung der Zielgröße. Dabei dient die nachfolgende mathematische Gleichung in der Formel 5-5 zur Berechnung der Veränderungen für die Zielgrößen Qualität, Flexibilität, soziale und ökologische Nachhaltigkeit (WÖFL 2021, S. 86).

$$\Delta_{\text{soziale Nachhaltigkeit}} = \frac{\sum(\text{Intensität des Elements} * \text{Implementierungsfortschritt})}{\text{soziale Nachhaltigkeit}} \quad (5-5)$$

Dem entgegen wird durch die Einführung der Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien bei den Zielgrößen Zeit und Kosten eine Reduktion des

Ausgangszustands angestrebt. Folglich herrscht eine negative Korrelation zwischen dem Implementierungsfortschritt einer Lean-Production-Methode oder einer Industrie-4.0-Technologie (AULL 2012, S. 165). Zudem wurde in Anlehnung an die Erkenntnisse von AULL (2012, S. 165) in die Formel ein Dämpfungsfaktor durch die Division der maximalen Anzahl an beeinflussbaren Elementen integriert. Dieser dient dazu, die simulierten Auswirkungen der Methoden und Technologien an reale Gegebenheiten anzupassen. In der Formel 5-6 ist die Berechnung der Veränderung der Zielgrößen Zeit und Kosten in Anlehnung an AULL (2012, S. 165) und WÖFL (2021, S. 86) dargestellt.

$$\Delta\text{Kosten} = \frac{(-1) * \text{Kosten} * \sum(\text{Intensität des Elements} * \text{Implementierungsfortschritt})}{\text{Maximale Anzahl an beeinflussbaren Elementen}} \quad (5-6)$$

Schritt 3 – Entwurf der Teilmodelle: Die Wirkbeziehungen zwischen den Parametern zur Bestimmung der Implementierungsdauer und -abfolge sowie der Entwicklung der Zielgrößen gilt es in Teilmodelle zu überführen. Die mithilfe eines Flussdiagramms dargestellten Teilmodelle bilden die Ausgangsbasis, um unter Anwendung der Software AnyLogic eine allgemeingültige oder unternehmensspezifische Implementierungsstrategie und deren Einfluss auf die produktionsrelevanten Zielgrößen zu simulieren.

Es sei angemerkt, dass die Grundstruktur und die Parameter in den Teilmodellen identisch sind, weshalb in diesem Abschnitt je ein Beispiel für ein Teilmodell zum Entwicklungsverlauf der Elemente sowie für die Zielgrößen präsentiert wird. In Abbildung 5-21 ist der strukturelle Modellaufbau für die Simulation des Entwicklungsverlaufs einer Lean-Methode oder Industrie-4.0-Technologie exemplarisch dargestellt.

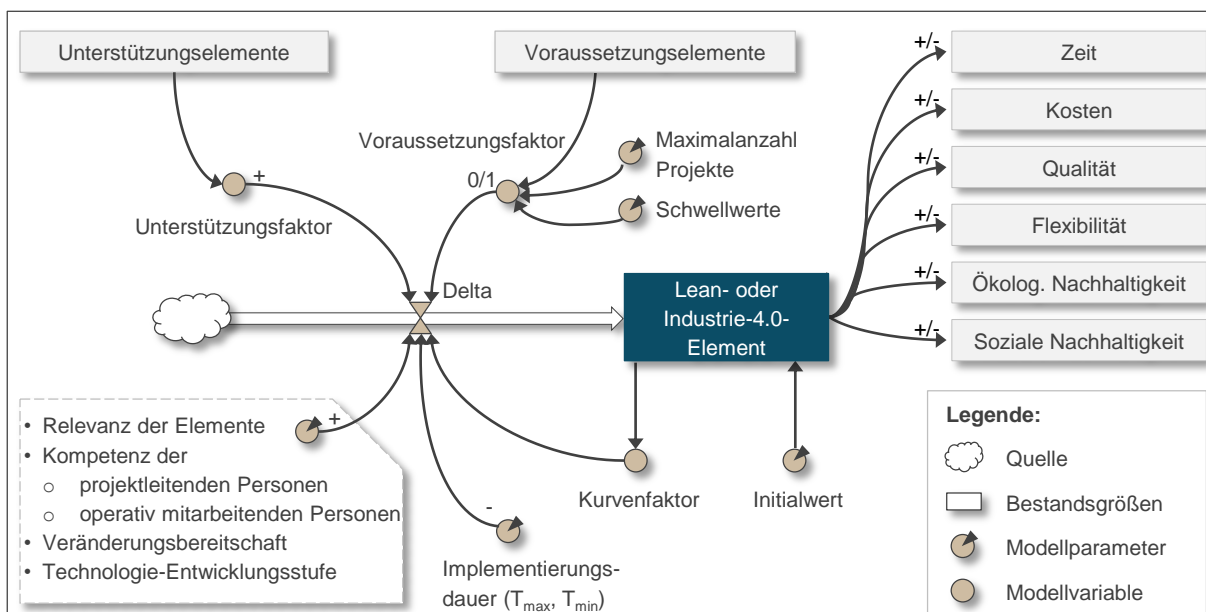


Abbildung 5-21: Exemplarische Struktur eines Teilmodells zur Simulation des Entwicklungsverlaufs einer Lean-Methode oder Industrie-4.0-Technologie

Wie in Abbildung 5-21 aufgeführt ist, werden die Lean- und Industrie-4.0-Elemente als Bestandsgrößen modelliert, die den aktuellen Implementierungsfortschritt wiedergeben. Der Ausgangszustand der Bestandsgröße wird zu Beginn des Strategieentwicklungsprozesses je Methode und Technologie bewertet und fließt als Initialwert in die Simulation ein. Die Implementierungsrate des Elements wird mit der Flussgröße ‚Delta‘ realisiert und durch diverse Modellparameter beeinflusst (WÖLFL 2021, S. 84 ff.). Um mit der Implementierung eines Elements beginnen zu können, müssen die als Voraussetzung deklarierten Elemente bereits bis zum Erreichen eines definierten Schwellwerts implementiert sein (siehe Abschnitt 5.3.1). Zudem darf die maximal mögliche Anzahl an parallel durchführbaren Verbesserungsprojekten nicht überschritten sein. Diese Bedingungen werden im Teilmodell durch den Voraussetzungsfaktor abgebildet, der die Werte 0 (Voraussetzungen für die Einführung des Elements sind nicht erfüllt) und 1 (Voraussetzungen für die Einführung des Elements sind erfüllt) annehmen kann. Sobald die Voraussetzungen für die Implementierung des Elements erfüllt sind und mit der Implementierung begonnen wird, wirken sich unterstützenden Methoden positiv auf den Implementierungsverlauf eines Elements aus und führen zu einer Verkürzung der Implementierungsdauer (siehe Abbildung 5-20). Der Unterstützungsfaktor wird dabei gemäß der vorgestellten Formel 5-1 als Variable berechnet. Neben dem Unterstützungsfaktor nehmen die Modellparameter Relevanz für das Unternehmen, Technologie-Entwicklungsstufe, Kompetenz der projektleitenden und operativ mitarbeitenden Personen sowie die Veränderungsbereitschaft des Unternehmens Einfluss auf die Implementierung. Der resultierende und in den Bestandsgrößen hinterlegte Implementierungsfortschritt wirkt sich wiederum auf die produktionsrelevanten Zielgrößen aus. Der Aufbau der Teilmodellstruktur zur Simulation der Veränderungen der Zielgrößen ist für alle sechs Zielgrößen identisch und wird in Abbildung 5-22 dargestellt.

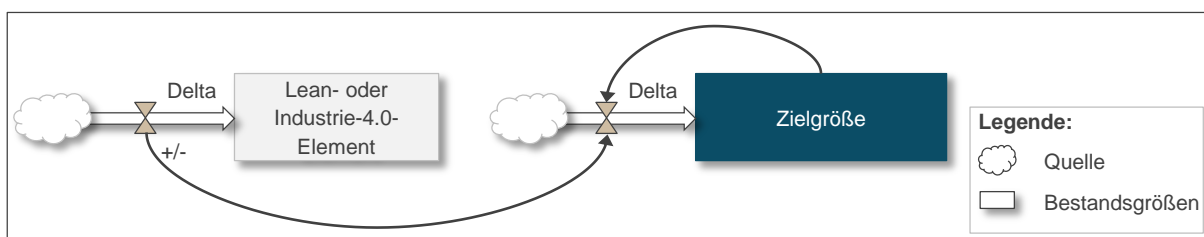


Abbildung 5-22: Beispiel eines Teilmodells zur Simulation des Verlaufs der Zielgrößen

Auf die Zielgröße nehmen alle Elemente Einfluss, die eine Wirkverknüpfung mit den Zielen aufweisen. Die Intensität der Wirkbeziehung wird dabei durch die Formeln 5-5 und 5-6 im Simulationsmodell berücksichtigt. Der Einfluss des Implementierungsfortschritts eines Elements nimmt mit Verbesserung der Zielgröße ab. Dieser Rückkopplungseffekt wird durch die Verbindung zwischen dem Delta der Zielgröße und der Zielgröße simuliert und besitzt einen dämpfenden Effekt (WÖLFL 2021, S. 85 f.).

5.3.3 Simulationsablauf und Simulationsergebnisse

Nachdem im vorherigen Abschnitt die Modellparameter und deren Wirkbeziehungen sowie die Teilmodellstrukturen identifiziert und abgeleitet wurden, erfolgt in diesem Abschnitt die Darstellung des Simulationsablaufs und der angestrebten Simulationsergebnisse. Der Simulationsablauf ist in Abbildung 5-23 visualisiert und wird nachstehend beschrieben.

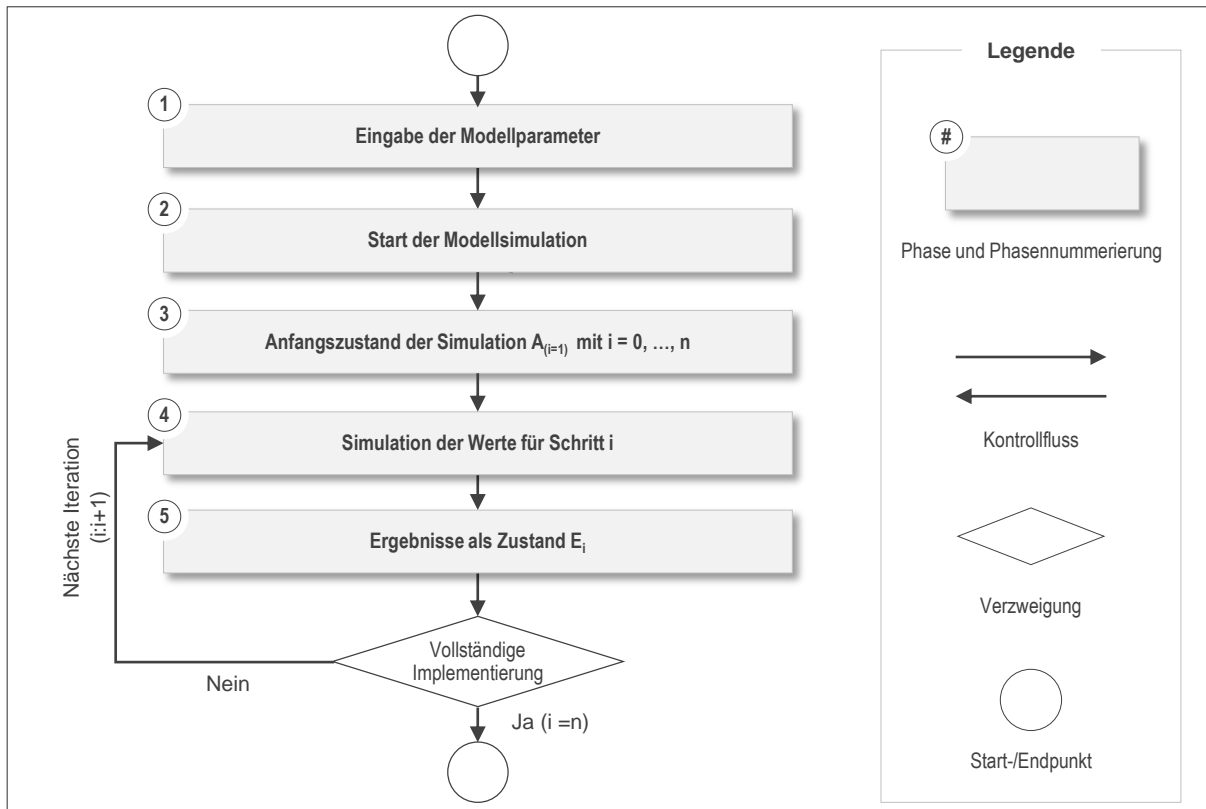


Abbildung 5-23 Simulationsablauf des Modells in Anlehnung an WÖLFL (2021, S. 87)

In der Simulation werden in einem ersten Schritt die relevanten Modellparameter über eine definierte Schnittstelle in das Simulationsmodell übertragen. Die Zeitschrittweite der Simulation wird dabei auf einen Tag festgelegt. Dem zeitdiskreten Simulationsmodell liegt ein kontinuierliches, dynamisches System zugrunde, bei dem die eingegebenen Initialwerte den Anfangszustand ($A_{i=1}$) charakterisieren. Ausgehend von diesem Anfangszustand erfolgt der erste Simulationsschritt auf Basis der in Abschnitt 5.3.2 erarbeiteten mathematischen Wirkbeziehungen. Da in dieser Arbeit eine zeitdiskrete Simulation verwendet wird, müssen alle Werte der im Modell verwendeten Methoden, Technologien und Zielgrößen für jeden Schritt erneut simuliert werden. Die in einem Simulationsschritt bestimmten Werte stellen dann die Ausgangssituation für den darauffolgenden Simulationsschritt dar (WÖLFL 2021, S. 87). Das Simulationende ist erreicht, sobald alle vom Unternehmen ausgewählten Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien vollständig implementiert sind oder ein vordefiniertes zeitliches Projektende erreicht ist. Dabei generiert das

Simulationsmodell für die einzuführenden Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien einen Implementierungsfortschritts-Graphen, ein Gantt-Chart sowie einen Entwicklungsgraphen für die Zielgrößen.

Die Simulationsergebnisse werden nachfolgend beispielhaft vorgestellt und erläutert. Zur exemplarischen Darstellung des Implementierungsfortschritts-Graphen wird die interdependenzbasierte Implementierung von drei Lean-Production-Methoden sowie vier Industrie-4.0-Technologien mithilfe des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten System-Dynamics-Simulationsmodells simuliert. Dabei sollen die Lean-Production-Methoden 5S, Standardisierung und Jidoka sowie die Industrie-4.0-Technologien Datenschutz, mobile Elektronik, Sensoren und Aktoren sowie intelligente Objekte exemplarisch eingeführt werden. In der nachstehenden Abbildung 5-24 ist der Implementierungsfortschritts-Graph in Abhängigkeit von der Zeit abgebildet.

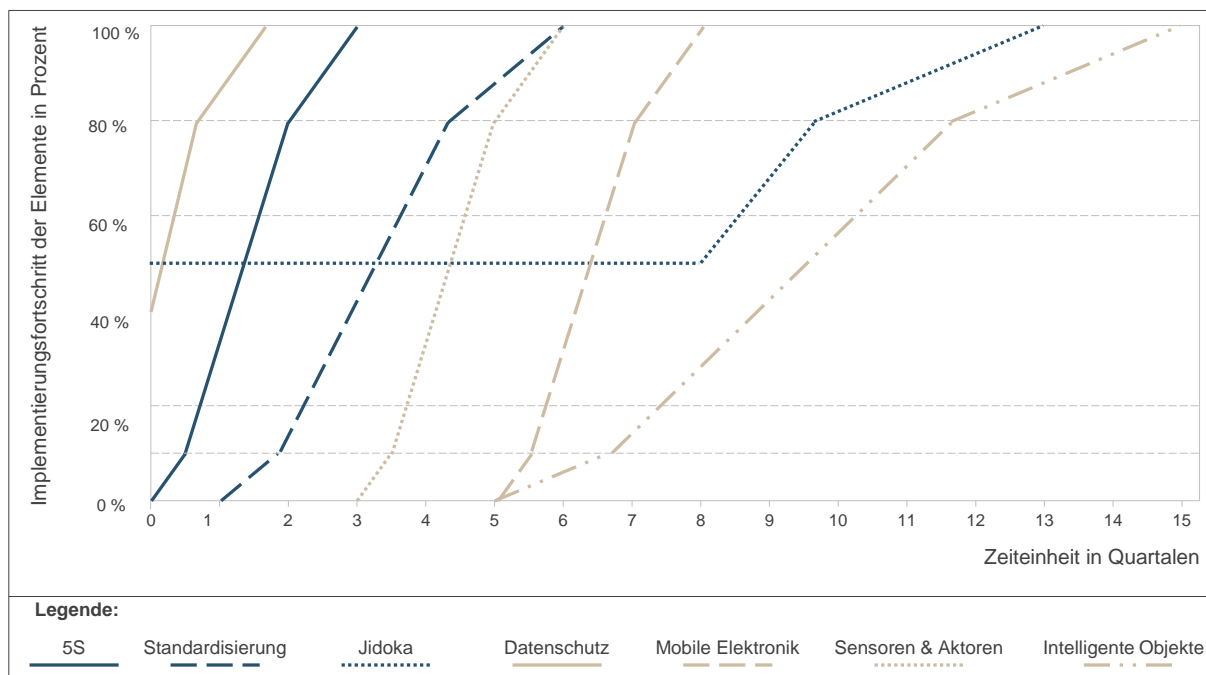


Abbildung 5-24: Beispielhafter Implementierungsfortschritts-Graph aus System-Dynamics-Modell

In Abbildung 5-24 ist auf der Ordinate der Implementierungsfortschritt in Prozent angegeben, während die Implementierungszeit auf der Abszisse in Quartalen hinterlegt ist. Im vorliegenden Beispiel kann das Unternehmen maximal zwei Verbesserungsprojekte zeitgleich durchführen. Die interdependenzbasierte Implementierungsabfolge leitet sich aus den voraussetzenden Wirkbeziehungen zwischen den Methoden und Technologien ab, wogegen die Implementierungsdauer durch die Modellparameter sowie die minimale und maximale Implementierungszeit je Element definiert wird. Die Industrie-4.0-Technologie Datenschutz bildet das erste Element, das aufgrund seiner voraussetzenden Interdependenzen eingeführt werden sollte. In diesem Beispiel hat das Unternehmen bereits mit der

Einführung von Datenschutzanwendungen begonnen, weshalb der Ausgangszustand des Unternehmens auf 40 % festgelegt wird. Zeitgleich wird die Lean-Production-Methode 5S eingeführt, die gemäß der Lean-Production-Interdependenzmatrix (siehe Tabelle 5-4) die Grundlage für die Einführung der Lean-Methode Standardisierung darstellt. Folglich wird mit der Implementierung der Standardisierungsmethode erst begonnen, wenn der Schwellwert der 5S-Methode (IF = 20 %) erreicht ist. Mit Einhaltung der voraussetzenden Wirkbeziehung und unter Berücksichtigung des Initialwerts von Jidoka (IF = 50 %) sowie der Restriktion, nur jeweils zwei Verbesserungsprojekte parallel einzuführen, ergibt sich eine gesamte Implementierungsdauer von 15 Quartalen.

Neben dem Implementierungsfortschritts-Graphen lässt sich aus dem Simulationsmodell ebenfalls ein Gantt-Chart ableiten. Dieses beinhaltet im Vergleich zum Implementierungsfortschritts-Graphen (siehe Abbildung 5-24) keine weiteren Informationen. Allerdings dient es dem nutzenden Unternehmen als übersichtliche Darstellungsform des zeitlichen Implementierungsverlaufs. In nachfolgender Abbildung 5-25 ist der simulationsbasierte Verlauf der ausgewählten Methoden und Technologien in Form eines Gantt-Charts abgebildet.

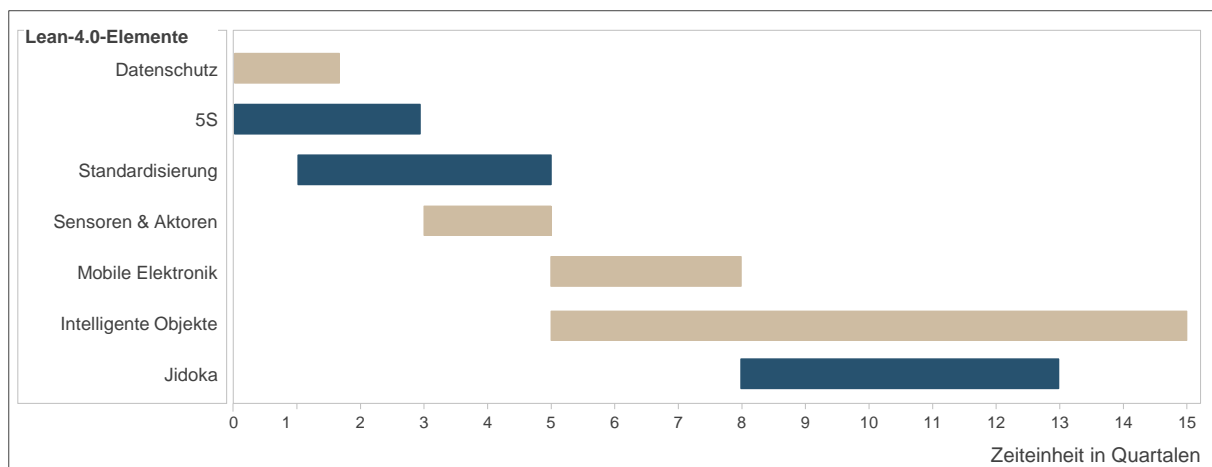


Abbildung 5-25: Gantt-Chart für einen beispielhaften Implementierungsverlauf von Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien in Abhängigkeit von der Zeit

Zusätzlich zur Darstellung des Implementierungsverlaufs wird der Einfluss auf die produktionsrelevanten Zielgrößen Zeit, Kosten, Qualität, Flexibilität sowie soziale und ökologische Nachhaltigkeit simuliert. Gemäß den hinterlegten mathematischen Wirkbeziehungen (siehe Formeln 5-5 und 5-6) und Modellstrukturen (siehe Abschnitt 5.3.2) wird der Kurvenverlauf der Zielgrößenentwicklung durch die systematische Einführung der Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien beeinflusst.

Im nachfolgenden Zielgrößen-Graphen (siehe Abbildung 5-26) repräsentiert die Ordinate den Entwicklungsfortschritt der Zielgröße in Prozent, wogegen die Abszisse den zeitlichen

Verlauf der Zielgrößen über die Jahre angibt. Hierbei zeigt sich, dass entsprechend dem gewählten Beispiel von einer positiven Entwicklung der Zielgrößen auszugehen ist. Die größte Verbesserung ist bei der Zielgröße Qualität von 100 % auf etwa 280 % zu erwarten. Aber auch die weiteren Zielgrößen Flexibilität sowie ökologische und soziale Nachhaltigkeit können signifikant gesteigert werden. Bei den Kosten und der Zeit ist gemäß den Simulationsergebnissen von einem Rückgang auszugehen (siehe Abbildung 5-26).

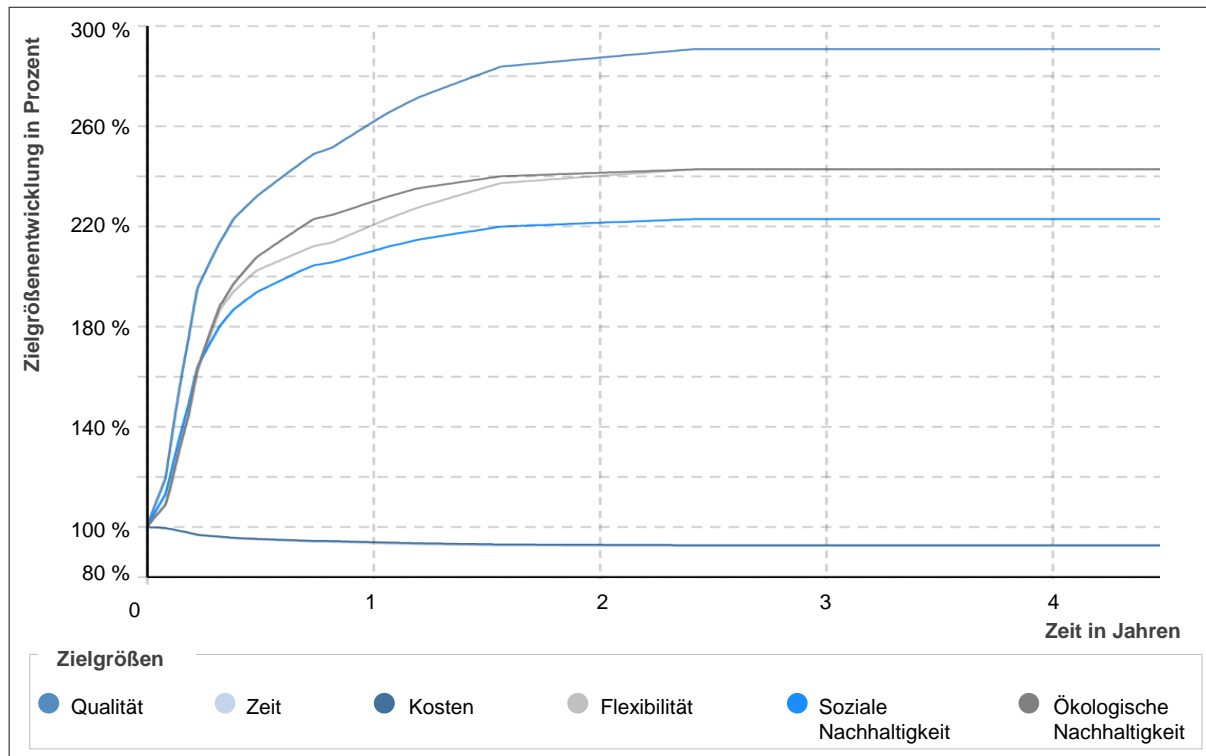


Abbildung 5-26: Beispielhafte Entwicklung der Zielgrößen, basierend auf der systematischen Einführung der Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien gemäß Abbildung 5-24

5.3.4 Anwendungsmethode des Lean-4.0-Simulationsmodells

Nachdem in den vorherigen Abschnitten die forschungsseitige Entwicklung des systemdynamischen Simulationsmodells zur Ableitung von Lean-4.0-Implementierungsstrategien beschrieben wurde, wird in diesem Abschnitt eine Vorgehensweise erarbeitet, die es den Benutzenden ermöglicht, das Simulationsmodell anzuwenden. Die Methode ist dabei in drei Phasen untergliedert, beginnend mit der Vorbereitung, gefolgt von der Bewertung und Auswahl sowie der Simulation, die mit der Präsentation der Lean-4.0-Implementierungsstrategie abgeschlossen wird. Abbildung 5-27 zeigt die Phasen mit den dazugehörigen Arbeitsschritten. Letztere sind jeweils mit den notwendigen Eingangsgrößen, den Hauptaktionen, angestrebten Ergebnissen, bereitgestellten Hilfsmitteln sowie den beteiligten Projektteams charakterisiert. Die in Abbildung 5-27 beschriebene Anwendungsmethode sieht ein Kooperationsprojekt zwischen dem *iwb* und einem Anwendungsunternehmen vor, wie

es im Zuge der Validierung (siehe Abschnitt 6.2) durchgeführt wurde. Durch die in den Lösungsbausteinen 1 bis 3 erarbeiteten Ergebnissen ist es einem produzierenden Unternehmen allerdings auch möglich, die simulationsbasierte Entwicklung der Lean-4.0-Implementierungsstrategie ohne die Kooperation mit dem *iwb* durchzuführen. In diesem Fall sollte im produzierenden Unternehmen eine umfassende Fachexpertise in den Bereichen Lean Production, Industrie 4.0, Lean 4.0, Change Management und systemdynamische Simulationsmodelle vorliegen.




 Phase 1 Vorbereitung						
Nr.	Schritte	Eingangsgrößen	Hauptaktionen	Ergebnisse	Hilfsmittel	Wer
1.1	Kick-off-Termin		<ul style="list-style-type: none"> Definition des Projektrahmens Abstimmung der Vorgehensweise 	<ul style="list-style-type: none"> Organisatorischer Projektrahmen 	Checkliste 1 (H-1)	<ul style="list-style-type: none"> Unternehmen <i>iwb</i>
1.2	Typisierungs-Workshop	<ul style="list-style-type: none"> Informationen zum Unternehmen und zur Produktion 	<ul style="list-style-type: none"> Typisierung des Produktionsbereichs Festlegung des Zielbilds anhand produktionsrelevanter Zielgrößen 	<ul style="list-style-type: none"> Produktionsbereich Zielgrößenbewertung 	Typisierung (H-2)	<ul style="list-style-type: none"> Unternehmen <i>iwb</i>
 Phase 2 Bewertung und Auswahl						
2.1	Bewertungs- und Auswahl-Workshop	<ul style="list-style-type: none"> Vorherrschende Produktionsprozesse 	<ul style="list-style-type: none"> Bewertung der Initialwerte für die: <ul style="list-style-type: none"> Lean-Production-Methoden Industrie-4.0-Technologien 	<ul style="list-style-type: none"> Initialwerte der: <ul style="list-style-type: none"> Lean-Methoden I-4.0-Technologien 	Bewertung (H-3)	<ul style="list-style-type: none"> Unternehmen <i>iwb</i>
2.2		<ul style="list-style-type: none"> Ergebnisse aus Schritt 1.2 und Schritt 2.1 	<ul style="list-style-type: none"> Auswahl der: <ul style="list-style-type: none"> Lean-Production-Methoden Industrie-4.0-Technologien Finalisierung der Modellparameter 	<ul style="list-style-type: none"> Auswahl an Elementen Finalisierung der Modellparameter 	Auswahl (H-3) Steckbriefe	<ul style="list-style-type: none"> Unternehmen <i>iwb</i>
 Phase 3 Simulation						
3.1	Simulation	<ul style="list-style-type: none"> Ergebnisse aus Phase 1 und 2 Interdependenzmatrizen 	<ul style="list-style-type: none"> Eingabe der Modellparameter Ableitung der Lean-4.0-Implementierungsstrategie 	<ul style="list-style-type: none"> Lean-4.0-Implementierungsstrategie Zielgrößen-Graph 	Simulationsmodell	<ul style="list-style-type: none"> <i>iwb</i>
3.2	Abschluss-Workshop	<ul style="list-style-type: none"> Ergebnisse aus bisherigen Schritten 	<ul style="list-style-type: none"> Bewertung und Modifikation der Lean-4.0-Implementierungsstrategie 	<ul style="list-style-type: none"> Unternehmens-individuelle Lean-4.0-Implementierungsstrategie 	Checkliste 2 (H-4)	<ul style="list-style-type: none"> Unternehmen <i>iwb</i>

Abbildung 5-27: Vorgehensmodell zur Ableitung einer Lean-4.0-Implementierungsstrategie

Die Anwendungsmethode beginnt mit der Vorbereitungsphase zur Typisierung des Anwendungsbereichs. Der Kick-off-Termin dient dazu, den organisatorischen Rahmen des Projekts festzulegen. Als Hilfsmittel wird für diesen Schritt eine Checkliste (H-1) bereitgestellt, die in Anhang L dargestellt ist. Im zweiten Arbeitsschritt dieser Phase erfolgt die Typisierung des Anwendungsbereichs. Als Hilfsmittel (H-2) wird ein morphologischer Kasten, der 18 Merkmale mit den jeweiligen Merkmalsausprägungen enthält, bereitgestellt (siehe Anhang M und Anhang N). Die Merkmale sind an den in Abschnitt 5.1.3 entwickelten morphologischen Kasten angelehnt und untergliedern sich in drei Kategorien, bestehend aus der Typisierung des Unternehmens und des Produktionsbereichs sowie der

Bewertung der Zielgrößen. Die ersten beiden Kategorien spezifizieren den Anwendungsbereich und das Umfeld, wogegen die dritte Kategorie die produktionsrelevanten Zielgrößen erfasst und gewichtet. Die Spezifikation des Anwendungsbereichs und die Gewichtung der Zielgrößen unterstützen die Unternehmen bei der Auswahl der Lean- und Industrie-4.0-Elemente.

Die zweite Phase zielt darauf ab, die bereits eingeführten Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien zu bewerten und diese gegebenenfalls durch weitere Elemente zu ergänzen. Als Hilfsmittel dient eine Checkliste (H-3), die ein strukturiertes Vorgehen bei der Bewertung und Auswahl der Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien sicherstellt (siehe Anhänge O bis R). Zudem wird eine Auditierungsmatrix bereitgestellt, die eine sechststufige Bewertungsskala (siehe Anhang P) enthält, um den Ausgangszustand der Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien im ausgewählten Produktionsbereich zu bestimmen. Die Bewertung des Initialwerts sollte dabei in enger Abstimmung mit dem Betriebsrat sowie den verantwortlichen Personen und den operativ mitarbeitenden Personen im jeweiligen Produktionsbereich vor Ort im Zuge eines Workshops erfolgen. Im zweiten Schritt dieser Phase gilt es, die relevanten Methoden und Technologien auszuwählen und deren Relevanz für den Produktionsbereich zu erfassen (siehe Anhang Q). Als Unterstützung für die Auswahl können die in Abschnitt 5.1.4 erarbeiteten Steckbriefen verwendet werden (siehe Abbildung 5-7). Nach der Auswahl der Elemente werden in dieser Phase abschließend weitere relevante Modellparameter, beispielsweise die maximale Anzahl an gleichzeitig einführbaren Verbesserungsprojekten, festgelegt, die in die Simulation miteinfließen (siehe Anhang R).

In Phase 3 wird seitens des *iwb*-Projektteams auf Grundlage der erhobenen Modellparameter und der Interdependenzen (siehe Abschnitt 5.2) eine unternehmensindividuelle Lean-4.0-Implementierungsstrategie abgeleitet. Hierzu dient das in Abschnitt 5.3.3 entwickelte Simulationsmodell. Die unternehmensindividuellen Lean-4.0-Strategie und der Zielgrößen-Graph werden im Rahmen des Abschlussworkshops mithilfe einer Checkliste (H-4) bewertet und präsentiert (siehe Anhang S).

6 Anwendung und Evaluation

Nach der Entwicklung des Simulationsmodells und der Beschreibung der Anwendungsmethode, erfolgen in diesem Kapitel die Validierung sowie die Identifikation von Limitationen und Verbesserungspotenzialen der geschaffenen Lösung im Rahmen der deskriptiven Studie II (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 181 ff.). Dabei werden basierend auf dem in Kapitel 5 erarbeiteten Simulationsmodell eine allgemeingültige und eine unternehmensspezifische Lean-4.0-Implementierungsstrategie abgeleitet. Zudem wird der Entwicklungsverlauf der Zielgrößen Zeit, Kosten, Qualität, Flexibilität sowie ökologische und soziale Nachhaltigkeit in Abhängigkeit von den Implementierungsstrategien dargestellt.

Einem iterativen Forschungsvorgehen folgend, wurden die Ergebnisse aus den Lösungsbausteinen (siehe Kapitel 5) bereits während der Ausarbeitung im Rahmen von wissenschaftlichen Fachkonferenzen oder Projekten mit Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen evaluiert. Zum Nachweis der Gesamtfunktionalität des entwickelten Lösungsansatzes wurde ein prototypischer Demonstrator entwickelt, der im Rahmen von vier Anwendungsfällen bei produzierenden Unternehmen aus unterschiedlichen Industriesegmente validiert wurde (siehe Abschnitt 6.2). Der Demonstrator besteht aus Excel-Applikationen und einem Simulationsmodell, das mit der System-Dynamics-Software AnyLogic erarbeitet wurde. Die Ergebnisse werden abschließend aufbereitet. Die prototypische Umsetzung deckt somit alle Phasen der Anwendungsmethode (siehe Abbildung 5-23) ab und ist in Abbildung 6-1 dargestellt.

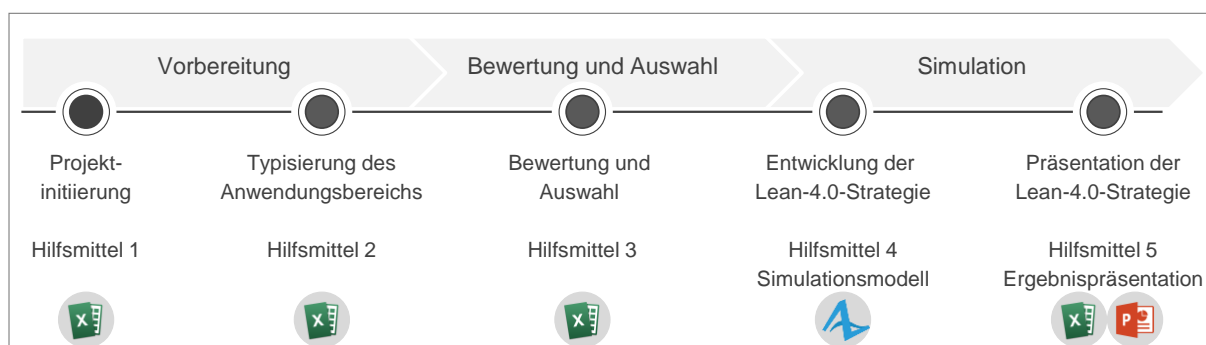


Abbildung 6-1: Übersicht der Applikationen im Zuge der prototypischen Umsetzung

Neben der industriellen Erprobung und Validierung wurde zunächst eine Referenzimplementierungsstrategie für die strukturierte und zielgerichtete Einführung von Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien entwickelt (Abschnitt 6.1) und deren Einfluss auf die

Zielgrößen simuliert. Die Referenzstrategie soll produzierenden Unternehmen als Orientierung dienen, um ihre bestehende Implementierungsstrategie zu überprüfen und gegebenenfalls zu modifizieren. Die Entwicklung der Referenzstrategie sowie die praktische Erprobung und Validierung des prototypischen Demonstrators erfolgten in Anlehnung an die Arbeiten und Erkenntnisse der vom Autor betreuten Studienarbeiten von AMORTH (2020), BERNHARD (2022), DERVIS (2020), DERVIS (2021), FISCHER (2021), FORMANN (2022), RONGE (2021), MEßMER (2022) und WÖFL (2021).

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird zunächst in Abschnitt 6.1 eine Lean-4.0-Referenzstrategie erarbeitet. Anschließend wird in Abschnitt 6.2 die Anwendung des prototypischen Demonstrators in der industriellen Praxis bei vier Unternehmen beschrieben. Die gewonnenen Erkenntnisse werden abschließend evaluiert, wobei geprüft wird, ob und in welcher Ausprägung die erarbeitete Methode die in Abschnitt 4.1 definierten Anforderungen erfüllt. Zudem wurde eine Aufwand-Nutzen-Bewertung durchgeführt und die bestehenden Limitationen werden aufgezeigt.

6.1 Ableitung einer Lean-4.0-Referenzstrategie

Das Ziel dieses Abschnitts ist es, mithilfe des System-Dynamics-Modells eine Referenzstrategie für Lean 4.0 zu generieren sowie deren Einfluss auf produktionsrelevante Zielgrößen aufzuzeigen. Das Vorgehen zur Ableitung der Strategie orientierte sich an der Anwendungsmethode, die in Abschnitt 5.3.4 (siehe Abbildung 5-27) vorgestellt wurde, und untergliederte sich in drei Phasen. Dabei wurde im Zuge der Vorbereitungsphase zunächst die Typisierung des Anwendungsbereichs vorgenommen (siehe Abschnitt 6.1.1), um anschließend die Methoden und Technologien für die Referenzstrategie festzulegen (siehe Abschnitt 6.1.2). Im finalen Schritt galt es, mithilfe des System-Dynamics-Simulationsmodells die Lean-4.0-Referenzstrategie abzuleiten und zu präsentieren (siehe Abschnitt 6.1.3).

6.1.1 Phase 1 | Vorbereitung der Lean-4.0-Referenzstrategie

Da es sich bei der Lean-4.0-Referenzstrategie um eine allgemeingültige Implementierungsstrategie handeln sollte, fokussierte sich die Vorbereitungsphase zur Ableitung der Lean-4.0-Referenzstrategie ausschließlich auf Schritt 1.2 (siehe Abbildung 5-27). Hierzu wurde ein allgemeingültiger Produktionsbereich gewählt, der in diesem Beispiel sowohl eine Montage- als auch eine Fertigungslinie enthält. Die Produktionsart, das Produktionsprinzip, und die Produktionsstrategie wurden nicht weiter spezifiziert. Das Projektteam sollte aus zwei wissenschaftlichen Mitarbeitenden sowie zwei Fachleuten aus der Unternehmensberatung bestehen.

Die Typisierung des Produktionsbereichs erfolgte unter Anwendung von Hilfsmittel 2 (siehe Anhang M und Anhang N). Um eine möglichst allgemeingültige Lean-4.0-Referenzstrategie zu entwickeln, wurden alle sechs Zielgrößen identisch gewichtet. Die gewählten Spezifikationen sind in Abbildung 6-2 subsumiert.



Abbildung 6-2: Spezifizierung des Anwendungsbereichs für die Lean-4.0-Referenzstrategie

6.1.2 Phase 2 | Bewertung und Auswahl für die Lean-4.0-Referenzstrategie

Nachdem in Phase 1 das Projektteam festgelegt sowie der Anwendungsbereich und die Zielgrößen spezifiziert wurden (siehe Abschnitt 6.1.1), erfolgte die in diesem Abschnitt

beschriebene Bewertung und Auswahl der Lean- und Industrie-4.0-Elemente. Zudem wurden entsprechend dem Vorgehen in Abbildung 5-27 weitere notwendige Parameter für das System-Dynamics-Simulationsmodell festgelegt und die Datengrundlage des Modells wurde final geprüft.

Im Zuge der Referenzstrategie sollten alle 20 Lean-Methoden und 26 Industrie-4.0-Technologien implementiert werden. Zu Beginn der Simulation (mit Anfangszustand $A_{i=1}$) war noch keine Methode oder Technologie eingeführt, somit war die Ausgangssituation für alle Elemente identisch. Zudem wurde die Anzahl der gleichzeitig einföhrbaren Verbesserungsprojekte nicht limitiert, wodurch keine Kapazitätsengpässe auftreten und mehrere Elemente zeitgleich eingeföhrt werden können. Als Schwellwert wurde für die Referenzstrategie ein Implementierungsfortschritt von mindestens 20 % festgelegt. Die Simulation besaß zudem eine Zeitschrittweite von einem Tag und endete bei vollständiger Implementierung aller Methoden und Technologien. Zum besseren Verständnis der in Abbildung 6-3 aufgeführten Modellparameter sei auf die erarbeiteten Definitionen der gewählten Merkmale in Abschnitt 5.3.1 verwiesen.

Modellparameter für die Referenzimplementierungsstrategie										
Veränderungsbereitschaft des Unternehmens	0	1	2		3					
Initialwert aller Lean-Production-Methoden	0	1	2	3	4	5				
Initialwert aller Industrie-4.0-Technologien	0	1	2	3	4	5				
Relevanz aller Lean-Production-Methoden	0	1	2		3					
Relevanz aller Industrie-4.0-Technologien	0	1	2		3					
Schwellwert für Lean-Production-Methoden	0 %	20 %	40 %	60 %	80 %	100 %				
Schwellwert für Industrie-4.0-Technologien	0 %	20 %	40 %	60 %	80 %	100 %				
Kompetenz der Projektleitenden	0	1	2		3					
Kompetenz der Mitarbeitenden	0	1	2		3					
Maximalanzahl gleichzeitiger Projekte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	> 9

Legende: : nicht gewählte Ausprägung : gewählte Ausprägung

Abbildung 6-3: Übersicht der Modellparameter für die Ableitung der Referenzstrategien

Ergänzend wurde gemäß der Checkliste in Hilfsmittel 3 (siehe Anhang R) die Datengrundlage für die Referenzstrategie überprüft. Dabei wurden keine Änderungen an den Interdependenzmatrizen oder den weiteren Eingangsgrößen vorgenommen.

6.1.3 Phase 3 | Simulation der Lean-4.0-Referenzstrategie

Das Ziel dieses Abschnitts ist die Entwicklung einer allgemeingültigen Lean-4.0-Implementierungsstrategie, die produzierenden Unternehmen als Referenz dient. Dabei werden die Lean- und Industrie-4.0-Elemente entsprechend ihren Interdependenzen (siehe Abschnitt 5.2) sowie den Modellparametern eingeführt. Zur Ableitung der Referenzstrategie wird zunächst ein Implementierungsfortschritts-Graph entwickelt. Dieser bildet die Grundlage für das Gantt-Chart, die Referenzarchitektur und den Zielgrößenentwicklungsverlauf.

Der im nachfolgenden Diagramm aufgeführte Fortschritts-Graph visualisiert die mittels AnyLogic generierten Simulationsergebnisse für die zeitlich abgestimmte Einführung der Lean- und Industrie-4.0-Elemente. Die Abszisse repräsentiert die Implementierungszeit in Jahren und die Ordinate den Implementierungsfortschritt (siehe Abbildung 6-4).

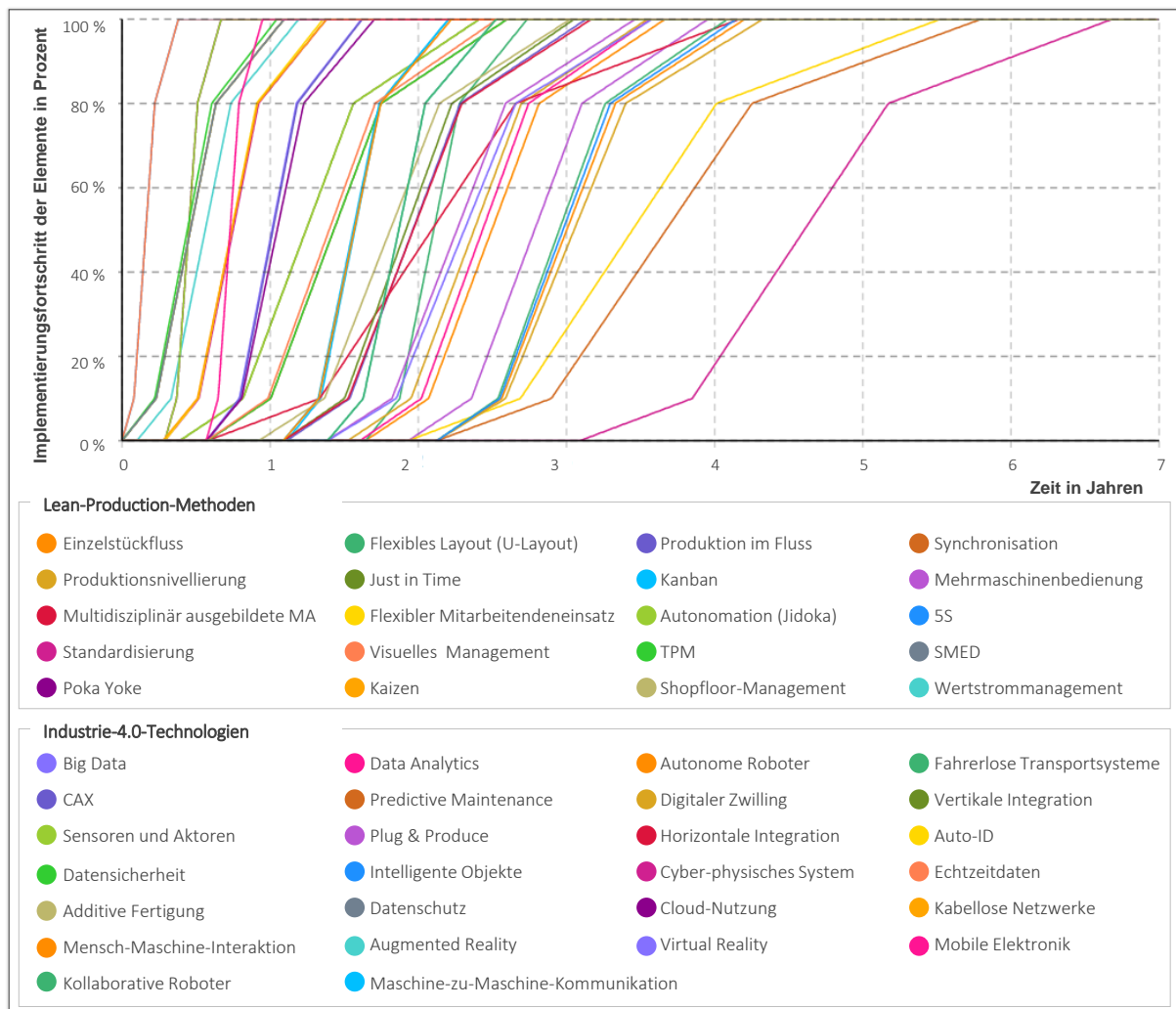


Abbildung 6-4: Implementierungsfortschritts-Graph für die Lean-4.0-Referenzstrategie

Der in Abbildung 6-4 aufgeführte Implementierungsfortschritts-Graph ermöglicht eine detaillierte Analyse des konsekutiven Implementierungsverlaufs der 20 Lean-Production-Methoden und der 26 Industrie-4.0-Technologien. Dabei ist zu sehen, dass alle Methoden und Technologien zu Simulationsbeginn einen Initialwert von Null aufweisen. Zudem ist am Beispiel der Technologie der cyber-physischen Systeme erkennbar, dass eine Methode oder Technologie erst eingeführt und umgesetzt wird, wenn alle Voraussetzungen erfüllt sind. Diese gelten bei einem Element in diesem Beispielszenario als erreicht, wenn alle als Voraussetzung eingestuft Elemente ihren Schwellwert von 20 % überschritten haben. Weitere Voraussetzungen wie die maximale Anzahl an zeitgleich durchführbaren Verbesserungsprojekten sind aufgrund der gewählten Modellparameter nicht zu berücksichtigen. Zudem gleicht der Implementierungsverlauf der Lean- und Industrie-4.0-Elemente einer S-Kurve und durchläuft, wie in Abbildung 5-20 dargestellt, eine Einführungs-, eine Performance- und eine Sättigungsphase. Die unterschiedlichen Steigungen der Implementierungskurven resultieren in diesem Beispiel aus den unterstützenden Wirkbeziehungen zwischen den Elementen. Sind bereits mehrere unterstützende Lean-Production-Methoden oder Industrie-4.0-Technologien vollständig eingeführt, so beeinflusst dies die Implementierungsdauer der davon abhängigen Elemente positiv. Diese Wirkbeziehung sowie die dafür erarbeiteten mathematischen Grundlagen sind in Abschnitt 5.3.2 erläutert.

Wie der Implementierungsfortschritts-Graph zeigt, benötigt ein Referenzunternehmen unter Berücksichtigung der definierten Modellparameter, beispielsweise der unbegrenzten Anzahl an gleichzeitig einführbaren Verbesserungsprojekten, und der hinterlegten Interdependenzen sechseinhalb Jahre für die Implementierung der 20 Lean-Production-Methoden und der 26 Industrie-4.0-Technologien. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass neben der reinen Implementierung der Methoden auch die Entwicklung einer Lean-Kultur im Unternehmen erfolgen muss, der unter anderem ein beständiges Streben nach Verbesserung zugrunde liegt (ROTHER 2010, S. 226).

Ein Nachteil des Implementierungsfortschritts-Graphen ist dessen Unübersichtlichkeit, die aus den Wirkverknüpfungen und der zeitgleichen Implementierung von Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien resultiert und zu einer grafischen Überlagerung der Implementierungsverläufe führt. Um diesem Nachteil entgegenzuwirken, erfolgt die Darstellung des Referenzvorgehens für die Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien zusätzlich in Form eines Gantt-Charts. Dieses enthält im Vergleich zum Fortschritts-Graphen keine weiteren Informationen für die Benutzenden, steigert allerdings die Übersichtlichkeit der Implementierungsstrategie entscheidend.

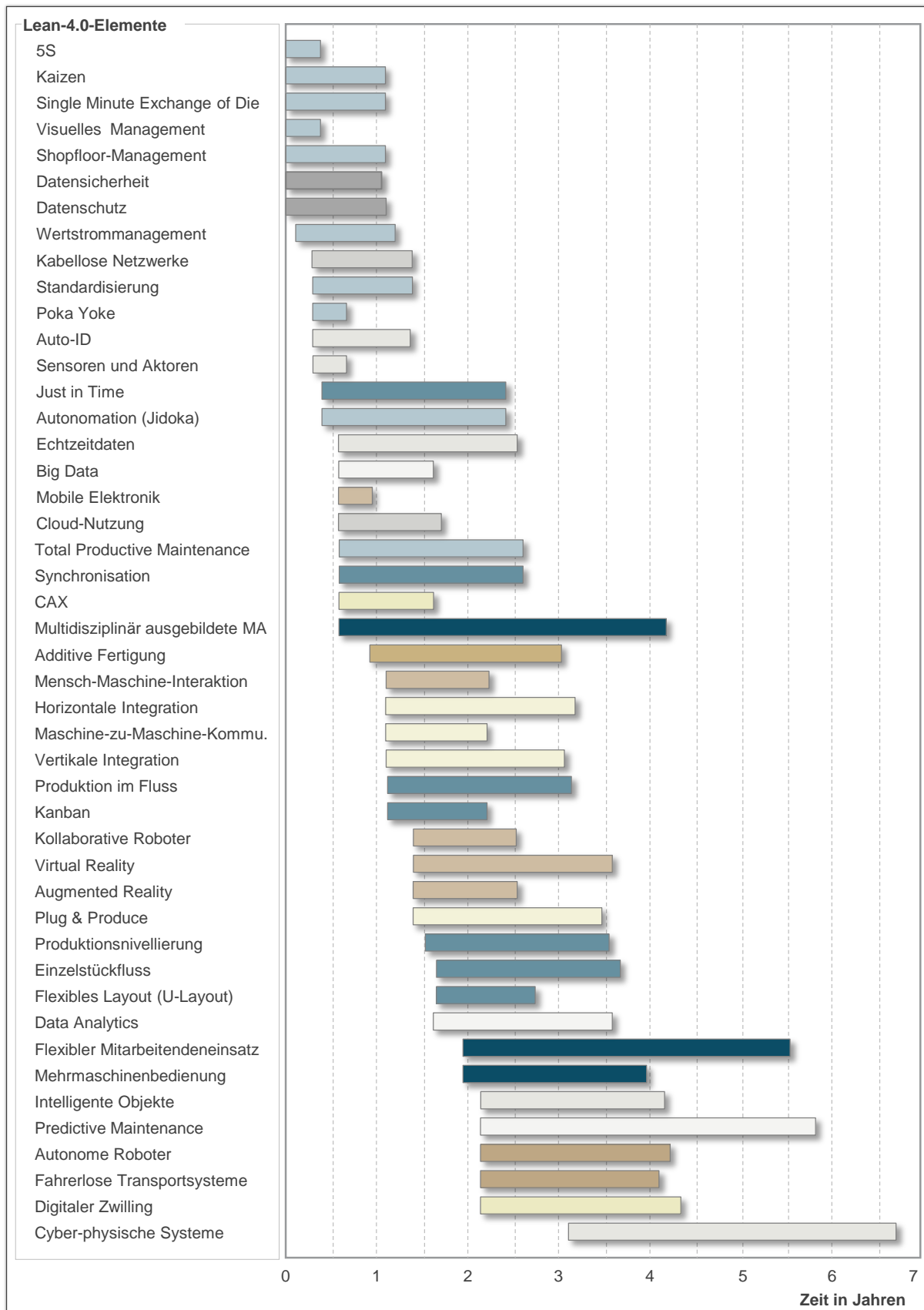


Abbildung 6-5: Gantt-Chart für die Lean-4.0-Referenzstrategie

Das Gantt-Chart in Abbildung 6-5 führt alle 46 Verbesserungsprojekte sortiert nach ihrem Startzeitpunkt über eine Laufzeit von sechseinhalb Jahren auf. Aus ihm sowie dem

Fortschritts-Graphen lassen sich sieben konsequente Implementierungsschritte erkennen und in einer Referenzarchitektur festhalten (siehe Abbildung 6-6). Die Stufen eint, dass die darin enthaltenen Methoden und Technologien einen nahezu identischen Startzeitpunkt besitzen. Auf eine Priorisierung der Elemente innerhalb einer Implementierungsstufe wird im gewählten Beispielszenario verzichtet, da durch die unbegrenzte Anzahl parallel möglicher Verbesserungsprojekte keine Kapazitätsengpässe entstehen.

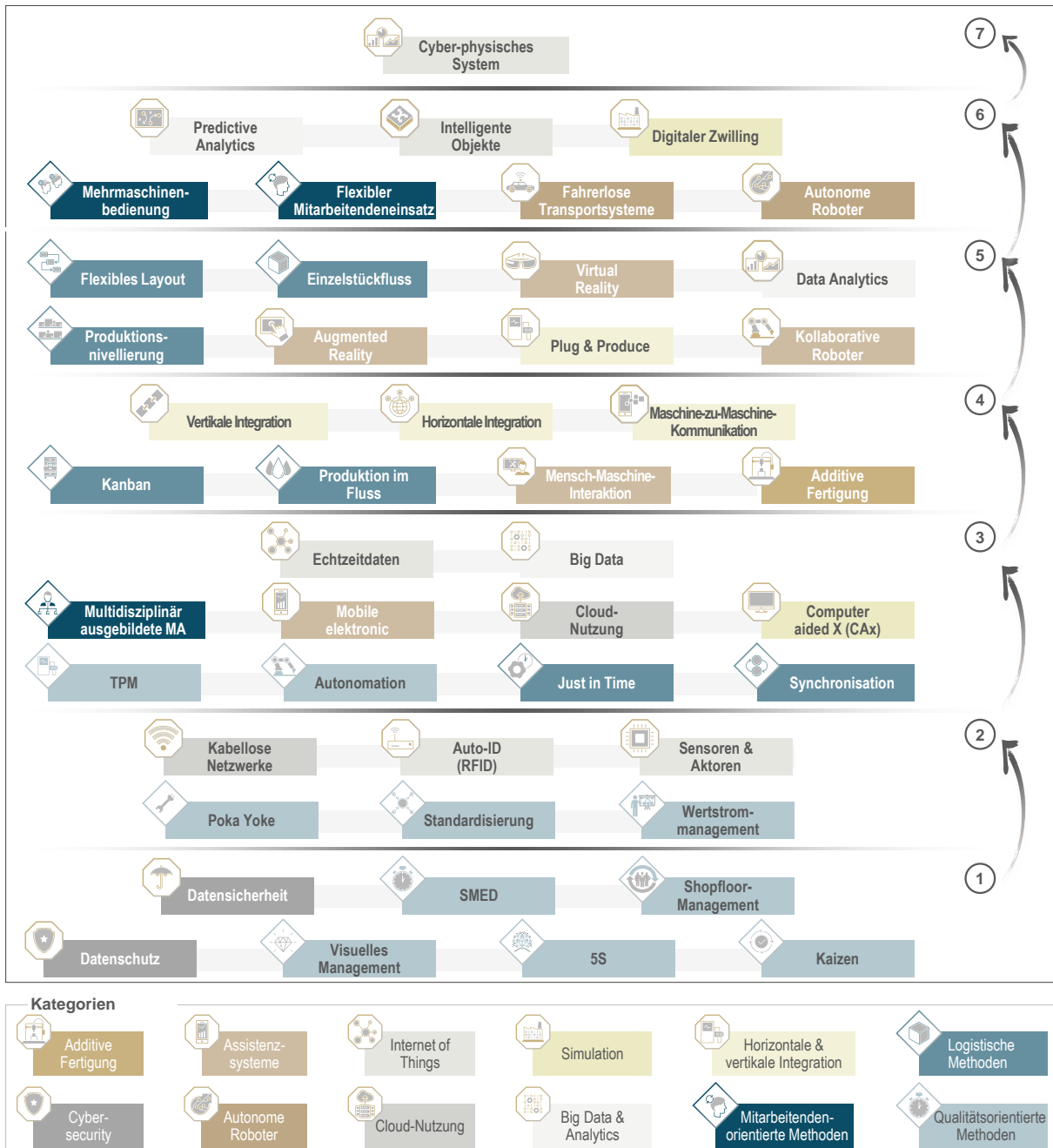


Abbildung 6-6: Siebenstufige Lean-4.0-Referenzarchitektur

Die Lean-4.0-Referenzarchitektur in Abbildung 6-6 zeigt, dass die erste und in Teilen auch die zweite Implementierungsstufe durch die Einführung von qualitätsorientierten Lean-Methoden geprägt ist. Dadurch wird zunächst ein fundiertes Prozessverständnis erzeugt,

bevor mit der umfassenden Einführung digitaler Technologien in den Prozessen begonnen wird. Zudem werden in der ersten Stufe der notwendige Datenschutz und die Datensicherheit geschaffen, die die Basis für die Integration von Sensor- und Aktor-Lösungen, Auto-ID-Technologien (RFID) sowie ein unternehmensweites kabelloses Netzwerk bilden. Die in der zweiten Stufe eingeführten Technologien ebnen die Grundlage, um die für die Industrie-4.0-Implementierung erforderliche Konnektivität sicherzustellen. Mit Blick auf die fortführenden Implementierungsstufen liegt der Fokus im Bereich Lean Production auf der schrittweisen Einführung von logistikorientierten Methoden. Abschließend befinden sich in Stufe 6 mit der Mehrmaschinenbedienung und dem flexiblen Mitarbeitendeneinsatz zwei personenorientierte Lean-Methoden. Die Industrie-4.0-Technologien erfahren ab Stufe 3 eine zunehmende Sichtbarkeit, die durch den Einsatz mobiler Geräte wie Mobiltelefone oder intelligente, am Körper getragene, vernetzte Computer gekennzeichnet ist. Zudem wird die Konnektivität durch die Echtzeitnutzung von Datenströmen oder den Einsatz von Cloud-Technologien weiter gestärkt. Das Ziel der nachfolgenden vierten Stufe ist es, die Transparenz in den Produktionsprozessen und der Wertschöpfungskette zu steigern, was Synergieeffekte mit den Lean-Methoden wie Just in Time, TPM oder Autonomation mit sich führt. Dabei tritt die horizontale und vertikale Integration in den Vordergrund. Beispielsweise kommunizieren intelligente Objekte unmittelbar miteinander und Prozesse werden unternehmensübergreifend über die gesamte Wertschöpfungskette verknüpft. Die gewonnene Transparenz erhöht die Resilienz der Wertschöpfungskette und ermöglicht eine Belieferung der Kunden zur richtigen Zeit, in der richtigen Menge und Qualität gemäß der Just-in-Time-Methode. Die zunehmende Prognosefähigkeit in der fünften Stufe basiert auf der zuvor geschaffenen Möglichkeit, dass Maschinen selbstständig untereinander über mehrere Steuerungsebenen im Austausch stehen und erste Formen von autonomen Steuerungskreisen bilden. Die generierten Felddaten werden durch KI-basierte Systeme analysiert und unterstützen dadurch zum Beispiel proaktiv bei der Produktionsnivellierung. Die sechste Stufe stärkt die Fähigkeit, Ereignisse zu prädictieren. Dabei werden intelligente, selbststeuernde Objekte eingeführt, die gemeinsam mit dem digitalen Zwilling die Grundlage für die letzte Stufe ebnen. Diese folgt der Adaptierbarkeit in Form eines cyber-physischen Systems, das Objekte der realen Welt dazu befähigt, sich mit virtuellen Objekten in Verbindung zu setzen und so verschwendungsfreie, am Kundenbedarf ausgerichtete Prozesse autonom zu steuern. Darüber hinaus sollen während der Lean-4.0-Implementierung gemäß dem Lean-Ansatz die Fähigkeiten der Belegschaft entwickelt werden und es sollte eine Kultur der stetigen Verbesserung geschaffen werden (ROTHER 2010, S. 226).

Neben der Erarbeitung der allgemeingültigen Lean-4.0-Implementierungsstrategie in Form eines Fortschritts-Graphen (siehe Abbildung 6-4), eines Gantt-Charts (siehe Abbildung 6-5) sowie der Referenzarchitektur (siehe Abbildung 6-6) wird nachfolgend in Abbildung 6-7

der potenzielle Einfluss der 20 Lean-Production-Methoden und der 26 Industrie-4.0-Technologien auf die produktionsrelevanten Zielgrößen dargestellt.

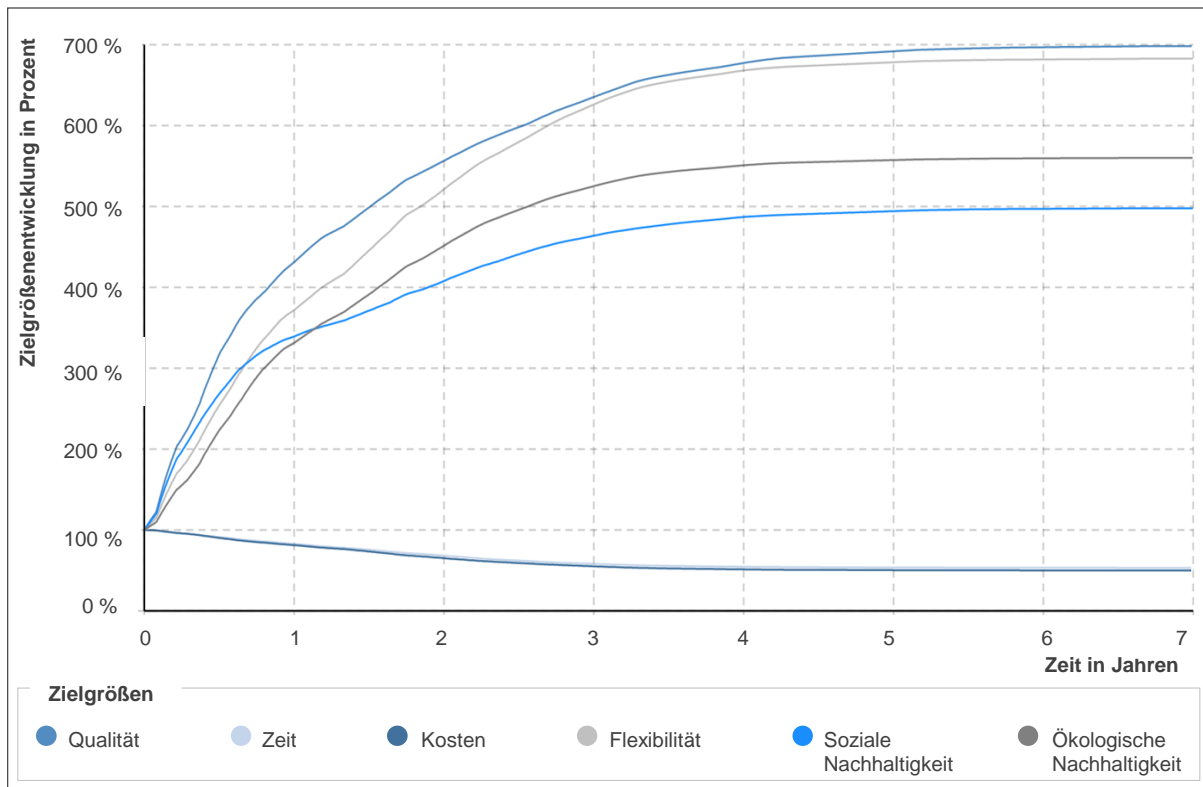


Abbildung 6-7: Potenzielle Entwicklung der Zielgrößen in Abhängigkeit von der Lean-4.0-Referenzimplementierungsstrategie

Die Ordinate des Graphen zeigt die mögliche prozentuale Entwicklung der Zielgrößen Zeit, Kosten, Qualität, Flexibilität, soziale und ökologische Nachhaltigkeit. Die Abszisse repräsentiert den zeitlichen Verlauf in Jahren. Basierend auf einem Ausgangszustand von 100 % im Jahr 0, in dem kein Lean- oder Industrie-4.0-Element im Anwendungsbereich eingeführt ist, erfolgt die Simulation der Zielgrößen unter Berücksichtigung der allgemeinen Lean-4.0-Referenzstrategie. Hierbei verzeichnen die Zielgrößen Qualität, Flexibilität sowie soziale und ökologische Nachhaltigkeit innerhalb der ersten vier Jahre signifikante Entwicklungsfortschritte. Anschließend nehmen die Steigungen der vier Entwicklungskurven sukzessive ab und nähern sich ab dem fünften Jahr ihrem Maximalwert an, den sie nach etwa sechseinhalb Jahren jeweils erreichen und beibehalten. Den größten Zuwachs erfährt die Zielgröße Qualität, deren Zielgrößenverbesserung nach fünfeinhalb Jahren ausgehend von 100 % (Initialwert) auf circa 700 % ansteigt. Diesem Entwicklungsverlauf folgend erreicht die Flexibilität gemäß den Simulationsergebnissen ihren Maximalwert von ca. 680 % nach fünfeinhalb Jahren. Die beiden Nachhaltigkeitskennzahlen verzeichnen ein Verbesserungspotenzial von etwa 550 % (ökologischen Nachhaltigkeit) sowie eine Verbesserung um ca. 400 % bei der sozialen Nachhaltigkeit. Die Zielgrößen Zeit und Kosten verbessern sich ebenfalls und verzeichnen eine fortwährende Reduktion ihrer Kennwerte über einen

Zeitraum von fünfeinhalb Jahren. Dieser Verlauf ist auf den in der Formel 5-6 hinterlegten Dämpfungsfaktor zurückzuführen und spiegelt einen realitätsnahen Entwicklungsverlauf wider. Die Zielgrößen erreichen nach fünfeinhalb Jahren eine Reduktion von etwa 50 % im Vergleich zum Ausgangszustand und überlagern sich in Abbildung 6-7.

Somit bleibt festzuhalten, dass sich alle sechs untersuchten Zielgrößen durch die strukturierte Einführung der 20 Lean-Production-Methoden und der 26 Industrie-4.0-Technologien gemäß der entwickelten Lean-4.0-Referenzstrategie in Abhängigkeit von der Zeit verbessern konnten. Dabei dient die allgemeine Lean-4.0-Referenzstrategie produzierenden Unternehmen als Orientierungshilfe, an der sie ihre Lean-4.0-Implementierungsstrategie ausrichten können. Es sei allerdings darauf verwiesen, dass die Referenzstrategie unternehmensspezifisch angepasst werden sollte, um beispielsweise auftretende Ressourcenengpässe zu berücksichtigen. Im nachfolgenden Abschnitt wird daher eine unternehmensindividuelle Lean-4.0-Implementierungsstrategie abgeleitet und diese sowie die Anwendungsmethode werden im weiteren Verlauf des Kapitels evaluiert (siehe Abschnitt 6.3).

6.2 Industrielle Anwendung der Methode

Die Anwendungsmethode und das Simulationsmodell wurden bei vier produzierenden Unternehmen getestet und einer anschließenden Bewertung unterzogen. Dabei wurde in jedem der Unternehmen für einen Produktionsbereich eine Lean-4.0-Implementierungsstrategie abgeleitet und die potenzielle Entwicklung der Zielgrößen aufgezeigt. Der Ablauf folgte dabei der in Abbildung 5-27 aufgeführten Anwendungsmethode. Zu Beginn wurden der Projekt-Kick-off sowie die Typisierung der Anwendungsbereiche durchgeführt (siehe Abschnitt 6.2.1). In Projektphase 2 wurden die Modellparameter erhoben (siehe Abschnitt 6.2.2), um die Grundlage für die Ableitung der unternehmensindividuellen Lean-4.0-Implementierungsstrategien zu generieren (siehe Abschnitt 6.2.3). Abschließend wurden die Ergebnisse und das Vorgehen von den teilnehmenden Expertinnen und Experten der Unternehmen validiert und die Limitationen sowie Verbesserungspotenziale in einem Fragebogen festgehalten (siehe Abschnitt 6.3.4). Die Version des prototypischen Demonstrators und das Vorgehen waren in ihren Grundmerkmalen bei allen Unternehmen identisch.

Im weiteren Verlauf dieses Unterkapitels werden zunächst alle vier Unternehmen in pseudonymisierter Form vorgestellt und die Anwendungsbereiche spezifiziert. Anschließend werden die gewählten Modellparameter eines Unternehmens beispielhaft aufgezeigt und daraus wird eine Lean-4.0-Implementierungsstrategie abgeleitet. Die abschließende Validierung des Simulationsmodells und der Methode sowie das Aufzeigen möglicher Verbesserungspotenziale erfolgen unter Berücksichtigung der Rückmeldungen aller vier industriellen Anwendungsunternehmen.

6.2.1 Phase 1 | Vorbereitung

Das Ziel dieses Abschnitts ist es, die Unternehmen sowie deren Produktionsbereiche für die Entwicklung der Lean-4.0-Implementierungsstrategie zu typisieren. Dies erfolgt unter Anwendung der Hilfsmittel 1 und 2 (siehe Anhang L bis Anhang N). Im Zuge des Projekt-Kick-off-Termins wurde zunächst mit den projektleitenden Personen der organisatorische Projektrahmen definiert und der Anwendungsbereich typisiert.

Das erste Unternehmen (Unternehmen A) produziert mit seinen weltweit insgesamt etwa 20 000 Mitarbeitenden Wasseraufbereitungsanlagen sowie Messinstrumente für die Wasseranalyse. Am ausgewählten Produktionsstandort sind circa 400 Personen tätig. Die Lean-4.0-Implementierungsstrategie sollte für den gesamten Produktionsbereich erarbeitet werden. Dieser ist durch manuelle und mechanische Tätigkeiten gekennzeichnet, wobei die Arbeitsplätze vorzugsweise in einer Gruppenproduktion angeordnet sind. Die jährliche Ausbringungsmenge einer Produktgruppe beträgt zwischen 100 und 1000 Stück. Unter den sechs vorgegebenen Zielgrößen besaß die Qualität die höchste Relevanz. Die Typisierung des Anwendungsbereichs von Unternehmen A ist in Abbildung 6-8 zusammengefasst.

Darüber hinaus konnte der Demonstrator bei einem Unternehmen (Unternehmen B) der Bauindustrie erprobt werden, das weltweit mehrere Produktionsstätten besitzt. Im zurückliegenden Geschäftsjahr wurde ein Gesamtumsatz von über einer Milliarde Euro erwirtschaftet. Am ausgewählten Produktionsstandort wird ein Großteil der Produkte, wie Türen, Wand- oder Deckenelemente, von mehr als 500 Mitarbeitenden gefertigt. Die Entwicklung der Lean-4.0-Implementierungsstrategie sollte im Bereich der Türenproduktion erfolgen. Hierbei handelt es sich um eine nach dem Fließprinzip angeordnete Mittelserienproduktion, in der manuelle und mechanische Arbeitstätigkeiten anfallen. Als wichtigste Zielgrößen wurden Kosten, Qualität sowie ökologische und soziale Nachhaltigkeit angegeben. Die Typisierung des Anwendungsbereichs ist in Abbildung 6-8 veranschaulicht.

Die beiden verbleibenden Unternehmen sind der Automobilindustrie zuordenbar. Dabei zählt Unternehmen C zu den größten, weltweit operierenden Automobilzulieferern auf dem Gebiet der Massivumformung von Stahl und Aluminium und deren anschließender Bearbeitung. Das Unternehmen erzielte mit seinen etwa 6000 Mitarbeitenden einen Gesamtumsatz von über einer Milliarde Euro, womit es zu den Großunternehmen zählt. Als Anwendungsbereich wurde eine Fertigungslinie im Bereich der Kaltumformung gewählt. Die Fließfertigung erfolgt überwiegend automatisiert nach dem Make-to-Stock-Prinzip. Als wichtigste Zielgrößen wurden Kosten, Qualität und Flexibilität angegeben. Die Typisierung des Anwendungsbereichs ist in Abbildung 6-8 zusammengefasst.

Abschließend erfolgte die Validierung bei Unternehmen D, das zu den führenden Herstellern von Freizeitfahrzeugen in Europa zählt. Das Unternehmen vereint verschiedene Marken und erzielte mit seinen etwa 3500 Mitarbeitenden einen kumulierten Umsatz von ca. 900 Mio. Euro. Die Lean-4.0-Implementierungsstrategie wurde für einen Produktionsstandort in Deutschland entwickelt, dessen Produktion sich in die Aufbaufertigung, die Schreinerei sowie die Endmontagelinie für die Montage von Freizeitfahrzeugen untergliedert. Die Implementierungsstrategie fokussierte sich dabei auf die Endmontagelinie, in der die Fahrzeuge nach dem Fließprinzip produziert werden. Als primäre Zielgrößen wurden Zeit und Qualität genannt. Im nachfolgenden morphologischen Kasten sind die Anwendungsbereiche je Unternehmen nochmals spezifiziert (Abbildung 6-8).



Abbildung 6-8: Typisierung der Anwendungsbereiche für die vier Anwendungsunternehmen

Die vier Anwendungsunternehmen eint, dass sie ihre Produkte weltweit erfolgreich vertreiben und dass sich ein wesentlicher Teil ihrer Produktion in Deutschland befindet. Durch das zunehmend volatile und komplexe Produktionsumfeld, das beispielsweise durch eine verstärkte Globalisierung oder den Anstieg des Fachkräftemangels charakterisiert ist, sehen sich die Unternehmen einem steigenden Wettbewerbsdruck ausgesetzt. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, gilt es, die Leistungsfähigkeit der Produktionsprozesse durch die strukturierte Eliminierung von Verschwendung und die gezielte Digitalisierung der Prozesse unter Einbeziehung der Mitarbeitenden nachhaltig und zielgerichtet zu verbessern. Basierend auf dieser Ausgangssituation beruhte das Interesse an einer Methode zur strukturierten Entwicklung einer unternehmensspezifischen Lean-4.0-Implementierungsstrategie, um die produktionsrelevanten Zielgrößen wie Zeit, Kosten, Qualität, Flexibilität oder Nachhaltigkeit zu verbessern.

6.2.2 Phase 2 | Bewertung und Auswahl

Nachfolgend werden exemplarisch basierend auf der Typisierung des Anwendungsbereichs von Unternehmen A die für das Simulationsmodell relevanten Parameter erhoben. Zunächst wurde gemäß Schritt 2.1 der Anwendungsmethode (Abbildung 5-27) eine Bestandsanalyse der Lean- und Industrie-4.0-Elemente für den ausgewählten Produktionsbereich durchgeführt. Das Ziel dieser Bewertung ist es, den Initialwert der bereits eingeführten Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien zu bestimmen. Hierzu wurde die Auditierungsmatrix aus Hilfsmittel 3 verwendet (siehe Anhang P). Durch die Bewertung zeigte sich, dass bislang noch keine der Lean-Methoden oder Industrie-4.0-Technologien vollständig eingeführt wurde, allerdings wurde bei etwa 75 % der Elemente bereits mit der Implementierung begonnen. Die Bewertung aller Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien bei Unternehmen A ist in Anhang T zusammengefasst.

Neben der Bestimmung des Initialwerts erfolgte die Auswahl der Lean-Methoden und der Industrie-4.0-Technologien. Zur Unterstützung der Selektion wurden Lean-Production- und Industrie-4.0-Steckbriefe verwendet. Das Projektteam entschied sich, basierend auf den Gewichtungen der unternehmensspezifischen Zielgrößen und den bereits teilweise implementierten Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien, für die Entwicklung einer Lean-4.0-Implementierungsstrategie, die alle 20 Lean-Production-Methoden und 23 Industrie-4.0-Technologien umfasst. Als nicht relevant für den Produktionsbereich wurden die Industrie-4.0-Technologien autonome Roboter, fahrerlose Transportsysteme und die Einführung von VR-Anwendungen als Assistenzsysteme für Mitarbeitende erachtet. Die Ergebnisse zur Auswahl der Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien sind in Anhang T aufgeführt.

Des Weiteren wurden in dieser Phase die verbliebenen Parameter definiert und die Datengrundlage der vier Interdependenzmatrizen (siehe Abschnitt 5.2) sowie der Zielgrößenbewertung wurde überprüft. Als ein wesentlicher Modellparameter nimmt die Veränderungsbereitschaft des Unternehmens Einfluss auf die Implementierungsdauer der Lean- und Industrie-4.0-Elemente. Diese wurde vonseiten des Projektteams im entsprechenden Produktionsbereich mit einer mittleren Ausprägung eingestuft. Die notwendigen fachlichen Kompetenzen der operativ mitarbeitenden sowie der projektleitenden Personen für die Einführung der Lean- und Industrie-4.0-Elemente wurden jeweils als fortgeschritten bewertet. Zudem können im ausgewählten und spezifizierten Produktionsbereich zeitgleich maximal drei Verbesserungsprojekte implementiert werden, ehe in den ersten beiden Jahren ein Kapazitätsengpass auftritt. Da nach Vollendung des zweiten Projektjahres eine weitere Person für das Projektmanagement vorgesehen wird, erhöht sich die maximale Anzahl der gleichzeitig durchführbaren Projekte auf vier. Des Weiteren sollen die Lean- und Industrie-4.0-Elemente bis zu 80 % implementiert sein, bevor ein zusätzliches Verbesserungsprojekt initialisiert wird. Die gewählten Modellparameter sind in Abbildung 6-9 zusammengefasst.

Modellparameter für die Lean-4.0-Implementierungsstrategie von Unternehmen A										
Veränderungsbereitschaft des Unternehmens	0		1		2			3		
Schwellwert für Lean-Production-Methoden	0 %	20 %	40 %	60 %	80 %	100 %				
Schwellwert für Industrie-4.0-Technologien	0 %	20 %	40 %	60 %	80 %	100 %				
Kompetenz der Projektleitenden	0		1		2			3		
Kompetenz der Mitarbeitenden	0		1		2			3		
Maximalanzahl gleichzeitiger Projekte bis Jahr 2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	> 9
Maximalanzahl gleichzeitiger Projekte ab Jahr 3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	> 9

Legende: : nicht gewählte Ausprägung : gewählte Ausprägung

Abbildung 6-9: Modellparameter für die Lean-4.0-Implementierungsstrategie von Unternehmen A

Abschließend wurde die für das Simulationsmodell relevante Datengrundlage validiert, wobei die vier Interdependenzmatrizen gemeinsam mit der hinterlegten Implementierungsdauer sowie den Einflüssen der Methoden und Technologien auf die Zielgrößen geprüft wurden. Dabei wurden keine Anpassungen der Datengrundlagen vorgenommen, sodass mit der Simulation der Lean-4.0-Implementierungsstrategie in der nächsten Phase begonnen werden konnte. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass keines der vier Anwendungsunternehmen Änderungen an der Datengrundlage vorgenommen hat und die Fachleute die Datenbasis als korrekt und hilfreich erachteten.

6.2.3 Phase 3 | Simulation der Lean-4.0-Implementierungsstrategie

Das Ziel von Phase 3 ist es, basierend auf den Modellparametern von Unternehmen A sowie anhand der Wirkverknüpfungen zwischen den Elementen und ihrer Einflüsse auf die Zielgrößen eine unternehmensspezifische Lean-4.0-Strategie abzuleiten. Diese soll es produzierenden Unternehmen ermöglichen, ihre produktionsrelevanten Zielgrößen durch die systemische Einführung von Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien gezielt und nachhaltig zu verbessern.

Die Entwicklung der Lean-4.0-Strategie für Unternehmen A erfolgte gemäß der in Abbildung 5-27 aufgeführten Anwendungsmethode durch das Projektteam des *iwb* unter Anwendung des prototypischen Simulationsmodells mit der Software AnyLogic. Dabei wurden zunächst die Modellparameter über eine standardisierte Schnittstelle in das Simulationsmodell überführt sowie die Wirkverknüpfungen zwischen den Elementen und deren Einfluss auf die sechs Zielgrößen hinterlegt. Die Zeitschrittweite der Simulation betrug einen Tag und der Anfangszustand des Produktionsbereichs wurde durch die eingegebenen Initialwerte definiert. Ausgehend von diesem Initialzustand erfolgte die Simulation der Lean-4.0-Implementierung, die endete, sobald alle ausgewählten Verbesserungsprojekte einen Implementierungsfortschritt von 100 % erreicht hatten.

Der nachstehende Lean-4.0-Fortschritts-Graph zeigt die Einführung der Lean- und Industrie-4.0-Elemente basierend auf deren Interdependenzen. Im Zuge der unternehmensindividuellen Modellparameter kann mit der Integration eines Elements erst dann begonnen werden, wenn alle Voraussetzungen erfüllt sind. Dies erfordert einen Implementierungsfortschritt der als Voraussetzung deklarierten Elemente von mindestens 80 %. Zudem können in den ersten beiden Jahren maximal drei Verbesserungsprojekte gleichzeitig bearbeitet werden, deren Implementierungsfortschritt unter 80 % liegt. Ab Beginn des dritten Jahres erhöht sich die Anzahl an Verbesserungsprojekten auf vier. Unter Berücksichtigung dieser Restriktionen sowie der weiteren unternehmensspezifischen Parameter wurde aus der Simulation der in Abbildung 6-10 gezeigte Fortschritts-Graph abgeleitet. Die Ordinate gibt dabei den prozentualen Implementierungsfortschritt der Elemente an, während die Abszisse die Implementierungsdauer in Jahren aufzeigt.

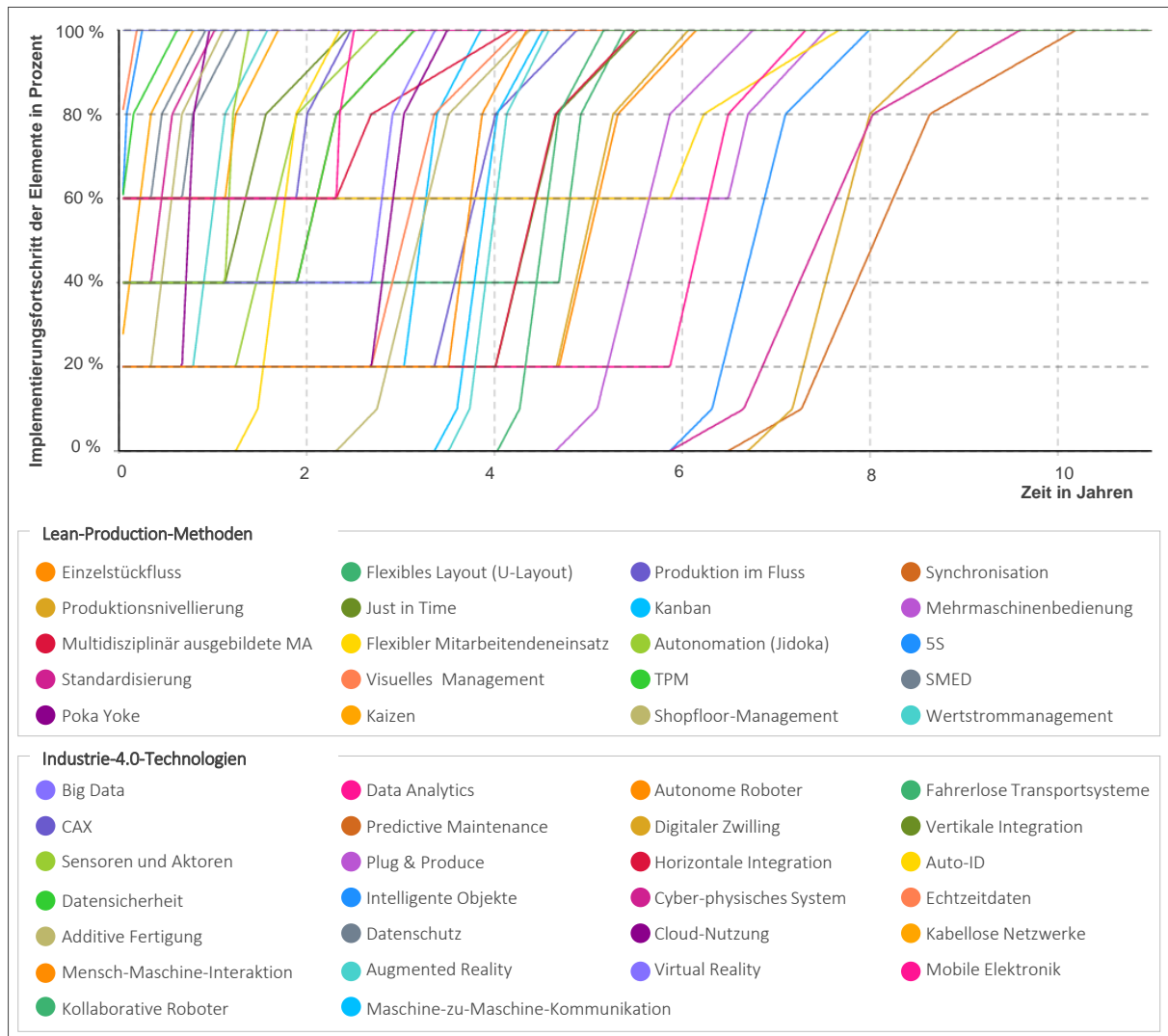


Abbildung 6-10: Fortschritts-Graph für die Lean-4.0-Implementierungsstrategie für Unternehmen A

Wie in Abbildung 6-10 dargestellt, folgt die Einführung der Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien einem S-kurvenartigen Verlauf. Dabei sind die Einführungsphase, bei der der Implementierungsfortschritt (IF) unter 10 % liegt, und die Sättigungsphase (IF > 80 %) durch eine lange Implementierungsdauer gekennzeichnet. Im Zuge der Einführungsphase gilt es beispielsweise, das Personal vorzubereiten und zu schulen, während gegen Ende der Einführung eine abflachende Lernkurve und somit Implementierungsdauer angenommen wird. Aufgrund der Vielzahl an zeitgleich eingeführten Verbesserungsprojekten kommt es im Fortschritts-Graphen zu Überlagerungen der Implementierungsverläufe, was die Interpretation der Ergebnisse erschwert. Um die Lesbarkeit für die Benutzenden zu erhöhen, wird der Graph in ein Gantt-Chart überführt (siehe Abbildung 6-11). Dieses strukturiert die Verbesserungsprojekte entsprechend ihren vorgesehenen Startzeitpunkten. Sollten dabei Elemente auf Basis der vorherrschenden Interdependenzen zeitgleich eingeführt werden, so werden zunächst jene Elemente mit der höheren Relevanz für das Unternehmen implementiert.

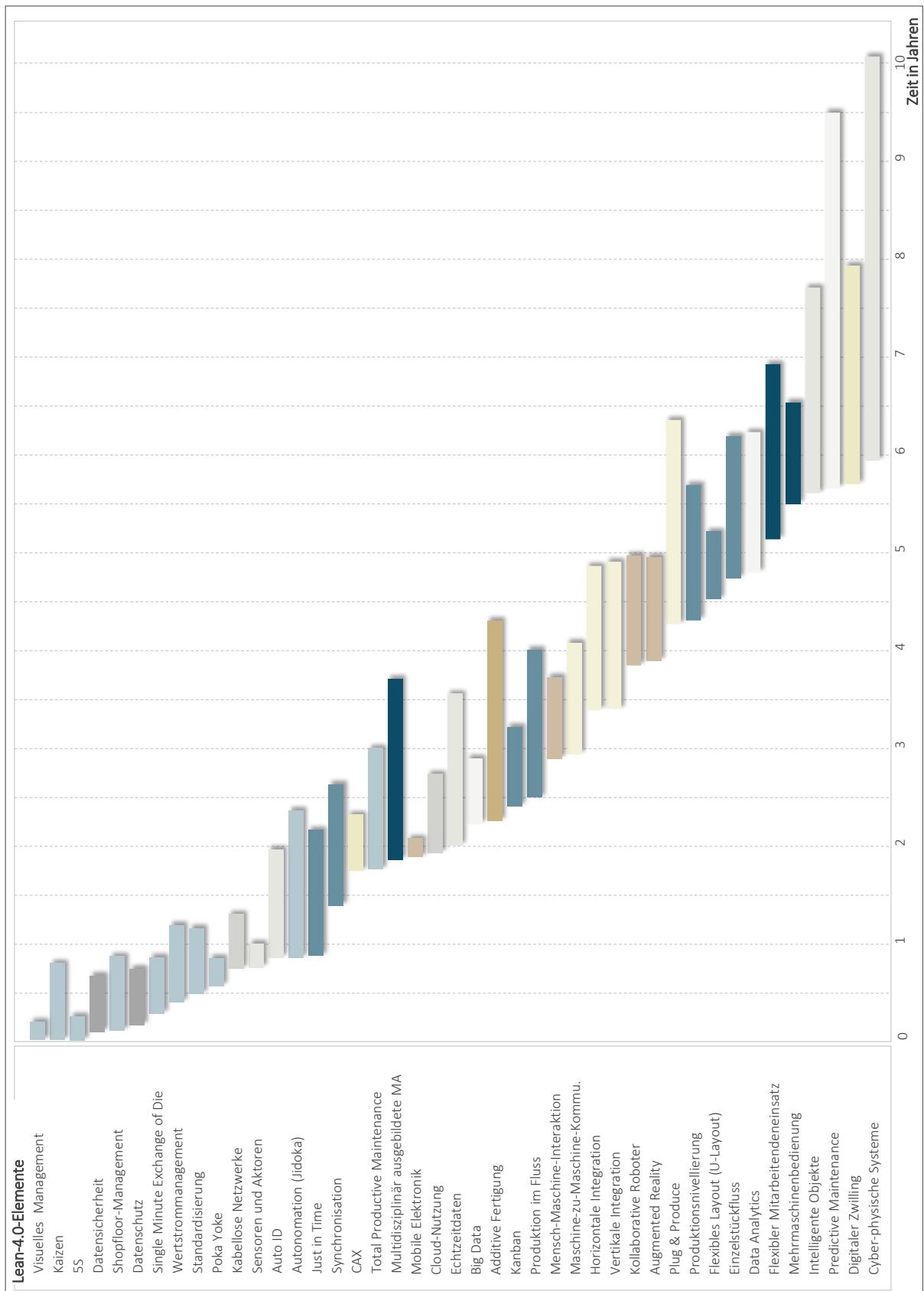


Abbildung 6-11: Gantt-Chart für die Lean-4.0-Implementierungsstrategie für Unternehmen A

Aus den gezeigten Resultaten des Implementierungsfortschritts-Graphen (siehe Abbildung 6-10) sowie des Gantt-Charts (siehe Abbildung 6-11) geht hervor, dass sich die geplante

systemische Implementierung der Lean- und Industrie-4.0-Elemente im Produktionsbereich unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen auf etwa zehn Jahre erstreckt. Gemäß der Implementierungsstrategie können in den ersten zwei Jahren maximal drei Verbesserungsprojekte parallel durchgeführt und ab dem dritten Jahr vier zeitgleiche Projekte bearbeitet werden. Der Lean-4.0-Implementierungsstrategie von Unternehmen A folgend wird im ersten Jahr durch qualitätsorientierte Lean-Methoden die Basis für die Einführung weiterer Methoden und Industrie-4.0-Technologien geschaffen. Die bestehenden operativen Prozesse sollen daher zunächst unter Anwendung von Lean-Methoden wie 5S, visuellem Management oder dem Shopfloor-Management durch die Mitarbeitenden stabilisiert und verbessert werden. Dies setzt eine Verankerung der Lean-Kultur bei Unternehmen A voraus, die durch ein Streben nach kontinuierlicher Verbesserung geprägt ist. Die daraus resultierenden, möglichst verschwendungsfreien und am Kundenbedarf ausgerichteten Prozesse bilden gemeinsam mit der zu Beginn geschaffenen Datensicherheit und dem Datenschutz die Basis für die Einführung von Industrie-4.0-Technologien in der Produktion von Unternehmen A. Dabei sollte gemäß der Lean-4.0-Implementierungsstrategie zunächst eine Konnektivität zwischen den Produkten, Maschinen, Betriebsmitteln und Menschen in der Produktion durch Technologien wie kabellose Netzwerke oder Sensoren und Aktoren erzeugt werden. Dies erlaubt die Implementierung zusätzlicher Technologien, die die Wirkung von Lean-Methoden wie der Just-in-Time-Methode durch eine erhöhte Transparenz in der Wertschöpfungskette positiv beeinflussen und somit beispielsweise zu resilienteren Logistikprozessen sowie einer Verbesserung der produktionsrelevanten Zielgrößen beitragen. Neben Just-in-Time werden bis zum siebten Jahr weitere Lean-Production-Methoden in der Produktion eingeführt. Dabei liegt der Fokus zunächst auf den logistikorientierten Lean-Methoden, um die Bestände sowie die Durchlaufzeiten zu reduzieren und somit die Produktionskosten und Lieferzeiten zu senken. Zuletzt werden im Bereich von Lean Production die Methoden der Mehrmaschinenbedienung und der flexible Mitarbeitendeneinsatz umgesetzt, um die Flexibilität der Produktionsprozesse zu erhöhen und folglich auf das volatile Produktionsumfeld reagieren zu können. Die Effekte der Lean-Production-Methoden auf die produktionsrelevanten Zielgrößen werden durch die Einführung der Industrie-4.0-Technologien gemäß der Lean-4.0-Implementierungsstrategie bei Unternehmen A ab dem zweiten Projektjahr verstärkt. Hierbei wird durch die Einführung von Cloud-Technologien und den Einsatz von Big Data die Grundlage für KI-basierte Datenanalyseverfahren geschaffen. Die echtzeitfähigen Datenströme können durch die Einführung der horizontalen und vertikalen Integration über die gesamte Wertschöpfungskette verfügbar gemacht werden. Dadurch können Kapazitätsengpässe transparent dargestellt und im Zuge der Produktionsnivellierung genutzt werden. Gepaart mit der Einführung von Predictive Maintenance sowie der Lean-Production-Methode TPM kann die Produktion so gesteuert werden,

dass keine unvorhergesehenen Maschinenstillstände auftreten und notwendige Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten die Ausbringungsmenge der Produktion nicht weiter beeinträchtigen. Zuletzt gilt es bei Unternehmen A, die Industrie-4.0-Technologien wie den digitalen Zwilling oder intelligente Objekte in ein cyber-physisches Produktionssystem zu überführen. In Kombination mit den Lean-Methoden können so autonome, verschwendungsfreie Produktionsprozesse generiert werden, die die Leistungsfähigkeit des Unternehmens, gemessen an den Zielgrößen, nachhaltig steigern.

Der Einfluss der auf Basis der Lean-4.0-Implementierungsstrategie eingeführten Lean- und Industrie-4.0-Elemente auf die produktionsrelevanten Zielgrößen Zeit, Kosten, Qualität, Flexibilität sowie ökologische und soziale Nachhaltigkeit bei Unternehmen A ist in nachfolgender Abbildung 6-12 dargestellt. Dabei ist die potenzielle Zielgrößenentwicklung in Prozent (Ordinate) für den Produktionsbereich in Relation zur Implementierungszeit in Jahren (Abszisse) abgebildet. Der Ausgangspunkt der Zielgrößen liegt bei jeweils 100 %.

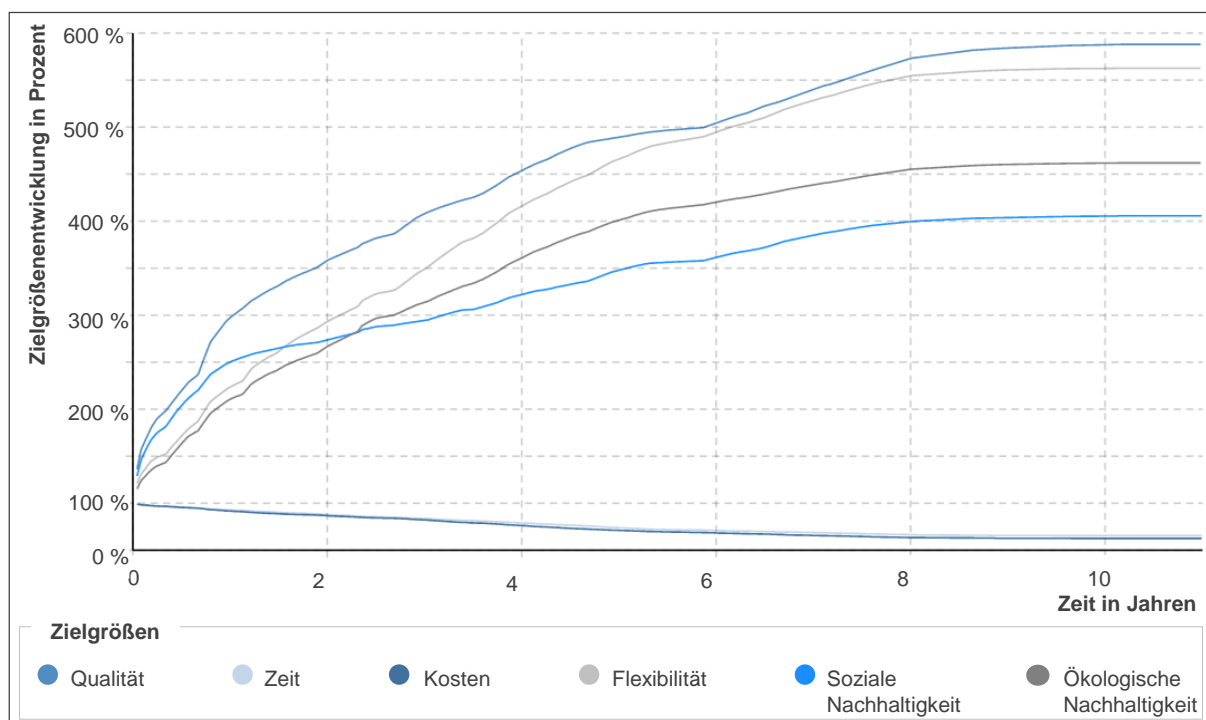


Abbildung 6-12: Zielgrößenentwicklungsgraph, basierend auf der Lean-4.0-Implementierungsstrategie für Unternehmen A

Die Zielgrößen Qualität, Flexibilität sowie soziale und ökologische Nachhaltigkeit erfahren in den ersten acht Jahren gemäß den Simulationsergebnissen einen stetigen Anstieg. Dabei steigen die Zielgrößen Qualität und Flexibilität voraussichtlich bei Unternehmen A nach acht Jahren auf etwa 570 % bzw. 550 %. Anschließend flachen beide Entwicklungsverläufe ab, wobei die Qualität ihr Maximum von 580 %, ebenso wie die Zielgröße Flexibilität ihren Maximalwert von 550 %, nach zehn Jahren erreicht und unter den simulierten Gegebenheiten beibehält. Die Zielgrößenentwicklung der Nachhaltigkeitskennzahlen steigt bei

Unternehmen A gemäß der Simulation in den ersten acht Jahren ebenfalls sukzessive an. Ihre Maximalwerte erreichen beide Zielgrößen nach zehn Jahre. Dieser beträgt bei der ökologischen Nachhaltigkeit 460 % und bei der sozialen Nachhaltigkeit 355 %. Ergänzend zu den vier genannten Zielgrößen wurde der Einfluss der Lean-4.0-Implementierung bei Unternehmen A ebenfalls auf die Zielgrößen Zeit und Kosten simuliert. In beiden Fällen ist von einer konstanten Verbesserung der Zieldimensionen auszugehen. Im Produktionsbereich bei Unternehmen A liegt die simulationsbasierte Prognose dieser beiden Zielgrößen nach zehn Jahren bei einer Reduktion auf etwa 40 % im Vergleich zum Ausgangszustand.

Basierend auf den Simulationsergebnissen verzeichnen alle Zielgrößen durch die unternehmensspezifische Lean-4.0-Implementierungsstrategie bei Unternehmen A eine signifikante Verbesserung. Dieses Ergebnis ist deckungsgleich mit den Resultaten der weiteren Anwendungsunternehmen. Auch hier können gemäß dem Simulationsmodell durch die systematische und zielorientierte Lean-4.0-Implementierung signifikante Verbesserungspotenziale bei den Zielgrößen erwartet werden. Durch die unternehmensspezifischen Modellparameter, beispielsweise den Initialwert der Elemente oder die gewählte maximale Anzahl an zeitgleich einföhrbaren Verbesserungsprojekten, weichen die Ergebnisse der Industrieunternehmen voneinander ab.

6.3 Evaluation und Diskussion der Forschungsergebnisse

In diesem Unterkapitel werden die erarbeiteten Forschungsergebnisse aus einer wissenschaftlichen Perspektive sowie auf Basis des Feedbacks der Industrieunternehmen validiert. Dabei wird zunächst die Rückmeldung der vier Anwendungsunternehmen zusammengefasst (siehe Abschnitt 6.3.1) und danach in Abschnitt 6.3.2 eine Aufwand-Nutzen-Bewertung durchgeführt. Abschließend erfolgen die Validierung (siehe Abschnitt 6.3.2) und eine kritische Reflexion (siehe Abschnitt 6.3.4) der Ergebnisse des Simulationsmodells sowie der entwickelten Anwendungsmethode.

6.3.1 Feedback durch Industrieunternehmen

Wie in Abschnitt 6.2 beschrieben, wurde für jedes der vier Anwendungsunternehmen eine Lean-4.0-Implementierungsstrategie entwickelt. Dabei folgte der Entwicklungsprozess den in Abbildung 5-27 beschriebenen Phasen, bestehend aus einer Vorbereitungs-, einer Bewertungs- und Auswahl- sowie einer Simulationsphase. Nach der Ableitung und Präsentation der Lean-4.0-Implementierungsstrategie beurteilten die projektleitenden Personen die finalen Ergebnisse und die Anwendungsmethode. Dabei bewerteten sie die Anwendbarkeit und den Nutzen, um mögliche Verbesserungspotenziale zu identifizieren.

Die projektleitenden Personen der Unternehmen sahen großes Potenzial in der strukturierten und systematischen Entwicklung einer unternehmensindividuellen Lean-4.0-Implementierungsstrategie mithilfe des System-Dynamics-Modells. Auch wurden die Simulationsergebnisse in ihrer Grundstruktur als valide und für die Unternehmen von großem Nutzen eingestuft. Insbesondere das Aufzeigen der Interdependenzen zwischen den Lean-Methoden und den Industrie-4.0-Technologien sowie ihres Einflusses auf produktionsrelevante Zielgrößen steigert die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse und ermöglicht eine effektive und effiziente Entwicklung der Implementierungsstrategie. Einer der Projektleiter beschrieb dabei die Phasen zur Bewertung und Auswahl der Lean- und Industrie-4.0-Elemente (Phase 2) sowie die Simulation der Lean-4.0-Implementierungsstrategie (Phase 3) als sehr hilfreich. Durch die Bestandsaufnahme des Initialwerts der Lean- und Industrie-4.0-Elemente im ausgewählten Produktionsbereich wird zum einen die Prozessreife festgehalten und zugleich wird durch den Austausch mit den operativ mitarbeitenden Personen vor Ort das Prozessverständnis gestärkt, das für die anstehende Auswahl der Lean- und Industrie-4.0-Elemente immanent ist. Des Weiteren wurden die bereitgestellten Hilfsmittel positiv hervorgehoben, wobei empfohlen wurde, die Unterlagen und das Vorgehen zu Beginn jeder Phase nochmals kurz durch eine Person des *iwb*-Projektteams erläutern zu lassen, um mögliche aufkommende Fragen unmittelbar beantworten zu können. Zudem fördern die erarbeiteten und bereitgestellten Lean- und Industrie-4.0-Steckbriefe ein einheitliches Verständnis im Projektteam und beschleunigen so die Entwicklung der Lean-4.0-Implementierungsstrategie. Die Auflistung und die Steckbriefe der 20 Lean-Methoden und 26 Industrie-4.0-Technologien führen gemäß zwei Projektleitenden dazu, dass keine wesentlichen Methoden und Technologien vergessen werden, und umfassen die für die Verbesserung von Produktionsprozessen relevanten Lean- und Industrie-4.0-Elemente. Durch die Spezifikation der Parameter in Phase 2 kann zudem auf unternehmensspezifische Gegebenheiten eingegangen werden, womit Unternehmen für einen Produktionsbereich verschiedene Implementierungsstrategien ableiten und deren Einflüsse auf die Zielgröße vergleichen können. Zudem bietet die Darstellung in Form eines Gantt-Charts in Kombination mit der potenziellen Zielgrößenentwicklung eine gute Entscheidungsgrundlage für die systematische Einführung von Lean- und Industrie-4.0-Elementen. Der zeitliche Aufwand für die Entwicklung einer Lean-4.0-Implementierungsstrategie ohne die bereitgestellte Methode und das Simulationsmodell wurde von den projektleitenden Personen je nach Ressourceneinsatz und Komplexität des Produktionsbereichs auf 25 bis 35 Arbeitstage geschätzt. Dieser Aufwand kann durch das Simulationsmodell signifikant verkürzt werden (siehe Tabelle 6-1). Die Benutzenden hoben daher die Zeitersparnis und die erzielte Ergebnisqualität hervor. Ein Projektleiter bewertete die erarbeitete Anwendungsmethode zusammenfassend als sehr effektiv und effizient für die Entwicklung einer Lean-4.0-Implementierungsstrategie.

Neben den Vorteilen, die die Anwendung des systemdynamischen Simulationsmodells für produzierende Unternehmen mit sich bringt, wurden auch Herausforderungen und Verbesserungspotenziale identifiziert. Von den projektleitenden Personen wurde angemerkt, dass die Bestandsaufnahme der Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien mithilfe eines Reifegradmodells erfolgen könnte, um eine möglichst objektive und konsistente Bewertung des Initialzustands sicherzustellen. Darüber hinaus sollte die Bewertung der Kompetenzen der operativ mitarbeitenden sowie der projektleitenden Personen für jede Lean-Production-Methode und Industrie-4.0-Technologie möglich sein. Eine gleichzeitige Einschätzung der Kompetenzen für alle Methoden und Technologien wurde aufgrund der heterogenen Kompetenzanforderungen der Elemente als schwierig erachtet. Außerdem wurde angeregt, dass neben den zeitlichen auch die monetären Aufwände für die Einführung der Methoden und Technologien in Abhängigkeit von der Größe und Komplexität des Produktionsbereichs hinterlegt sein könnten. Damit könnten die benötigten finanziellen Ressourcen für die angestrebte Implementierung aufgezeigt werden. Abschließend wurde angemerkt, dass Methoden oder Technologien gegebenenfalls bereits zu einem früheren Zeitpunkt implementiert werden könnten, auch wenn diese dann nicht ihr gesamtes Potenzial entfalten. Diese Entscheidung gilt es dann im Projektteam zu treffen, wobei laut Aussage eines Projektleiters die Simulationsergebnisse eine wesentliche Entscheidungsgrundlage bilden.

6.3.2 Wirtschaftlichkeitsbewertung

In diesem Abschnitt wird die Wirtschaftlichkeit des Simulationsmodells und der Anwendungsmethode in Form einer Aufwand-Nutzen-Bewertung untersucht. Die Vorteile der Implementierung von Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien wurden bereits branchenübergreifend von verschiedenen Autor*innen, beispielsweise WOMACK ET AL. (1990), AULL (2012), BAUERNHANSL ET AL. (2014) und LIEBRECHT (2020), aufgezeigt und finden umfassende Anerkennung (siehe Kapitel 2). In Lösungsbaustein 1 (siehe Abschnitt 5.1) wurden zudem die positiven Einflüsse der Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien auf die produktionsrelevanten Zielgrößen Zeit, Kosten, Qualität, Flexibilität sowie ökologische und soziale Nachhaltigkeit durch Studien bewertet. Darüber hinaus wurde im Zuge der industriellen Anwendung mithilfe des Simulationsmodells bereits der positive Einfluss der Lean-4.0-Implementierung auf die produktionsrelevanten Zielgrößen aufgezeigt (siehe 6.2.3) und die Ergebnisse wurden mit Fachleuten aus Industrie und Forschung validiert.

Somit soll sich die nachfolgende Aufwand-Nutzen-Bewertung auf den Entwicklungsprozess der Lean-4.0-Implementierungsstrategie fokussieren. Hierbei werden die Entwicklungsaufwände einer simulationsunterstützten mit denen einer klassisch erarbeiteten Lean-

4.0-Implementierungsstrategie verglichen. Als Analyseverfahren wird eine Break-even-Point-Analyse gewählt und die Sensitivität möglicher Kostenabweichungen mithilfe einer Sensitivitätsbandbreite von +/- 10 % bewertet.

Aufwandsbewertung: Für die Break-even-Point-Analyse gilt es, die Aufwandsstruktur sowohl für die simulationsbasierte als auch die klassische Entwicklung der Lean-4.0-Implementierungsstrategie zu analysieren. Dabei werden die Investitions- sowie die Personal- und Betriebskosten berücksichtigt. Als Bewertungsgrundlage und Richtwerte dienen neben den Abschätzungen und Erfahrungswerte der Anwendungsunternehmen auch eingeholte Angebote für die Software-Lizenzkosten. Bei der Abschätzung der jeweiligen Personentage je Arbeitsschritt wurden die Zeitaufwände für die vor- und nachbereitenden Tätigkeiten bereits berücksichtigt. Es wird in Anlehnung an die Forschungsarbeit nach HÖLLTHALER (2022, S. 155) mit einem durchschnittlichen Personalkostensatz von 900,00 € pro Tag kalkuliert.

Mit Verweis auf die in den nachstehenden Tabelle 6-1 und 6-2 aufgeführten Kostenstrukturen des simulationsbasierten und klassischen Entwicklungsansatzes wird ersichtlich, dass insbesondere die Initialkosten der beiden Ansätze voneinander abweichen. Während bei der klassischen Entwicklung keine Initialkosten anfallen, wird für die simulationsbasierte Entwicklung eine System-Dynamics-Software benötigt. Zudem fallen durch die Nutzung der Softwareapplikation jährliche Betriebskosten in Form von Lizenz- und Instandhaltungskosten an. Es sei angemerkt, dass bereits einige produzierende Unternehmen in Besitz einer Simulationssoftware beispielsweise für die Planung der Produktionslinien sind. In diesem Fall könnten die Initial- und Betriebskosten für den simulationsbasierten Ansatz auf weitere Projekte umgelegt werden. In Bezug auf die Personalkosten ähneln sich beide Ansätze, da für die Entwicklung bei beiden Ansätzen die Vorbereitungs- sowie die Bewertungs- und Auswahlphase durchgeführt werden müssen. Es wird hierbei davon ausgegangen, dass die Unternehmen künftig auch bei der klassischen Vorgehensweise auf die in dieser Arbeit bereitgestellten Hilfsmittel zurückgreifen werden und somit ein effektives und effizientes Vorgehen sichergestellt ist. Bei der simulationsbasierten Entwicklung der Lean-4.0-Implementierungsstrategie ist insgesamt allerdings nach Einschätzung der Fachleute von einer signifikanten Arbeitersparnis in Personentagen auszugehen, wie die nachfolgenden Tabellen 6-1 und 6-2 zeigen.

Tabelle 6-1: Initialkosten in Euro für die klassische und die simulationsbasierte Entwicklung einer Lean-4.0-Implementierungsstrategie für einen Produktionsbereich

Lean-4.0-Implementierungsstrategie:		Klassisch		Simulationsbasiert	
Nr.	Beschreibung	Menge/ Personentage	Aufwand in Euro	Menge/ Personentage	Aufwand in Euro
1.1	Anschaffungskosten	0	0,00 €	0	12.500,00 €
1.2	Programmieraufwand	0	0,00 €	20	18.000,00 €

Tabelle 6-2: Laufende Kosten in Euro für die klassische und die simulationsbasierte Entwicklung einer Lean-4.0-Implementierungsstrategie für einen Produktionsbereich

Lean-4.0-Implementierungsstrategie:		Klassisch		Simulationsbasiert	
Nr.	Beschreibung	Menge/ Personentage	Aufwand in Euro	Menge/ Personentage	Aufwand in Euro
2 Personalkosten (je abgeleiteter Implementierungsstrategie)					
2.1	Kick-off-Termin	4	3.600,00 €	4	3.600,00 €
2.2	Typisierung des Produktionsbereichs	2	1.800,00 €	2	1.800,00 €
2.3	Bewertung der Technologien und Methoden	8	7.200,00 €	8	7.200,00 €
2.4	Auswahl der Technologien und Methoden	8	7.200,00 €	8	7.200,00 €
2.5	Entwicklung/Simulation	25	22.500,00 €	5	4.500,00 €
2.6	Abschlussworkshop	8	7.200,00 €	8	7.200,00 €
3 Betriebskosten (pro Jahr)					
3.1	Lizenzkosten der Software	0	0,00 €	1	2.500,00 €
3.2	Instandhaltung der Software	0	0,00 €	2	1.800,00 €

Break-even-Point-Analyse: In Abbildung 6-13 wird der Aufwand beider Ansätze basierend auf der Anzahl entwickelter Strategien verglichen. Es wird angenommen, dass jährlich je Produktionsbereich zwei Strategien benötigt werden. Um mögliche Schwankungen zu berücksichtigen, wird eine Bandbreite von +/-10 % hinterlegt, welche die Kostenober- und Kostenuntergrenze markieren. Durch die Schnittpunkte der Break-even-Point-Analyse ergeben sich drei Szenarien. Am ersten Schnittpunkt wird von einem kostengünstigen simulationsbasierten (-10 %) und einem kostenintensiven klassischen Entwicklungsverlauf (+10 %) ausgegangen. Hierbei liegt der Schnittpunkt bei unter zwei Anwendungen und somit analog zu Szenario 2, das mit einer durchschnittlichen Kostenbewertung ebenfalls zwei Anwendungen benötigt und ein Potenzial von 15.000,00 € je Anwendung aufweist. In Szenario 3 wird von einem kostengünstigen klassischen (-10 %) und einem kostenintensiven simulationsbasierten (+10 %) Verlauf ausgegangen. Daraus resultiert ein Amortisationspunkt von 5 Anwendungen, verbunden mit einem Potenzial von 6.500,00 €. Folglich beinhaltet der simulationsbasierte Ansatz in allen Szenarien signifikante Einsparpotenziale.

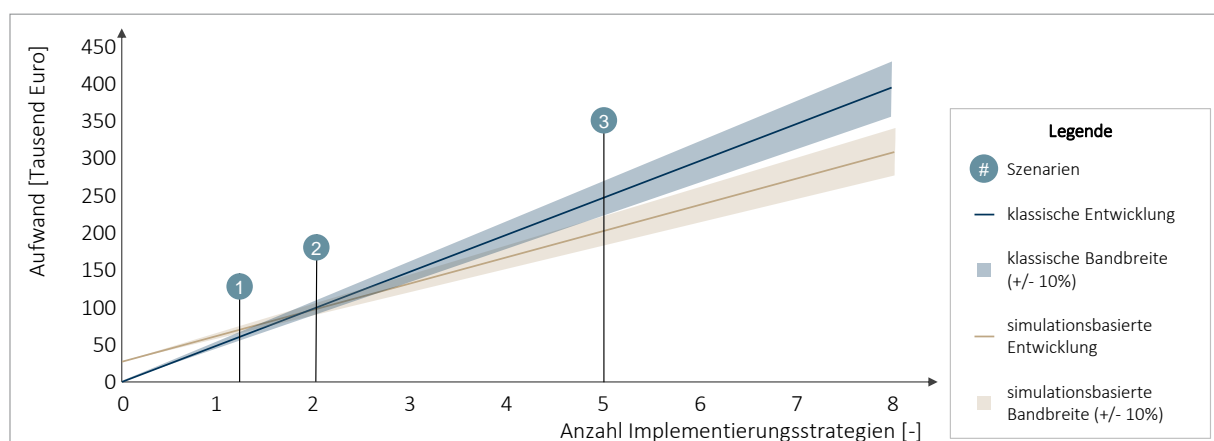


Abbildung 6-13: Vergleichende, szenariobasierte Break-even-Point-Analyse der Entwicklungsansätze

6.3.3 Validierung der Methode

Nach der Entwicklung und industriellen Anwendung des Simulationsmodells und der Anwendungsmethode erfolgt in diesem Abschnitt die Validierung des Lösungsansatzes. Hierzu dienen die in Abschnitt 4.1 festgelegten Anforderungskriterien, die aus sechs allgemeinen und elf inhaltlichen Anforderungen bestehen. Dabei erfüllt das erarbeitete Lösungsvorgehen zur Entwicklung einer unternehmensindividuellen Lean-4.0-Implementierungsstrategie für produzierende Unternehmen die allgemeinen Anforderungen größtenteils vollumfänglich und die inhaltlichen Anforderungen vollständig. Tabelle 6-3 bietet einen Überblick über die Bewertung, die nachfolgend diskutiert wird.

Tabelle 6-3: Anforderungsbewertung des entwickelten Lösungsansatzes

Allgemeine Anforderungen (Abschnitt 4.1)						Inhaltliche Anforderungen (Abschnitt 4.2)										
Gütekriterien			Anwendungs- bezug			Spezifikation und Auswahlprozess				Interdependenzen				Implementierungs- strategie		
Objektivität	Reliabilität	Validität	Wirtschaftlichkeit	Anwendbarkeit	Nutzentransparenz	Spezifikation von Lean-Production-Methoden	Spezifikation von Industrie-4.0-Technologien	Einfluss von Lean- und Industrie-4.0- Elementen auf die Zielgrößen	Strukturiertes Auswahlverfahren	Interdependenzen zwischen Lean-Production-Methoden	Interdependenzen zwischen Industrie-4.0-Technologien	Interdependenzen zwischen Lean Production und Industrie 4.0	Berücksichtigung dynamischer Rückkopplungsprozesse	Allgemeingültige Lean-4.0- Implementierungsstrategie	Unternehmensindividueller Lean-4.0-Implementierungsplan	Methoden- und technologiebasierte Lean-4.0-Implementierungsstrategie
●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Legende:
 ●: Merkmal ist voll erfüllt ●: Merkmal ist größtenteils erfüllt ◐: Merkmal ist teilweise erfüllt ○: Merkmal ist nicht erfüllt

Die allgemeinen Anforderungen lassen sich in die drei Gütekriterien Objektivität, Reliabilität und Validität sowie die drei anwendungsbezogenen Kriterien Wirtschaftlichkeit, Anwendbarkeit und Nachvollziehbarkeit segmentieren. Der Nachweis der Wirtschaftlichkeit wurde bereits in Abschnitt 6.3.2 erbracht. Daher wird nachfolgend der Erfüllungsgrad der verbliebenen Anforderungen umfassend untersucht.

Objektivität: Das Gütekriterium der Objektivität stellt die Unabhängigkeit der Methode von der nutzenden Person sicher. Diese Anforderung wird durch den Lösungsansatz größtenteils erfüllt. Die bereitgestellten Hilfsmittel, Steckbriefe sowie Interdependenzmatrizen sorgen für eine einheitliche und objektive Applikation der Methode und des Simulationsmodells. Allerdings erfordert die Entwicklung einer unternehmensspezifischen Lean-4.0-Implementierungsstrategie die Bewertung der Modellparameter sowie des Initialzustands der Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien. Somit kann auf Seiten

der Anwendung eine subjektiv geprägte Bewertung des Ausgangszustands erfolgen, die Einfluss auf die simulierte Implementierungsreihenfolge nimmt. Die Bewertung des Implementierungsfortschritts sollte daher von mehreren Personen aus unterschiedlichen Fachabteilungen durchgeführt werden, wodurch eine einseitige subjektive Verzerrung minimiert werden kann.

Reliabilität: Die Reliabilität, auch Zuverlässigkeit genannt, gilt bei diesem Lösungsansatz als vollumfänglich erfüllt, wenn im Zuge der ersten beiden Anwendungsphasen (siehe Abbildung 5-27) die Datengrundlage für das Simulationsmodell entsprechend den zur Verfügung gestellten Hilfsmitteln (siehe Abschnitt 5.3.4) aufbereitet wird. Unter diesen Voraussetzungen liefert das systemdynamische Simulationsmodell bei identischen Modellparametern und Wirkbeziehungen zwischen den Lean-Production- und Industrie-4.0-Elementen reproduzierbare Lean-4.0-Implementierungsstrategien. Dabei ist die Reliabilität sowohl für die Implementierungsreihenfolge der Methoden und Technologien als auch für deren simulierten Einfluss auf die produktionsrelevanten Zielgrößen gegeben.

Validität: Zur Sicherstellung der Korrektheit der Methode und des Simulationsmodells wurden, einem iterativen Forschungsvorgehen folgend, die einzelnen Lösungsbausteine und Teilergebnisse bereits während der Ausarbeitung durch Expertinnen und Experten aus Industrie und Forschung diskutiert und geprüft. Zudem wurde der Lösungsansatz in einen prototypischen Demonstrator überführt, um die Korrektheit des Gesamtansatzes im Zuge von industriellen Anwendungen bei vier Unternehmen zu prüfen. Die Fachleute bestätigten dabei die Korrektheit der generierten Lösungsergebnisse, wodurch das methodische Vorgehen und das Simulationsmodell als funktionstüchtig deklariert werden können.

Anwendbarkeit: Die Anwendungsmethode und das Simulationsmodell ermöglichen eine systematische und zielorientierte Durchführung der Arbeitsschritte zur Entwicklung einer unternehmensspezifischen Lean-4.0-Implementierungsstrategie. Als Voraussetzung für die Umsetzung der Vorbereitungsphase (Phase 1) werden von den Benutzenden keine tiefergehenden Spezialkompetenzen oder -kenntnisse benötigt. Die zweite Phase, die die Bestandsanalyse der Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien beinhaltet, setzt grundlegendes produktionstechnisches Fachwissen voraus. Zudem sind vertiefte Kenntnisse in den Bereichen Lean Production und Industrie 4.0 hilfreich. Die dritte Phase besteht aus der Simulation der Lean-4.0-Implementierungsstrategie sowie dem Einfluss dieser auf produktionsrelevante Zielgrößen. Damit diese Phase vom Unternehmen eigenständig durchgeführt werden kann, sollten fortgeschrittene Kenntnisse zur Entwicklung einer systemdynamischen Ablaufsimulation vorhanden sein. Die Datengrundlage und die Modellstrukturen können dabei der vorliegenden Arbeit entnommen werden. Alternativ kann

die Lean-4.0-Implementierungsstrategie, wie in den Anwendungsbeispielen aufgezeigt, in Kooperation mit dem *iwb* abgeleitet werden.

Nachvollziehbarkeit: Die einzelnen Methodenbausteine, geordnet in die drei Phasen Vorbereitung, Bewertung und Auswahl sowie Simulation, sind für die Benutzenden in einer Anwendungsmethode strukturiert und mit zusätzlichen Dokumenten umfassend und zielgruppengerecht beschrieben. Die Datengrundlage in Form der Wirkverknüpfungen zwischen Lean-Methoden, Industrie-4.0-Technologien und den Zielgrößen sowie die Technologie- und Methodensteckbriefe werden den nutzenden Personen ebenfalls zur Verfügung gestellt. Da die Simulation der Lean-4.0-Implementierungsstrategie einen hohen Grad an Komplexität mit sich bringt, wurden im Zuge der industriellen Anwendung Rückfragen seitens der nutzenden Personen gestellt. Die Fragen wurden anschließend in die Hilfsmittel integriert, wodurch die Nachvollziehbarkeit als vollständig gegeben bewertet wird.

Nachdem die allgemeinen Anforderungen untersucht wurden, werden nachfolgend die inhaltlichen Kriterien bewertet. Diese sind aus den Forschungsfragen aus Abschnitt 1.2 abgeleitet und lassen sich in drei Hauptgruppen untergliedern. Nachfolgend wird der Erfüllungsgrad je inhaltlicher Anforderung diskutiert und festgelegt.

Spezifikation und Auswahl: Mit Verweis auf Forschungsfrage 1 gilt es, die ausgewählten Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien zu spezifizieren, um darauf basierend eine strukturierte Auswahl der Methoden und Technologien für die Benutzenden zu entwickeln. Die Spezifikation der Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien erfolgte durch die Analyse von Anwendungsbeispielen aus der Industrie, umfassende strukturierte Literaturanalysen sowie die Befragung von Fachleuten aus Industrie und Forschung in verschiedenen Studien. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse wurden, basierend auf einem entwickelten morphologischen Kasten, in 20 Lean-Production-Methodensteckbriefe und 26 Industrie-4.0-Technologiesteckbriefe überführt. Für die strukturierte Auswahl der Lean-Production- und Industrie-4.0-Verbesserungsprojekte gilt es, zunächst die Wesensmerkmale eines ausgewählten Produktionsbereichs mithilfe einer erarbeiteten Typisierungsmatrix zu charakterisieren. Dies bildet die Grundlage, um mithilfe der 20 Lean-Production-Methodensteckbriefe und der 26 Industrie-4.0-Technologiesteckbriefe sowie unter Berücksichtigung der Gewichtung der produktionsrelevanten Zielgrößen die für den jeweiligen Produktionsbereich relevanten Verbesserungsprojekte zu identifizieren. Durch die Steckbriefe und die zur Verfügung gestellten Hilfsmittel gilt Forschungsfrage 1 zur Spezifikation und Auswahl der Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien als beantwortet und die damit verbundenen Anforderungen wurden vollumfänglich erfüllt.

Interdependenzen: Die Interdependenzen zwischen den Lean-Production-Methoden und den Industrie-4.0-Technologien sowie deren Einfluss auf die produktionsrelevanten Zielgrößen wurden im Zuge von Lösungsbaustein 2 umfassend analysiert. Bei der Bewertung der Interdependenzen von zwei Methoden respektive Technologien wurde zwischen der Art und der Intensität der vorherrschenden Wirkbeziehung differenziert. Dabei können die Elemente entweder eine unterstützende oder eine voraussetzende Interdependenz mit einer positiven oder negativen Intensität aufweisen. Während eine unterstützende Wirkverknüpfung keinen direkten Einfluss auf die Implementierungsreihenfolge nimmt, führt eine voraussetzende Beziehung dazu, dass zunächst alle als vorausgesetzt deklarierten Elemente implementiert sein müssen, ehe das davon abhängige Lean- oder Industrie-4.0-Element eingeführt werden kann. Zudem können die Interdependenzanalysen in Untersuchungsbereiche unterteilt werden. So wurden die Wirkverknüpfungen innerhalb der Lean-Production-Methoden und innerhalb der Industrie-4.0-Technologien sowie zwischen beiden Produktionsdomänen in bidirektionaler Form untersucht. Zusammenfassend ist diese Anforderung vollständig erfüllt und somit Forschungsfrage 2 beantwortet.

Implementierungsstrategie: Durch die erarbeitete Anwendungsmethode und das systemdynamische Simulationsmodell können allgemeingültige und unternehmensindividuelle Lean-4.0-Implementierungsstrategien und deren Einfluss auf produktionsrelevante Zielgrößen für produzierende Unternehmen entwickelt werden. Durch die Anpassung der Modellparameter ist es dabei möglich, unternehmensspezifische Gegebenheiten zu berücksichtigen und die für den Produktionsbereich relevanten Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien auszuwählen. Als Ergebnis können so auf Methoden- und Technologieebene allgemeingültige und unternehmensindividuelle Implementierungsstrategien simulativ generiert und verglichen werden. Durch den systemdynamischen Ansatz werden Rückkopplungseffekte zwischen den Elementen beispielsweise bei unterstützenden Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien berücksichtigt. Es kann folglich festgehalten werden, dass durch die vorliegende Forschungsarbeit die Forschungsfrage 3 (siehe Abschnitt 1.2) beantwortet ist und die daraus abgeleiteten Anforderungen vollumfänglich erfüllt sind.

Nach der Bewertung der in Abschnitt 4.1 definierten Anforderungen bleibt zusammenfassend festzuhalten, dass das entwickelte Simulationsmodell in Kombination mit der vorgestellten Anwendungsmethode alle allgemeinen und inhaltlichen Anforderungen erfüllt und die forschungsleitenden Fragestellungen aus Abschnitt 1.2 vollständig beantwortet. Somit adressiert der Lösungsansatz den aufgezeigten Handlungsbedarf (siehe Abschnitt 3.4) und bietet einen anwendungsorientierten und nachvollziehbaren Lösungsansatz zur Entwicklung allgemeingültiger und unternehmensspezifischer Lean-4.0-

Implementierungsstrategien, die den Einfluss auf produktionsrelevante Zielgrößen abbilden.

6.3.4 Kritische Reflexion

Im Zuge der kritischen Reflexion des Simulationsmodells und der Anwendungsmethode gilt es, auf die systematischen Limitationen gesondert einzugehen. Hierfür werden die einzelnen Lösungsbausteine kritisch betrachtet und deren Einschränkungen erläutert.

In *Lösungsbaustein 1* wurden die Lean- und Industrie-4.0-Elemente ausgewählt und mithilfe eines morphologischen Kastens spezifiziert. Die Auswahl umfasst aktuell eine Selektion von 20 Lean-Methoden und 26 Industrie-4.0-Technologien, die eine hohe Relevanz für produzierende Unternehmen besitzen. Da es sich speziell im Bereich von Industrie 4.0 um ein vergleichsweise junges Forschungsfeld handelt, ist davon auszugehen, dass den Unternehmen künftig weitere innovative Technologien zur Verfügung stehen werden. Diese gilt es unter Berücksichtigung ihres Technologiereifegrads in das Simulationsmodell und die Anwendungsmethode aufzunehmen und deren Interdependenzen zu analysieren. Des Weiteren umfasst die Spezifikation der Lean- und Industrie-4.0-Elemente verschiedene Merkmale wie die Zielgrößen oder den Technologiereifegrad. Dabei gestaltete sich insbesondere die Abschätzung der Implementierungsdauer je Element als herausfordernd, da diese von unternehmensspezifischen Gegebenheiten wie der Anzahl der in einem Bereich tätigen Mitarbeitenden oder dem vorherrschenden Produktionsprinzip abhängt. Gemäß den Validierungsergebnissen liefern die angegebenen maximalen und minimalen Implementierungsdauern je Methode und Technologie realitätsnahe Richtwerte, die unter Umständen unternehmensspezifisch angepasst werden müssen. Zudem wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit ausschließlich zeitliche Aufwände betrachtet. Die Simulation sollte künftig um monetäre Aufwände, beispielsweise fixe und variable Kosten, sowie um die erwartbaren monetären Erträge erweitert werden, um den Gesamtaufwand und -ertrag der Lean-4.0-Implementierungsoptionen vergleichen zu können. Eine weitere Limitation stellt die Bewertung der Initialwerte der Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien dar. Die verwendete Bewertungsskala dient als Orientierungshilfe, wobei die erforderlichen Merkmalscharakteristika in den einzelnen Implementierungsstufen nicht explizit für jede Methode und Technologie beschrieben sind. Somit kann auf Seiten der Anwendung eine subjektiv geprägte Bewertung des initialen Implementierungsstands erfolgen, die Einfluss auf die simulierte Lean-4.0-Implementierungsstrategie nimmt. Die Bewertung des Implementierungsfortschritts sollte daher von mehreren Personen aus unterschiedlichen Fachabteilungen durchgeführt werden, wodurch eine Verzerrung minimiert werden kann.

In *Lösungsbaustein 2* wurden die Interdependenzen der Lean- und Industrie-4.0-Elemente innerhalb verschiedener Untersuchungsbereiche analysiert. Die Interdependenzanalyse im Bereich Industrie 4.0 stützt sich dabei auf eine umfassende Analyse industrieller Anwendungsfälle. Da sich der Lean-4.0-Ansatz noch in einer frühen Entwicklungsphase befindet, konnten keine umfassenden industriellen Anwendungsfallanalysen durchgeführt werden. Die ausführliche Literaturanalyse und die durchgeführte Delphi-Studie sowie die abschließende Validierung der Simulationsergebnisse sollten daher im Zuge fortführender Forschungsarbeiten durch die Untersuchung praktischer Anwendungsfälle ergänzt werden.

In *Lösungsbaustein 3* wurde ein systemdynamisches Simulationsmodell zur Entwicklung allgemeiner und unternehmensspezifischer Lean-4.0-Implementierungsstrategien entwickelt sowie eine Anwendungsmethode für die Unternehmen präsentiert. Die Ableitung der Implementierungsstrategie durchläuft drei Phasen. Diese sind durch bereitgestellte Hilfsmittel transparent und benutzendenfreundlich aufgebaut. Da es sich bei dem entwickelten Simulationsmodell um einen prototypischen Demonstrator handelt, gestaltet sich die Ableitung der unternehmensspezifischen Lean-4.0-Implementierungsstrategien in Phase 3 bislang als zeit- und arbeitsintensiv. Dies könnte beispielsweise durch automatisierte Schnittstellen zwischen den Hilfsmitteln und dem Simulationsmodell verbessert werden.

Trotz der aufgeführten Limitation wurden ein systemdynamisches Simulationsmodell sowie eine Anwendungsmethode entwickelt, die Unternehmen dazu befähigen, unternehmensspezifische Lean-4.0-Implementierungsstrategien abzuleiten und so die produktionsrelevanten Zielgrößen nachhaltig zu verbessern. Dabei können Produktionsbereiche typisiert werden, um darauf basierend relevante Lean- und Industrie-4.0-Elemente auszuwählen und deren vorherrschenden Implementierungszustand zu bewerten. Die systemische und zielgerichtete Entwicklung einer Implementierungsstrategie für Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien und deren folgende Umsetzung führt zu einer Reduktion der Produktionskosten und der Durchlaufzeit. Zudem können dadurch die Qualität, Flexibilität sowie die soziale und ökologische Nachhaltigkeit im Produktionsbereich gesteigert werden. Das strukturierte Entwicklungsvorgehen stellt sicher, dass keine relevanten Modellparameter vernachlässigt werden und bei der Ausarbeitung der Lean-4.0-Implementierungsstrategie keine überflüssigen Kosten und keine vermeidbaren Aufwände erzeugt werden. Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass die übergeordnete Zielsetzung der Arbeit – die Befähigung produzierender Unternehmen zur Entwicklung einer unternehmensindividuellen und allgemeingültigen Lean-4.0-Implementierungsstrategie – erreicht werden konnte. Zudem konnten Lean- und Industrie-4.0-Elemente detailliert spezifiziert und deren Interdependenzen aufgezeigt werden. Dies schafft einen entscheidenden Beitrag zur Sicherung und zum Ausbau der Wettbewerbsfähigkeit von produzierenden Unternehmen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Produzierende Unternehmen agieren in einem zunehmend kompetitiven Umfeld, das geprägt ist durch steigende Qualitätsanforderungen, dynamische Produktlebenszyklen sowie einen wachsenden Kosten- und Innovationsdruck auf die Produkte und Produktionsabläufe über die gesamte Wertschöpfungskette. Dieses Umfeld erfordert eine flexible, reaktions-schnelle und resiliente Organisationsstruktur in Verbindung mit einer Strategie zur Verschlankung und Digitalisierung der Produktionsprozesse. Im Zentrum dieser Transformation steht die stetige Verbesserung von Produktions- und Logistiksystemen im Sinne von Lean Production und Industrie 4.0. Während es sich bei Industrie 4.0 um einen technologiegetriebenen Ansatz handelt, besitzt Lean Production einen vornehmlich mensch- und organisationszentrierten Fokus. Erst die Verschränkung von Lean Production und Industrie 4.0 im Sinne von Lean 4.0 kann eine ganzheitliche Betrachtung des Transformationsprozesses gewährleisten. Im Zuge der nachhaltigen Einführung von Lean 4.0 fehlt es produzierenden Unternehmen allerdings an einer allgemeinen sowie unternehmensspezifischen Implementierungsstrategie, die die Wirkbeziehungen zwischen den Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien berücksichtigt sowie den Einfluss auf produktionsrelevante Zielgrößen aufzeigt.

Die in der vorliegenden Forschungsarbeit entwickelte Methode beinhaltet eine dreistufige Vorgehensweise sowie ein systemdynamisches Simulationsmodell, die die Ableitung einer allgemeingültigen sowie unternehmensindividuellen Lean-4.0-Implementierungsstrategie ermöglichen. Dazu wurden Hilfsmittel zur Typisierung von Produktionsbereichen sowie zur Bewertung des Lean-4.0-Implementierungsfortschritts erarbeitet. Dies bildet die Grundlage für eine strukturierte Auswahl relevanter Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien, die in Kombination mit unternehmensindividuellen Modellparametern und unter Anwendung eines System-Dynamics-Simulationsmodells in eine Lean-4.0-Implementierungsreihenfolge überführt werden. Durch die erarbeitete Methode wird eine unternehmensindividuelle und konsistente Implementierungsreihenfolge der Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien generiert sowie der Einfluss auf die produktionsrelevanten Zielgrößen Zeit, Kosten, Qualität, Flexibilität sowie ökologische und ökonomische Nachhaltigkeit aufgezeigt. Folglich erhalten produzierende Unternehmen eine auf ihre Gegebenheiten angepasste interdependenzbasierte Lean-4.0-Implementierungsstrategie, die die zeitlichen Implementierungsaufwände und den Einfluss auf produktionsrelevante Zielgrößen berücksichtigt und so einen konkreten Implementierungsplan zur nachhaltigen Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit für das Unternehmen bereitstellt.

Aus wissenschaftlicher Sicht leistet die vorliegende Forschungsarbeit einen Beitrag dazu, die Interdependenzen einzelner Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien aus verschiedenen Perspektiven umfassend zu analysieren. Dadurch können interdependenzbasierte unternehmensspezifische Lean-4.0-Implementierungsstrategien entwickelt werden, die Synergieeffekte zwischen den Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien berücksichtigen.

Der künftige Forschungsbedarf wird vor allem in den nachfolgenden drei Säulen gesehen:

Säule 1 / *Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien*: Da sich fortwährend neue innovative Industrie-4.0-Technologien auf dem Markt etablieren, die weitreichende Potenziale für Produktionsabläufe aufweisen können, muss die Auswahl der Industrie-4.0-Technologien kontinuierlich angepasst werden. Zudem können weitere Lean-Production-Methoden in die Auswahl integriert und spezifiziert werden. Für die neu hinzugefügten Technologien und Methoden gilt es, die Interdependenzart und -intensität wissenschaftlich fundiert zu bestimmen. Des Weiteren könnte das systemdynamische Simulationsmodell um die initial anfallenden und laufenden Kosten sowie die erwartbaren monetären Erträge der Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien erweitert werden. Dies ermöglicht es Unternehmen, neben den zeitlichen auch die monetären Aufwände und Erträge zu berücksichtigen. Zudem sollte ergänzend zur Implementierungsstrategie ein Reifegradmodell entwickelt werden, das den Implementierungsfortschritt der Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien anhand definierter Merkmale bestimmt.

Säule 2 / *Betrachtungsbereich*: Die in dieser Arbeit entwickelte Methode zur Ableitung einer Lean-4.0-Implementierungsstrategie fokussiert sich auf die Einführung von Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien im Bereich der Produktion. Ein zusätzlicher Forschungsbedarf besteht darin, die Implementierungsstrategie auf weitere Bereiche zu übertragen und somit die Wertschöpfungskette und die darin enthaltenen primären und sekundären Prozesse ganzheitlich zu verbessern.

Säule 3 / *Evaluation und Langzeitstudie*: Abschließend könnte die Evaluation auf weitere Unternehmen aus verschiedenen Branchen und mit unterschiedlichen Produktionstypologien erweitert werden. Die gesammelten Informationen zu den vorherrschenden Produktionstypologien und den ausgewählten Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien könnten in eine Wissensdatenbank überführt werden und den künftigen Auswahlprozess unterstützen. Abschließend könnte eine Langzeitstudie in produzierenden Unternehmen durchgeführt werden, verbunden mit dem Ziel, den Nutzen und die Effektivität der Lean-4.0-Implementierungsstrategien zu bestimmen. Somit ließe sich eine quantitative Bewertung des Simulationsmodells und der Anwendungsmethode zur Ableitung einer unternehmensindividuellen Lean-4.0-Implementierungsstrategie durchführen.

Literaturverzeichnis

AICHELE 1997

Aichele, C.: Definition und Diskussion der Kennzahlen und Kennzahlenanalysen zur Geschäftsprozeßoptimierung in produzierenden Unternehmen. In: Aichele, C. (Hrsg.): Kennzahlenbasierte Geschäftsprozeßanalyse. Wiesbaden: Gabler Verlag 1997, S. 72-148. ISBN: 978-3-322-84499-6.

ALTER 2003

Alter, S.: 18 Reasons Why IT-Reliant Work Systems Should Replace "The IT Artifact" as the Core Subject Matter of the IS Field. Communications of the Association for Information Systems 12 (2003), S. 23.

AMORTH 2020

Amorth, S.: Correlation of Lean Management and Industry 4.0. (Masterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*), Technische Universität München. München (2020).

ANDERL ET AL. 2016

Anderl, R.; Picard, A.; Fleischer, J.; Wang, Y.; Dorsch, S.; Klee, B.; Bauer, J.: Guideline Industrie 4.0 - Guiding principles for the implementation of Industrie 4.0 in small and medium sized businesses. Frankfurt am Main: VDMA Verlag 2016. ISBN: 978-3-8163-0687-0.

ARMENAKIS ET AL. 1993

Armenakis, A. A.; Harris, S. G.; Mossholder, K. W.: Creating Readiness for Organizational Change. Human Relations 46 (1993) 6, S. 681-703.

ATKINSON 1999

Atkinson, R.: Project management: cost, time and quality, two best guesses and a phenomenon, its time to accept other success criteria. International Journal of Project Management 17 (1999) 6, S. 337-342.

AULL 2012

Aull, F.: Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden. (Zugl.: München, Univ., Diss., 2012). Technische Universität München. München: Utz 2012. ISBN: 978-3-8316-4283-0.

BAGHERI ET AL. 2015

Bagheri, B.; Yang, S.; Kao, H.-A.; Lee, J.: Cyber-physical Systems Architecture for Self-Aware Machines in Industry 4.0 Environment. IFAC-PapersOnLine 48 (2015) 3, S. 1622-1627.

BAKHTARI ET AL. 2020

Bakhtari, A. R.; Kumar, V.; Waris, M. M.; Sanin, C.; Szczerbicki, E.: Industry 4.0 Implementation Challenges in Manufacturing Industries: an Interpretive Structural Modelling Approach. Procedia Computer Science 176 (2020), S. 2384-2393.

BALL & TUNGER 2005

Ball, R.; Tunger, D.: Bibliometrische Analysen - Daten, Fakten und Methoden. Grundwissen Bibliometrie für Wissenschaftler, Wissenschaftsmanager, Forschungseinrichtungen und Hochschulen. Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek 2005. ISBN: 3-89-336-383-1.

BARIG & BALZEREIT 2019

Barig, B.; Balzereit, K.: Assistance systems for industry 4.0 environments. Embedded world Conference 17 (2019).

BARTODZIEJ 2017

Bartodziej, C. J.: The Concept Industry 4.0. Wiesbaden: Springer Gabler 2017. ISBN: 978-3-658-16501-7.

BARTOLOMEI ET AL. 2012

Bartolomei, J. E.; Hastings, D. E.; Neufville, R. de; Rhodes, D. H.: Engineering Systems Multiple-Domain Matrix: An organizing framework for modeling large-scale complex systems. Systems Engineering 15 (2012) 1, S. 41-61.

BAUER ET AL. 2014

Bauer, W.; Schlund, S.; Marrenbach, D.; Ganschar, O.: Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland. Studie. BITKOM. Berlin. 2014.

BAUERNHANSL ET AL. 2014

Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, · Technologien, · Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014. ISBN: 978-3-658-04681-1.

BAUR & BLASIUS 2014

Baur, N.; Blasius, J. (Hrsg.): Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung. Wiesbaden: Springer VS 2014. ISBN: 978-3-531-18939-0.

BEINKE & BEINKER 2012

Beinke, T.; Beinker, D.: Lean Management in der Kleinserienfertigung. Effizienzsteigerung bei der Produktion von Windkrafttürmen. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF 107 (2012) 9, S. 666-670.

BERNHARD 2022

Bernhard, O.: Strategie und Roadmap für die Lean-4.0-Transformation. (Masterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*), Technische Universität München. Garching (2022).

BERTAGNOLLI 2018

Bertagnolli, F.: Lean Management. Einführung und Vertiefung in die japanische Management-Philosophie. Wiesbaden: Springer Gabler 2018. ISBN: 978-3-658-13123-4.

BERTONI ET AL. 2017

Bertoni, M.; Rondini, A.; Pezzotta, G.: A Systematic Review of Value Metrics for PSS Design. Procedia CIRP 64 (2017), S. 289-294.

BICHENO & HOLWEG 2016

Bicheno, J.; Holweg, M.: The Lean Toolbox. A Handbook for Lean transformation. 5. Auflage. Buckingham: Piccie Books (Hrsg.). 2016. ISBN: 978-0956830753.

BICK 2014

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

BITITCI ET AL. 1997

Bititci, U. S.; Carrie, A. S.; McDevitt, L.: Integrated performance measurement systems: a development guide. *International Journal of Operations & Production Management* 17 (1997) 5, S. 522-534.

BITKOM 2014

BITKOM: Big-Data-Technologien – Wissen für Entscheider. Leitfaden.

<<https://www.bitkom.org/sites/default/files/file/import/140228-Big-Data-Technologien-Wissen-fuer-Entscheider.pdf>> - 22.12.2022.

BITKOM ET AL. 2015

BITKOM.; VDA; ZVEI: Umsetzungsstrategie Industrie 4.0. Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0.

<<https://www.bitkom.org/sites/default/files/file/import/150410-Umsetzungsstrategie-0.pdf>> - 25.08.2022.

BLANCHET ET AL. 2014

Blanchet, M.; Rinn, T.; Thaden, G. von; Thieulloy, G. de: Industry 4.0 – The new industrial revolution – How Europe will succeed. München: Roland Berger (Hrsg.) 2014.

BLESSING & CHAKRABARTI 2009

Blessing; Chakrabarti: DRM, a design research methodology. London: Springer Verlag 2009. ISBN: 978-1-84882-586-4.

BMWK & BMBF 16.06.2022

BMWK; BMBF: Plattform Industrie 4.0. <<https://www.plattform-i40.de/PI40/Navigation/Karte/SiteGlobals/Forms/Formulare/EN/map-use-cases-formular.html>> - 16.06.2022.

BOGNER ET AL. 2017

Bogner, E.; Kästle, C.; Franke, J.; Beitinger, G.: Intelligent vernetzte Elektronikproduktion. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Carl Hanser 2017, S. 653-690. ISBN: 978-3-446-44642-7.

BORTZ & DÖRING 2006

Bortz, J.; Döring, N.: Qualitative Methoden. In: Bortz, J. et al. (Hrsg.): Forschungsmethoden und Evaluation. 5. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2006, S. 295-350. ISBN: 978-3-540-33305-0.

BOSSE & ZINK 2019

Bosse, C. K.; Zink, K. J.: Arbeit 4.0 im Mittelstand. Chancen und Herausforderungen des digitalen Wandels für KMU. Berlin: Springer Gabler 2019. ISBN: 978-3-662-59473-5.

BOSSEL 1992

Bossel, H.: Modellbildung und Simulation. Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme. Deutschland: Vieweg+Teubner 1992. ISBN: 978-3-528-05242-3.

BRACHT ET AL. 2018

Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S.: Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele. Springer-Verlag GmbH. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2018. ISBN: 978-3-662-55782-2.

BREITKOPF 2018

Breitkopf, N.: Adaptive Assistenz in der Produktion. Eine Methodik zur individuellen Mitarbeiterbefähigung. (Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2018). Ruhr-Universität Bochum. Bochum: Shaker 2018. ISBN: 978-3-8440-5904-5.

BRUNDTLAND 1987

Brundtland: Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. Geneva. 1987. UN-Dokument A/42/427. <<http://www.un-documents.net/ocf-ov.htm>> - 16.06.2022.

BRUNNER 2008

Brunner, F. J.: Japanische Erfolgskonzepte. KAIZEN, KVP, Lean Production Management, Total Productive Maintenance, Shopfloor Management, Toyota Production Management. München: Carl Hanser 2008. ISBN: 978-3-446-41527-0.

BUDAK ET AL. 2018

Budak, A.; Ustundag, A.; Kiliç, M.; Cevikcan, E.: Digital Traceability Through Production Value Chain. In: Ustundag, A.; Cevikcan, E. (Hrsg.): Industry 4.0: Managing the Digital Transformation. Switzerland: Springer Nature 2018, S. 251-265. ISBN: 783-3-19-57869-9.

BUER ET AL. 2018

Buer, S.-V.; Strandhagen, J. O.; Chan, F. T.: The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: mapping current research and establishing a research agenda. International Journal of Production Research 56 (2018) 8, S. 2924-2940.

BURGGRÄF ET AL. 2017

Burggräf, P.; Dannapfel, M.; Voet, H.; Bök, P.-B.; Uelpenich, J.; Hoppe, J.: Digital Transformation Of Lean Production: Systematic Approach For The Determination Of Digitally Pervasive Value Chains. International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering 11 (2017) 10, S. 2476-2485.

BURGGRÄF ET AL. 2020

Burggräf, P.; Lorber, C.; Pyka, A.; Wagner, J.; Weißer, T.: Kaizen 4.0 Towards an Integrated Framework for the Lean-Industry 4.0 Transformation. In: Arai, K. et al. (Hrsg.): Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC) 2019. Cham: Springer 2020, S. 692-709. ISBN: 978-3-030-32522-0.

BURKHART 2020

Burkhart, A.: Führung zwischen Tradition und Wandel. In: Burkhart, A. (Hrsg.): Wirksame Führung in Banken und Sparkassen. Wiesbaden: Springer Gabler 2020, S. 77-119. ISBN: 978-3-658-29030-6.

BUSCHER & BÖGER 2017

Buscher, U.; Böger, F.: Wie sich Industrie 4.0 und Lean gegenseitig befruchten. Der Einfluss auf die strategischen Erfolgsfaktoren. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF 112 (2017) 9, S. 518-521.

BUSSE 2017

Busse, M.: Implementierung Lean Management - Ein ganzheitliches Vorgehensmodell zur nachhaltigen Implementierung des Lean Managements in KMU. (Zugl.: Cottbus, Univ., Diss., 2017). Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg. Cottbus: 2017.

CENGIZ ET AL. 2021

Cengiz, K.; Sharma, R.; Kottursamy, K.; Singh, K. K.; Topac, T.; Ozyurt, B.: Recent Emerging Technologies for Intelligent Learning and Analytics in Big Data. In: Kumar, R. et al. (Hrsg.): Multimedia Technologies in the Internet of Things Environment. Singapore: Springer 2021, S. 69-81. ISBN: 978-981-15-7964-6.

CIANO ET AL. 2020

Ciano, M. P.; Dallasega, P.; Orzes, G.; Rossi, T.: One-to-one relationships between Industry 4.0 technologies and Lean Production techniques: a multiple case study. *International Journal of Production Research* (2020), S. 1-25.

COYLE 1996

Coyle, R. G.: *System Dynamics Modelling. A Practical Approach*. 1. Edition. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC 1996. ISBN: 978-0412617102.

DALKEY & HELMER 1963

Dalkey, N.; Helmer, O.: An Experimental Application of the DELPHI Method to the Use of Experts. *Management Science* 9 (1963) 3, S. 458-467.

DAVIES ET AL. 2017

Davies, R.; Coole, T.; Smith, A.: Review of Socio-technical Considerations to Ensure Successful Implementation of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing* 11 (2017), S. 1288-1295.

DENNIS 2017

Dennis, P.: *Lean Production Simplified: A Plain Language Guide to the World's Most Powerful Production System*. 3rd Edition. New York: Taylor & Francis Ltd 2017. ISBN: 978-1138438071.

DERVIS 2020

Dervis, M. Y.: Deriving a Guideline Model for Efficient Implementation of Industrie 4.0 in Existing Lean Production Systems. (Semesterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*), Technische Universität München. Garching (2020).

DERVIS 2021

Dervis, M. Y.: Developing a Decision-Making Approach to Derive Individual Lean 4.0 Implementation Strategies Based on System-Dynamics-Modeling. (Masterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*), Technische Universität München. Garching (2021).

DESTATIS 2022

Statistisches Bundesamt (Destatis): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. Inlandsproduktberechnung Vierteljahresergebnisse. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Publikationen/Downloads-Inlandsprodukt/inlandsprodukt-vierteljahr-pdf-2180120.pdf?__blob=publicationFile> - 16.06.2022.

DEUSE ET AL. 2020

Deuse, J.; Dombrowski, U.; Nöhring, F.; Mazarov, J.; Dix, Y.: Systematic combination of Lean Management with digitalization to improve production systems on the example of Jidoka 4.0. *International Journal of Engineering Business Management* 12 (2020).

DÍAZ-REZA ET AL. 2016

Díaz-Reza, J.; García-Alcaraz, J.; Martínez-Loya, V.; Blanco-Fernández, J.; Jiménez-Macías, E.; Avelar-Sosa, L.: The Effect of SMED on Benefits Gained in Maquiladora Industry. *Sustainability* 8 (2016) 12, S. 1-18.

DICKMANN 2015

Dickmann, P.: *Schlanker Materialfluss. Mit Lean Production, Kanban und Innovationen*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2015. ISBN: 978-3-662-44868-7.

DIETRICH ET AL. 2007

Dietrich, E.; Schulze, A.; Weber, S.: Kennzahlensystem für die Qualitätsbeurteilung in der industriellen Produktion. 1. Auflage. München, Wien: Carl Hanser 2007. ISBN: 978-3-446-41053-4.

DILLINGER ET AL. 2020

Dillinger, F.; Formann, F.; Reinhart, G.: Lean Production und Industrie 4.0 in der Produktion. Eine Studie zur Wechselwirkung und den gemeinsamen Potenzialen. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF 115 (2020) 10, S. 738-741.

DILLINGER ET AL. 2021a

Dillinger, F.; Kagerer, M.; Reinhart, G.: Concept for the development of a Lean 4.0 reference implementation strategy for manufacturing companies. Procedia CIRP 104 (2021), S. 330-335.

DILLINGER ET AL. 2021b

Dillinger, F.; Meßmer, C.; Reinhart, G.: Industrie-4.0-Technologiekreis für produzierende Unternehmen. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF 116 (2021) 9, S. 639-643.

DILLINGER ET AL. 2021c

Dillinger, F.; Martl, N.; Reinhart, G.: Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien in der Produktion. Eine Studie zur Einführungsdauer und Relevanz. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF 116 (2021) 12, S. 951-956.

DILLINGER ET AL. 2022a

Dillinger, F.; Kophal, A.; Reinhart, G.: Analysis of the Impact of Lean Production Methods and Industry 4.0 Technologies on Sustainability and Flexibility in the Production. In: Herberger, D.; Hübner, M. (Hrsg.): Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics: CPSL 2022. Hannover: publish-Ing 2022, S. 319-328.

DILLINGER ET AL. 2022b

Dillinger, F.; Bernhard, O.; Kagerer, M.; Reinhart, G.: Industry 4.0 Implementation Sequence for Manufacturing Companies. Production Engineering (2022), S. 705-718.

DIN 9000

DIN 9000: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe. Berlin: Beuth 2015.

DOMBROWSKI ET AL. 2006

Dombrowski, U.; Palluck, M.; Schmidt, S.: Typologisierung Ganzheitlicher Produktionssysteme. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF 101 (2006) 10, S. 553-556.

DOMBROWSKI ET AL. 2017

Dombrowski, U.; Richter, T.; Krenkel, P.: Interdependencies of Industrie 4.0 & Lean Production Systems: A Use Cases Analysis. Procedia Manufacturing 11 (2017), S. 1061-1068.

DOMBROWSKI ET AL. 2018

Dombrowski, U.; Krenkel, P.; Falkner, A.; Placzek, F.; Hoffmann, T.: Prozessorientierte Potenzialanalyse von Industrie 4.0-Technologien. Zielorientiertes Auswahlverfahren. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF 113 (2018) 3, S. 107-111.

DOMBROWSKI & MIELKE 2015

Dombrowski, U.; Mielke, T.: Ganzheitliche Produktionssysteme. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2015. ISBN: 978-3-662-46163-1.

DOMBROWSKI & RICHTER 2016

Dombrowski, U.; Richter, T.: Ganzheitliche Produktionssysteme und Industrie 4.0. Prozessorientierung als Befähiger der Industrie 4.0. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF 111 (2016) 12, S. 771-774.

DÜRKOP & JASPERNEITE 2017

Dürkop, L.; Jasperneite, J.: „Plug & Produce“ als Anwendungsfall von Industrie 4.0. In: Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd.4. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2017. S. 59-71. ISBN: 978-3-662-53253-9.

EJSMONT ET AL. 2020

Ejmont, K.; Gladysz, B.; Corti, D.; Castaño, F.; Mohammed, W. M.; Martinez Lastra, J. L.: Towards 'Lean Industry 4.0' – Current trends and future perspectives. Cogent Business & Management 7 (2020) 1.

ERPENBECK 2012

Erpenbeck, J.: Zwischen exakter Nullaussage und vieldeutiger Beliebigkeit. In: Erpenbeck, J. (Hrsg.): Der Königsweg zur Kompetenz. Grundlagen qualitativ-quantitativer Kompetenzerfassung. Münster: Waxmann 2012, S. 7-42. ISBN: 978-3-8309-2489-0.

EVERSHEIM 1992

Eversheim, W.: Flexible Produktionssysteme. In: Frese, E. (Hrsg.): Handwörterbuch der Organisation. 3. Auflage. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 1992, S. 2058-2066. ISBN: 3-7910-8027-X.

FASTERMANN 2016

Fastermann, P.: 3D-Drucken. Wie die generative Fertigungstechnik funktioniert. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2016. ISBN: 978-3-662-49865-1.

FISCHER 2021

Fischer, B.: Konzeption und Darstellung von Lean-4.0-Methodensteckbriefen. (Semesterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*), Technische Universität München. Garching (2021).

FISCHER & KÖBLER 2018

Fischer, T.; Köbler, J.: Lean-Management und Industrie 4.0. Warum Lean-Management eine solide Grundlage für die vierte industrielle Revolution darstellt. Industrie 4.0 Management 2018 (2018) 6, S. 53-55.

FOIDL & FELDERER 2016

Foidl, H.; Felderer, M.: Research Challenges of Industry 4.0 for Quality Management. In: Felderer, M. et al. (Hrsg.): Innovations in enterprise information systems management and engineering. 4th International Conference, ERP Future 2015. Cham: Springer 2016, S. 121-137. ISBN: 978-3-319-32798-3.

FORD 2018

Ford, H.: Today and Tomorrow. Commemorative Edition of Ford's 1926 Classic. Portland: Routledge 2018. ISBN: 978-1-351-40805-9.

FORMANN 2022

Formann, F.: Entwicklung eines ganzheitlichen Reifegradmodells unter Berücksichtigung der Einflüsse von Lean Production und Industrie 4.0 auf Nachhaltigkeitsaspekte in der Produktion. (Masterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*), Technische Universität München. Garching (2022).

FORRESTER 1961

Forrester, J. W.: Industrial Dynamics. MIT Massachusetts Institute of Technology. Massachusetts: The M.I.T Press 1961.

FRANK 2014

Frank, H.: Lean Produktion versus Industrie 4.0: Gegner oder Verbündete? *Industrie Management* 30 (2014) 6, S. 17-20.

FU 2021

Fu, D. J.: Analyse der Wirkbeziehung zwischen verschiedenen Industrie-4.0-Technologien. (Bachelorarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*), Technische Universität München. Garching (2021).

GAJDZIK ET AL. 2021

Gajdzik, B.; Grabowska, S.; Saniuk, S.: A Theoretical Framework for Industry 4.0 and Its Implementation with Selected Practical Schedules. *Energies* 14 (2021) 4, S. 1-24.

GEBHARDT 2016

Gebhardt, A.: Additive Manufacturing. 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion. 5. Auflage. München: Carl Hanser 2016. ISBN: 978-3446444010.

GEISBERGER & BROY 2012

Geisberger, E.; Broy, M.: AgendaCPS. Integrierte Forschungsagenda; Cyber-Physical Systems. Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. Berlin, Heidelberg: Springer 2012. ISBN: 978-3-642-29098-5.

GHOUAT ET AL. 2021

Ghouat, M.; Haddout, A.; Benhadou, M.: Impact of Industry 4.0 Concept on the Levers of Lean Manufacturing Approach in Manufacturing Industries. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering* 18 (2021) 1.

GIBSON ET AL. 2021

Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B.; Khorasani, M.: Additive Manufacturing Technologies. 3rd ed. 2021. Cham: Springer; Imprint: Springer 2021. ISBN: 978-3-030-561277.

GILCHRIST 2016

Gilchrist, A.: Industry 4.0. The industrial internet of things. New York: Apress 2016. ISBN: 1484220463.

GIUSTO ET AL. 2010

Giusto, D.; Atzori, L.; Iera, A.; Morabito, G.: The Internet of Things. 20th Tyrrhenian Workshop on Digital Communications. New York: Springer 2010. ISBN: 978-1-4419-1674-7.

GLADEN 2014

Gladen, W.: Performance Measurement. Wiesbaden: Springer 2014. ISBN: 978-3-658-05137-2.

GORECKI & PAUTSCH 2014

Gorecki, P.; Pautsch, P.: Praxisbuch Lean Management. Der Weg zur operativen Excellence. 2., überarbeitete Auflage. München: Carl Hanser 2014. ISBN: 978-3-446-44286-3.

GORECKY ET AL. 2017

Gorecky, D.; Hennecke, A.; Schmitt, M.; Weyer, S.; Zühlke, D.: Wandelbare modulare Automatisierungssysteme. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Carl Hanser 2017, S. 555-583. ISBN: 978-3-446-44642-7.

GOTTMANN 2019

Gottmann, J.: Produktionscontrolling. Wertströme und Kosten optimieren. 2. Auflage. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Gabler 2019. ISBN: 978-3-658-22537-7.

GRAF 1996

Graf, G.: Das Phänomen Lean Management. Eine kritische Analyse. Gabler Wissenschaft. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag 1996. ISBN: 978-3-663-08339-9.

GREGORI ET AL. 2017

Gregori, F.; Papetti, A.; Pandolfi, M.; Peruzzini, M.; Germani, M.: Digital Manufacturing Systems: A Framework to Improve Social Sustainability of a Production Site. Procedia CIRP 63 (2017), S. 436-442.

GRIGORYEV 2021

Grigoryev, I.: Anylogic 7 in three days. A quick course in simulation modeling. Fifth edition. South Carolina: CreateSpace 2021. ISBN: 978-1-508-93374-8.

GRIME & WRIGHT 2014

Grime, M. M.; Wright, G.: Delphi Method. In: Balakrishnan, N. et al. (Hrsg.): Wiley StatsRef: Statistics Reference Online. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd 2014, S. 1-6. ISBN: 978-1-118-44511-2.

GRÖSSER 2018

Grösser, S.: Definition: System Dynamics. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
<<https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/system-dynamics-47445>> - 19.04.2022.

GROTH & KAMMEL 1994

Groth, U.; Kammel, A.: Lean Management. Konzept - Kritische Analyse - Praktische Lösungsansätze. Wiesbaden: Gabler 1994. ISBN: 978-3-322-90752-3.

GRÖTICKE 2014

Gröticke, I.: Einsatz von System Dynamics zur Modellierung des globalen Kupfersystems. (Zugl.: Gießen, Univ., Diss., 2013). Justus-Liebig-Universität Gießen. Gießen 2014.

GÜNTHER & TEMPELMEIER 2005

Günther, H.-O.; Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik. 6., verb. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2005. ISBN: 354023246X.

GÜNTHNER ET AL. 2013

Günthner, W. A.; Durchholz, J.; Klenk, E. M.; Boppert, J.: Schlanke Logistikprozesse. Handbuch für den Planer. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2013. ISBN: 978-3-642-38272-7.

HAAS 2018

Haas, M.: Deutscher Industrie 4.0 Index 2018. Eine Studie der Staufen AG und der Staufen Digital Neonex GmbH. <<https://www.staufen.ag/fileadmin/HQ/02-Company/05-Media/2-Studies/STAUFEN.-Studie-Industrie-4.0-Index-2018-Web-DE-de.pdf>> - 16.03.2022.

HAEDELER & WINTER 2000

Hadeler, T.; Winter, E.: Gabler Wirtschafts-Lexikon. die ganze Welt der Wirtschaft: Betriebswirtschaft - Volkswirtschaft - Recht - Steuern. 15., vollständ. überarb. und akt. Auflage. Wiesbaden: Gabler 2000. ISBN: 3409329986.

HANSCHKE 2018

Hanschke, I.: Digitalisierung und Industrie 4.0 - einfach und effektiv. Systematisch und lean die Digitale Transformation meistern. München: Carl Hanser 2018. ISBN: 978-3-446-45808-6.

HARWARDT ET AL. 2020

Harwardt, M.; Niermann, P. F.-J.; Schmutte, A. M.; Steuernagel, A.: Führen und Managen in der digitalen Transformation. Trends, Best Practices und Herausforderungen. 1. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler 2020. ISBN: 978-3-658-28669-9.

HAUFF 2021

Hauff, M. von: Nachhaltige Entwicklung. Grundlagen und Umsetzung. De Gruyter Oldenbourg. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg 2021. ISBN: 978-3-110-72253-6.

HELFRICH 2016

Helfrich, H.: Wissenschaftstheorie für Betriebswirtschaftler. Wiesbaden: Springer Gabler 2016. ISBN: 978-3-658-07035-9.

HERDER & AURICH 2015

Herder, C. F.; Aurich, J. C.: Concept for Assessment of Manual-Assembly Technologies. Applied Mechanics and Materials 794 (2015), S. 43-50.

HINES ET AL. 2004

Hines, P.; Holweg, M.; Rich, N.: Learning to evolve. International Journal of Operations & Production Management 24 (2004) 10, S. 994-1011.

HOFMANN & RÜSCH 2017

Hofmann, E.; Rüscher, M.: Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. Computers in Industry 89 (2017), S. 23-34.

HÖLLTHALER ET AL. 2018

Höllthaler, G.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Digital Lean Production An Approach to Identify Potentials for the Migration to a Digitalized Production System in SMEs from a Lean Perspective. Procedia CIRP 67 (2018), S. 522-527.

HÖLLTHALER 2022

Höllthaler, G.: Methodik zur Integration digitaler Technologien für Ganzheitliche Produktionssysteme (Zugl.: München, Univ., Diss., 2022). Technische Universität München. München: Utz Verlag 2022. ISBN: 978-3831649747.

HORNUNG & HOFMANN 2017

Hornung, G.; Hofmann, K.: Rechtsfragen bei Industrie 4.0: Rahmenbedingungen, Herausforderungen und Lösungsansätze. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Carl Hanser 2017, S. 191-212. ISBN: 978-3-446-44642-7.

HORVAT ET AL. 2018

Horvat, D.; Stahlecker, T.; Zenker, A.; Lerch, C.; Mladineo, M.: A conceptual approach to analyzing manufacturing companies' profiles concerning Industry 4.0 in emerging economies. Procedia Manufacturing 17 (2018), S. 419-426.

HUBER 2016

Huber, W.: Industrie 4.0 in der Automobilproduktion. Ein Praxisbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg 2016. ISBN: 978-3-658-12731-2.

IMAI 1986

Imai, M.: Kaizen (Ky'zen). The key to Japan's competitive success. 1. ed., print. New York: McGraw-Hill 1986. ISBN: 978-0-075-54332-9.

JAVAID ET AL. 2021

Javaid, M.; Haleem, A.; Singh, R. P.; Rab, S.; Suman, R.; Khan, S.: Exploring relationships between Lean 4.0 and manufacturing industry. *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application* 49 (2021), S. 402-414.

KAGERER 2021

Kagerer, M.: Konzeptentwicklung eines Reifegradmodells zur kennzahlen- & kompetenzgestützten Lean-4.0-Implementierung in der Produktion. (Masterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*), Technische Universität München. Garching (2021).

KAGERMANN ET AL. 2013

Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J.: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industry 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V. Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J. (Hrsg.). Frankfurt. 2013.

KAMARUL BAHRIN ET AL. 2016

Kamarul Bahrin, M. A.; Othman, M. F.; Nor Azli, N. H.; Talib, M. F.: Industry 4.0: A Review on Industrial Automation and robotic. *Jurnal Teknologi* 78 (2016), S. 6-13.

KARLSSON & ÅHLSTRÖM 1996

Karlsson, C.; Åhlström, P.: Assessing changes towards lean production. *International Journal of Operations & Production Management* 16 (1996) 2, S. 24-41.

KELLNER ET AL. 2020

Kellner, F.; Lienland, B.; Lukesch, M.: Produktionswirtschaft. Planung, Steuerung und Industrie 4.0. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler 2020. ISBN: 978-3-662-61445-7.

KLETTI & SCHUMACHER 2015

Kletti, J.; Schumacher, J.: Die perfekte produktion. *Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT)*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2015. ISBN: 978-3-662-45441-1.

KOLBERG ET AL. 2016

Kolberg, D.; Knobloch, J.; Zühlke, D.: Towards a lean automation interface for workstations. *International Journal of Production Research* 55 (2016) 10, S. 2845-2856.

KOLBERG 2018

Kolberg, D.: Entwicklung einer Referenzarchitektur zur Realisierung von Methoden der Lean Production mittels digitaler Technologien. (Zugl.: Kaiserslautern, Univ., Diss., 2018). Universität Kaiserslautern. Kaiserslautern: Grin Verlag 2018. ISBN: 978-3-668-92689-9.

KOLBERG & ZÜHLKE 2015

Kolberg, D.; Zühlke, D.: Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies. *IFAC-PapersOnLine* 48 (2015) 3, S. 1870-1875.

KOLLA ET AL. 2019

Kolla, S.; Minufekr, M.; Plapper, P.: Deriving essential components of lean and industry 4.0 assessment model for manufacturing SMEs. *Procedia CIRP* 81 (2019), S. 753-758.

KOPHAL 2021

Kophal, A.: Identifizierung von Lean-4.0-Methoden und Analyse des Einflusses von Lean-Management-Methoden und Industrie-4.0-Technologien auf die Nachhaltigkeit in der Produktion. (Semesterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*), Technische Universität München. Garching (2021).

KRAUS ET AL. 2006

Kraus, G.; Becker-Kolle, C.; Fischer, T.: *Handbuch Change-Management. Steuerung von Veränderungsprozessen in Organisationen; Einflussfaktoren und Beteiligte; Konzepte, Instrumente und Methoden.* 2., überarbeitete Auflage. Berlin: Cornelsen 2006. ISBN: 3589236353.

KREUZER 2021

Kreuzer, M.: Entscheidungsunterstützung für die Einführung von Industrie 4.0. (Masterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*), Technische Universität München. Garching (2021).

KRÜGER ET AL. 2017

Krüger, J.; Vick, A.; Chemnitz, M.; Rosenstrauch, M.; Hügler, J.; Fechteler, M.; Blankenburg, M.: Daten, Information und Wissen in Industrie 4.0. In: Reinhart, G. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik.* München: Carl Hanser 2017, S. 89-110. ISBN: 978-3-446-44642-7.

KUBICEK 1977

Kubicek, H.: Heuristische Bezugsrahmen und heuristisch angelegte Forschungsdesigns als Element einer Konstruktionsstrategie empirischer Forschung. In: Köhler, R. (Hrsg.): *Empirische und handlungstheoretische Forschungskonzeptionen in der Betriebswirtschaftslehre. Bericht über die Tagung in Aachen, März 1976.* Stuttgart: Poeschel 1977, S. 3-36. ISBN: 3-791-00214-7

KUHN 2017

Kuhn, T.: Digitaler Zwilling. *Informatik-Spektrum* 40 (2017) 5, S. 440-444.

KÜLL & STÄHLY 1999

Küll, R.; Stähly, P.: Zur Planung und effizienten Abwicklung von Simulationsexperimenten. In: Biethahn, J. e. a. (Hrsg.): *Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe: Physica-Verlag HD 1999*, S. 1-21. ISBN: 978-3-7908-1178-0.

KÜPPER ET AL. 2017

Küpper, D.; Heidemann, A.; Ströhle, J.; Spindelndreier, D.; Knizek, C.: When Lean Meets Industry 4.0. <<https://www.bcg.com/publications/2017/lean-meets-industry-4.0>> - 28.11.2021.

LANDHERR ET AL. 2016

Landherr, M.; Schneider, U.; Bauernhansl, T.: The Application Center Industrie 4.0 - Industry-driven Manufacturing, Research and Development. *Procedia CIRP* 57 (2016), S. 26-31.

LANGLOTZ & AURICH 2021

Langlotz, P.; Aurich, J. C.: Causal and temporal relationships within the combination of Lean Production Systems and Industry 4.0. *Procedia CIRP* 96 (2021), S. 236-241.

LANZA ET AL. 2011

Lanza, G.; Jondral, A.; Moser, R.; Kübler, L.: Erfolgsfaktoren beim Einsatz von Lean-Methoden. GBI-Genios 16 (2011) 3, S. 36-39.

LANZA ET AL. 2018

Lanza, G.; Nyhuis, P.; Fisel, J.; Jacob, A.; Nielsen, L.; Schmidt, M.; Stricker, N.: Wandlungsfähige, menschenzentrierte Strukturen in Fabriken und Netzwerken der Industrie 4.0 (acatech Studie). München: Herbert Utz Verlag 2018.

LANZA & NYHUIS 2018

Lanza, Gisela; Nyhuis, Peter (Hrsg.): Industrie 4.0 für die Praxis. Befähigungs- und Einführungsstrategien. Garbsen: TEWISS-Technik und Wissen GmbH 2018. ISBN: 978-3-959-00224-0.

LASI ET AL. 2014

Lasi, H.; Fettke, P.; Kemper, H.-G.; Feld, T.; Hoffmann, M.: Industry 4.0. Business & Information Systems Engineering 6 (2014) 4, S. 239-242.

LAY 1997

Lay, G.: Erfolgreich Reorganisieren. Unternehmenskonzepte aus der Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer 1997. ISBN: 978-3-642-59166-2.

LEE 2008

Lee, E. A.: Cyber Physical Systems: Design Challenges. In: IEEE Computer Society (Hrsg.): 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing. Orlando: IEEE 2008, S. 363-369. ISBN: 978-0-7695-3132-8.

LEE ET AL. 2015

Lee, J.; Bagheri, B.; Kao, H.-A.: A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. Manufacturing Letters 3 (2015), S. 18-23.

LEIRAS ET AL. 2019

Leiras, Adriana; González-Calderón, Carlos Alberto; Brito Junior, Irineu de; Villa, Sebastián; Yoshizaki, Hugo Tsugunobu Yoshida (Hrsg.): Operations Management for Social Good. Switzerland: Springer Nature 2019. ISBN: 978-3-030-23815-5.

LERCH ET AL. September 2021

Lerch, C.; Jäger, A.; Heimberger, H.: Lean 4.0: Smart und schlank produzieren. 80. Auflage. Mitteilung aus der Fraunhofer-ISI-Erhebung 2021.

LEYH ET AL. 2017

Leyh, C.; Martin, S.; Schäffer, T.: Industry 4.0 and Lean Production – A Matching Relationship? An analysis of selected Industry 4.0 models. (Hrsg.): Proceedings of the 2017 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, 2017 S. 989-993.

LICHTBLAU ET AL. 2015

Lichtblau, K.; Stich, V.; Bertenrath, R.; Blum, M.; Bleider, M.; Millack, A.; Schmitt, K.; Schmitz, E.; Schröter, Moritz: Industrie 4.0-Readiness. <<https://www.industrie40-readiness.de/>> - 11.05.2022.

LIEBRECHT 2020

Liebrecht, C.: Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz. (Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2020). Karlsruher Institut für Technologie. Düren: Shaker Verlag 2020. ISBN: 978-3-8440-7451-2.

LIKER 1998

Liker, Jeffrey K. (Hrsg.): *Becoming Lean: Inside Stories of U.S. Manufacturers*. 1. Auflage. Portland: Productivity Press 1997. ISBN: 978-1563271731.

LIKER 2013

Liker, J. K.: *Toyota way. 14 management principles from the world's greatest manufacturer*. First edition. New York: McGraw Hill 2013. ISBN: 0071392319.

LINSTONE & TUROFF 1975

Linstone, H. A.; Turoff, M.: *The Delphi method. Techniques and applications*. Reading, Mass.: Addison-Wesley 1975. ISBN: 0-201-04294-0.

MA ET AL. 2017

Ma, J.; Wang, Q.; Zhao, Z.: SLAE-CPS: Smart Lean Automation Engine Enabled by Cyber-Physical Systems Technologies. *Sensors* 17 (2017) 7.

MAGINNIS ET AL. 2019

Maginnis, M. A.; Hapuwatte, B. M.; Keown, D.: The Integration of True Lean and Industry 4.0 to Sustain a Culture of Continuous Improvement. In: Fortin, C. et al. (Hrsg.): *Product Lifecycle Management in the Digital Twin Era*. 1. Auflage. Moscow: Springer 2019, S. 336-345. ISBN: 978-3-030-42249-3.

MANKINS 2009

Mankins, J. C.: Technology readiness assessments: A retrospective. *Acta Astronautica* 65 (2009) 9-10, S. 1216-1223.

MANN 2005

Mann, D. W.: *Creating a lean culture. Tools to sustain lean conversions*. New York: Productivity Press 2005. ISBN: 978-1-563-27322-3.

MARINELLI ET AL. 2021

Marinelli, M.; Deshmukh, A. A.; Janardhanan, M.; Nielsen, I.: Lean manufacturing and Industry 4.0 combinative application: Practices and perceived benefits. *IFAC-PapersOnLine* 54 (2021) 1, S. 288-293.

MARODIN & SAURIN 2013

Marodin, G. A.; Saurin, T. A.: Implementing lean production systems: research areas and opportunities for future studies. *International Journal of Production Research* 51 (2013) 22, S. 6663-6680.

MARTL 2021

Martl, N.: *Lean Production und Industrie 4.0: Entwicklung einer Methode zur Kategorisierung von Industrieunternehmen auf Basis typologischer Merkmale*. (Semesterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München. Garching (2021).

MASAK 2009

Masak, D.: *Digitale Ökosysteme. Serviceorientierung bei dynamisch vernetzten Unternehmen*. Berlin, Heidelberg: Springer 2009. ISBN: 978-3-540-79129-4.

MATT ET AL. 2020

Matt, D. T.; Modrák, V.; Zsifkovits, H.: *Industry 4.0 for SMEs. Challenges, Opportunities and Requirements*. Cham: Palgrave Macmillan 2020. ISBN: 978-3-030-25424-7.

MAYR ET AL. 2018

Mayr, A.; Weigelt, M.; Köhl, A.; Grimm, S.; Erll, A.; Potzel, M.; Franke, J.: Lean 4.0 - A conceptual conjunction of lean management and Industry 4.0. *Procedia CIRP* 72 (2018), S. 622-628.

MEIER 2017

Meier, K.-J.: Lean QRM 4.0 – Das Beste aus Lean Production, QRM und Industrie 4.0 vereint in einem gemeinsamen Managementansatz. In: Koether, R. et al. (Hrsg.): *Lean Production für die variantenreiche Einzelfertigung*. Wiesbaden: Springer Gabler 2017, S. 119-135. ISBN: 978-3-658-13968-1.

MELL & GRANCE 2011

Mell, P. M.; Grance, T.: *The NIST definition of cloud computing*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology 2011.

MERL 2016

Merl, T.: *Konfiguration Ganzheitlicher Produktionssysteme in kleinen und mittleren Unternehmen*. (Zugl.: Lüneburg, Techn. Univ., Diss., 2016). Leuphana Universität Lüneburg. Lüneburg: Universitätsbibliothek der Leuphana Universität Lüneburg.

MEßMER 2021

Meßmer, C.: *Kompetenzanforderungen in produzierenden Unternehmen im Kontext von Industrie 4.0*. (Semesterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*), Technische Universität München. Garching (2021).

MEßMER 2022

Meßmer, C.: *Entwicklung eines Simulationsmodells zur Ableitung von unternehmensspezifischen Lean-4.0-Implementierungsstrategien*. (Masterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*), Technische Universität München. Garching (2022).

METTERNICH ET AL. 2017

Metternich, J.; Müller, M.; Meudt, T.; Schaeede, C.: Lean 4.0 – zwischen Widerspruch und Vision. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF* 112 (2017) 5, S. 346-348.

METTERNICH ET AL. 2018

Metternich, J.; Meudt, T.; Hartmann, L.: *Leitfaden Industrie 4.0 trifft Lean. Wertschöpfung ganzheitlich steigern*. Frankfurt: VDMA Verlag 2018. ISBN: 978-3-8163-0721-1.

MICHAELI 2017

Michaeli, P. B.: *Methodik zur Entwicklung von Produktionsstrategien am Beispiel der Triebwerksindustrie*. (Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2017). Technische Universität München. München: Utz 2017. ISBN: 3831646422.

MICHNIEWICZ & REINHART 2016

Michniewicz, J.; Reinhart, G.: *Cyber-Physical-Robotics – Modelling of modular robot cells for automated planning and execution of assembly tasks*. *Mechatronics* 34 (2016), S. 170-180.

MIQUEO ET AL. 2020

Miqueo, A.; Torralba, M.; Yagüe-Fabra, J. A.: *Lean Manual Assembly 4.0: A Systematic Review*. *Applied Sciences* 10 (2020) 23, S. 1-37.

MÖLLER 2008

Möller, N.: *Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme*. (Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2008). Technische Universität München. München: Utz 2008. ISBN: 3831607788.

MONDEN 2011

Monden, Y.: Toyota production system: an integrated approach to just-in-time. 6. editierte Auflage. New York: Engineering & Management Press 2011. ISBN: 978-1439820971.

MORLOCK ET AL. 2016

Morlock, F.; Wienbruch, T.; Kreimeier, D.; Kuhlenkötter, B.: Industrie 4.0-Transformation für produzierende Unternehmen. Reifegradbasierte Migration zum Cyber-physischen Produktionssystem. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF 111 (2016) 5, S. 306-309.

MRUGALSKA & WYRWICKA 2017

Mrugalska, B.; Wyrwicka, M. K.: Towards Lean Production in Industry 4.0. Procedia Engineering 182 (2017), S. 466-473.

MÜLLER ET AL. 2018

Müller, J. M.; Buliga, O.; Voigt, K. I.: Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0. Technological Forecasting and Social Change 132 (2018), S. 2-17.

NEDJWA ET AL. 2022

Nedjwa, E.; Bertrand, R.; Sassi Boudemagh, S.: Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean management tools: a bibliometric analysis. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM) (2022), S. 135-150.

NETLAND & FERDOWS 2016

Netland, T. H.; Ferdows, K.: The S-Curve Effect of Lean Implementation. Production and Operations Management 25 (2016) 6, S. 1106-1120.

NIEHUES ET AL. 2017

Niehues, M.; Reinhart, G.; Schmitt, R. H.; Schuh, G.; Brambring, F.; Ellerich, M.; Elser, H.; Frank, D.; Groggert, S.; Gützlaff, A.; Heinrichs, V.; Hempel, T.; Kostyszyn, K.; Ngo, H.; Niendorf, L.; Permin, E.; Prote, J.; Reuter, C.; Türtmann, R.: Organisation, Qualität und IT-Systeme für Planung und Betrieb. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Carl Hanser 2017, S. 137-167. ISBN: 978-3-446-44642-7.

ŌNO 2008

Ōno, T.: Toyota production system. Beyond large-scale production. New York: Productivity Press 2008. ISBN: 0915299143.

ŌNO 2013

Ōno, T.: Das Toyota-Produktionssystem. Das Standardwerk zur Lean Production. 3., erw. und aktualisierte Auflage. Frankfurt: Campus-Verl. 2013. ISBN: 3593399296.

OSRANEK 2017

Osranek, R.: Nachhaltigkeit in Unternehmen. Wiesbaden: Springer Gabler 2017. ISBN: 978-3-658-17343-2.

OSTERRIEDER ET AL. 2020

Osterrieder, P.; Budde, L.; Friedli, T.: The smart factory as a key construct of industry 4.0: A systematic literature review. International Journal of Production Economics 221 (2020), S. 107476.

PAGENKOPF 1981

Pagenkopf, J.: Handwörterbuch der Wirtschaftswissenschaft. Stuttgart, New York: G. Fischer 1981. ISBN: 3525102593.

PAGLIOSA ET AL. 2019

Pagliosa, M.; Tortorella, G.; Ferreira, J. C.: Industry 4.0 and Lean Manufacturing. *Journal of Manufacturing Technology Management* 32 (2019), S. 543-569.

PALM 2010

Palm, W. J.: *System dynamics*. 2. Auflage. Dubuque, IA: McGraw-Hill 2010. ISBN: 9780073529271.

PARIDA & WINCENT 2019

Parida, V.; Wincent, J.: Why and how to compete through sustainability: a review and outline of trends influencing firm and network-level transformation. *International Entrepreneurship and Management Journal* 15 (2019) 1, S. 1-19.

PEREIRA ET AL. 2019

Pereira, A.; Dinis-Carvalho, J.; Alves, A.; Arezes, P.: How Industry 4.0 can enhance Lean practices. *FME Transactions* 47 (2019) 4, S. 810-822.

PETER 2009

Peter, K.: *Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean-Methoden in der Kleinserienproduktion*. (Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2009). Karlsruher Institut für Technologie. Düren: Shaker 2009. ISBN: 978-3-832-28713-9.

PISTORIUS 2020

Pistorius, J.: *Industrie 4.0 – Schlüsseltechnologien für die Produktion. Grundlagen, Potenziale, Anwendungen*. Heidelberg: Springer Vieweg 2020. ISBN: 978-3-662-61579-9.

POKORNI ET AL. 2017

Pokorni, B.; Schlund, S.; Findeisen, S.; Tomm, A.; Euper, D.; Mehl, D.; Brehm, N.; Ahmad, D.; Ohlhausen, P.; Palm, D.: Produktionsassessment 4.0. Entwicklung eines Reifegradmodells zur Bewertung der Lean Management und Industrie-4.0-Reife von produzierenden Unternehmen. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF* 112 (2017) 2, S. 20-24.

PORST 2014

Porst, R.: *Fragebogen. Ein Arbeitsbuch*. 4., erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer VS 2014. ISBN: 978-3-658-02117-7.

PRINZ ET AL. 2018

Prinz, C.; Kreggenfeld, N.; Kuhlenkötter, B.: Lean meets Industrie 4.0 – a practical approach to interlink the method world and cyber-physical world. *Procedia Manufacturing* 23 (2018), S. 21-26.

QUANDT ET AL. 2019

Quandt, M.; Beinke, T.; Freitag, M.: User-Centered Evaluation of an Augmented Reality-based Assistance System for Maintenance. *Procedia CIRP* 93 (2021), S. 921-926.

RAMADAN & SALAH 2019

Ramadan, M.; Salah, B.: Smart Lean Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Case Study. *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering* 13 (2019) 3, S. 174-181.

REINHART ET AL. 2017a

Reinhart, G.; Knoll, D.; Teschemacher, U.; Lux, G.; Schnell, J.; Endres, F.; Distel, F.; Seidel, C.; Berger, C.; Klöber-Koch, J.; Pielmeier, J.; Braunreuther, S.: Anwendungsfeld Automobilindustrie. In: Reinhart, G. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Carl Hanser 2017, S. 709-722. ISBN: 978-3-446-44642-7.

REINHART ET AL. 2017b

Reinhart, G.; Bengler, K.; Dollinger, C.; Intra, C.; Lock, C.; Popova-Dlogosch, S.; Rimpau, C.; Schmidler, J.; Teubner, S.; Vernim, S.: Der Mensch in der Produktion von Morgen. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Carl Hanser 2017, S. 51-88. ISBN: 978-3-446-44642-7.

REINHART 2017

Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Hanser 2017. ISBN: 978-3-446-44642-7.

REITZ 2009

Reitz, A.: Lean TPM. In 12 Schritten zum schlanken Managementsystem. 1. Auflage. München: mi-Wirtschaftsbuch 2009. ISBN: 978-3-868-80047-0.

RESCHKE 2016

Reschke, S.: Industrie 4.0. Europäische Sicherheit & Technik (esut) 5 (2016) 84.

RICHARDSON 2013

Richardson, G. P.: System Dynamics. In: Gass, S. I. et al. (Hrsg.): Encyclopedia of Operations Research and Management Science. Boston: Springer US 2013, S. 1519-1522. ISBN: 978-1-4419-1137-7.

RITTBERGER & SCHNEIDER 2018

Rittberger, S.; Schneider, M.: Continuous Improvement of Lean Processes with Industry 4.0 technologies. 11th International Doctoral Students Workshop on Logistics (2018).

RODRIGUES ET AL. 2016

Rodrigues, V. P.; Pigosso, D. C.; McAloone, T. C.: Process-related key performance indicators for measuring sustainability performance of ecodesign implementation into product development. Journal of Cleaner Production 139 (2016), S. 416-428.

ROHLEDER 2021

Rohleder, B.: Industrie 4.0 – so digital sind Deutschlands Fabriken.
<https://www.bitkom.org/sites/default/files/2021-04/bitkom-charts-industrie-4.0-07-04-2021_final.pdf> - 28.11.2022.

ROMEIKE 2018

Romeike, F.: Risikomanagement. Wiesbaden: Springer Gabler 2018. ISBN: 365-8-139-51X.

RONGE 2021

Ronge, M.: Entwicklung eines Lean-4.0-Produktionssystems. (Masterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*), Technische Universität München. Garching (2021).

ROSIN ET AL. 2020

Rosin, F.; Forget, P.; Lamouri, S.; Pellerin, R.: Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles. International Journal of Production Research 58 (2020) 6, S. 1644-1661.

ROSSINI ET AL. 2019

Rossini, M.; Costa, F.; Tortorella, G. L.; Portioli-Staudacher, A.: The interrelation between Industry 4.0 and lean production: an empirical study on European manufacturers. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 102 (2019) 9-12, S. 3963-3976.

ROSSINI ET AL. 2021

Rossini, M.; Cifone, F. D.; Kassem, B.; Costa, F.; Portioli-Staudacher, A.: Being lean: how to shape digital transformation in the manufacturing sector. *Journal of Manufacturing Technology Management* 32 (2021) 9, S. 239-259.

RÖßLER & HASCHEMI 2017

Rößler, M. P.; Haschemi, M.: Smart Factory Assessment (SFA). *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF* 112 (2017) 10, S. 699-703.

ROTH 2016

Roth, A.: Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler 2016. ISBN: 978-3-662-48504-0.

ROTHER 2010

Rother, M.: Toyota kata. Managing people for improvement, adaptiveness and superior results. New York: McGraw-Hill 2010. ISBN: 978-0-071-63523-3.

ROTHER & SHOOK 2003

Rother, M.; Shook, J.: Learning to see. Value-stream mapping to create value and eliminate muda. Lean Enterprise Institute. Version 1.3. Cambridge, Mass.: Lean Enterprise Inst 2003. ISBN: 0-9667843-0-8.

RÜßMANN ET AL. 2015

Rüßmann, M.; Lorenz, M.; Gerbert, P.; Waldner, M.; Justus, J.; Engel, P.; Harnisch, M.: Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries. <https://www.bcg.com/de-de/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries> - 28.11.2021.

RÜTTIMANN & STÖCKLI 2016

Rüttimann, B. G.; Stöckli, M. T.: Lean and Industry 4.0 - Twins, Partners, or Contenders? A Due Clarification Regarding the Supposed Clash of Two Production Systems. *Journal of Service Science and Management* 09 (2016) 06, S. 485-500.

SACK 2006

Sack, N.: Das Management Appraisal – zentrales Analyse- und Führungsinstrument für ein wertorientiertes Talent Management. In: Riekhof, H.-C. (Hrsg.): *Strategien der Personalentwicklung*. Wiesbaden: Gabler 2006, S. 65-80. ISBN: 978-3-8349-0114-9.

SALKIN ET AL. 2018

Salkin, C.; Oner, M.; Ustundag, A.; Cevikcan, E.: A Conceptual Framework for Industry 4.0. In: Ustundag, A. et al. (Hrsg.): *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*. Cham: Springer 2018, S. 3-23. ISBN: 978-3-319-57869-9.

SANDERS ET AL. 2016

Sanders, A.; Elangeswaran, C.; Wulfsberg, J.: Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. *Journal of Industrial Engineering and Management* 9 (2016) 3, S. 811.

SANDERS ET AL. 2017

Sanders, A.; K. Subramanian, K. R.; Redlich, T.; Wulfsberg, J. P.: Industry 4.0 and Lean Management – Synergy or Contradiction? *Advances in Production Management Systems* (2017), S. 341-349.

SATOGLU ET AL. 2017

Satoglu, S.; Ustandag, A.; Cevikcan, E.; Durmusoglu, M. B.: Lean Transformation Integrated with Industry 4.0 Implementation Methodology. Global Joint Conference on Industrial Engineering and Its Application Areas (2017). S. 1-11.

SATOGLU ET AL. 2018

Satoglu, S.; Ustundag, A.; Cevikcan, E.; Durmusoglu, M. B.: Lean Production Systems for Industry 4.0. In: Ustundag, A. et al. (Hrsg.): Industry 4.0: Managing The Digital Transformation. Cham: Springer 2018, S. 43-59. ISBN: 978-3-319-57869-9.

SAYER & CROSSON 1963

Sayer, K. M.; Crosson, F. J.: The Modeling of Mind: Computers and Intelligence. Paris: University of Notre Dame Press 1963.

SCHAWEL & BILLING 2018

Schawel, C.; Billing, F.: Top 100 Management Tools. Das wichtigste Buch eines Managers : ABC-Analyse bis Zielvereinbarung. 6., Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler 2018. ISBN: 978-3-658-18917-4.

SCHIEMENZ 1993

Schiemenz, B.: Betriebswirtschaftliche Systemtheorie. In: Wittmann, W. (Hrsg.): Handwörterbuch der Betriebswirtschaft, Teilband 3. 5 Auflage. Stuttgart: Schäffer Poeschel Verlag 1993, S. 4127-4140.

SCHNECK 2015

Schneck, O. (Hrsg.): Lexikon der Betriebswirtschaft. 3000 grundlegende und aktuelle Begriffe für Studium und Beruf. 9., vollständig überarbeitete Auflage. München: Deutscher Taschenbuch Verlag 2015. ISBN: 978-3-423-50942-8.

SCHNEIDER ET AL. 2020

Schneider, M.; Michalicki, M.; Rittberger, S.: Lean and Industry 4.0—How to Develop a Lean Digitalization Strategy with the Value Stream Method. In: Rossi, M. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 6th European Lean Educator Conference. Cham: Springer 2020, S. 127-135. ISBN: 978-3-030-41428-3.

SCHUH ET AL. 2017

Schuh, G.; Salmen, M.; Jussen, P.; Riesener, M.; Zeller, V.; Hensen, T.; Begovic, A.; Birkmeier, M.; Hocken, C.; Jordan, F.; Kantelberg, J.; Kelzenberg, C.; Kolz, D.; Maasem, C.; Siegers, J.; Stark, M.; Tönnies, C.: Geschäftsmodell-Innovation. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Carl Hanser 2017, S. 1-29. ISBN: 978-3-446-44642-7.

SCHUH ET AL. 2018

Schuh, G.; Boos, W.; Kelzenberg, C.; Lange, J. de; Stracke, F.; Helbig, J.; Boshof, J.; Ebbecke, C.: Industrie 4.0: Implement it! Ein Leitfaden zur erfolgreichen Implementierung von Industrie 4.0-Lösungen. 1. Auflage. Aachen: Werkzeugmaschinenlabor der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen 2018. ISBN: 978-3-946612-32-2.

SCHUH ET AL. 2020

Schuh, G.; Anderl, R.; Dumitrescu, R.; Krüger, A.; Hompel, M. ten: Industrie 4.0 Maturity Index. Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten. Update 2020. München, Berlin, Brüssel: acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften 2020. ISBN: 978-3-96834-002-9.

SCHUH & STICH 2012

Schuh, G.; Stich, V.: Grundlagen der PPS. 4., überarbeitete Auflage. Berlin: Springer Vieweg 2012.
ISBN: 978-3-64225-423-9.

SCHULTE-ZURHAUSEN 2014

Schulte-Zurhausen, M.: Organisation. 6., überarb. und aktualisierte Auflage. München: Vahlen 2014.
ISBN: 978-3-8006-4689-0.

SETHI & SETHI 1990

Sethi, A. K.; Sethi, S. P.: Flexibility in manufacturing: A survey. International Journal of Flexible Manufacturing Systems 2 (1990) 4.

SHAH & WARD 2007

Shah, R.; Ward, P. T.: Defining and developing measures of lean production. Journal of Operations Management 25 (2007) 4, S. 785-805.

SHAHIN ET AL. 2020

Shahin, M.; Chen, F. F.; Bouzary, H.; Krishnaiyer, K.: Integration of Lean practices and Industry 4.0 technologies: smart manufacturing for next-generation enterprises. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 107 (2020) 5-6, S. 2927-2936.

SHINGŌ 1989

Shingō, S.: A study of the Toyota production system from an industrial engineering viewpoint. Rev. ed. Cambridge, Mass.: Productivity Press 1989. ISBN: 978-0-915-29917-1.

SHINGŌ 1992

Shingō, S.: Das Erfolgsgeheimnis der Toyota-Produktion. Eine Studie über das Toyota-Produktionssystem genannt die "Schlanke Produktion". Landsberg: Moderne Industrie 1992. ISBN: 978-3-478-93501-2.

SHROUF ET AL. 2014

Shrouf, F.; Ordieres, J.; Miragliotta, G.: Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm (2014), S. 697-701.

SIEPMANN & GRAEF 2016

Siepmann, D.; Graef, N.: Industrie 4.0 – Grundlagen und Gesamtzusammenhang. In: Roth, A. (Hrsg.): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler 2016, S. 17-82.
ISBN: 978-3-662-48504-0.

SIMONS ET AL. 2017

Simons, S.; Abé, P.; Naser, S.: Learning in the AutFab – The Fully Automated Industrie 4.0 Learning Factory of the University of Applied Sciences Darmstadt. Procedia Manufacturing 9 (2017), S. 81-88.

SONY 2018

Sony, M.: Industry 4.0 and lean management: a proposed integration model and research propositions. Production & Manufacturing Research 6 (2018) 1, S. 416-432.

SORDAN ET AL. 2020

Sordan, J.; Oprime, P.; Pimenta, M.; Lombardi, F.; Chiabert, P.: Towards Digital Lean Manufacturing: A Brazilian Case. International Conference on Quality Engineering and Management (2020), S. 208-223.

SOUSA JABBOUR ET AL. 2018

Sousa Jabbour, A. B. de; Jabbour, C. J.; Foropon, C.; Godinho Filho, M.: When titans meet – Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors. *Technological Forecasting and Social Change* 132 (2018), S. 18-25.

STAHL ET AL. 2015

Stahl, B.; Anderl, R.; Picard, A.; Wang, Y.; Fleischer, J.; Dosch, S.; Klee, B.; Bauer, J.: *Leitfaden Industrie 4.0. Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand*. Frankfurt: VDMA Verlag 2015. ISBN: 978-3-816-30677-1.

STEVEN 2019

Steven, M.: *Industrie 4.0. Grundlagen - Teilbereiche - Perspektiven*. W. Kohlhammer GmbH. 1. Auflage. Stuttgart: Kohlhammer 2019. ISBN: 3170325914.

STEVEN & KLÜNDER 2018

Steven, M.; Klünder, T.: Nachhaltigkeit schlanker Industrie 4.0-Netzwerke. In: Khare, A. et al. (Hrsg.): *Marktorientiertes Produkt- und Produktionsmanagement in digitalen Umwelten*. Festgabe für Klaus Bellmann zum 75. Geburtstag. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Gabler 2018, S. 201-222. ISBN: 978-3-658-21636-8.

STOCK & SELIGER 2016

Stock, T.; Seliger, G.: Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP* 40 (2016), S. 536-541.

STRADI-GRANADOS 2020

Stradi-Granados, B. A.: *Cloud Computing for Engineering Applications*. Cham: Springer 2020. ISBN: 978-3-030-40444-4.

STROZZI ET AL. 2017

Strozzi, F.; Colicchia, C.; Creazza, A.; Noè, C.: Literature review on the 'Smart Factory' concept using bibliometric tools. *International Journal of Production Research* 55 (2017) 22, S. 6572-6591.

SUGIMORI ET AL. 1977

Sugimori, Y.; Kusunoki, K.; Cho, F.; Uchikawa, S.: Toyota production system and Kanban system Materialization of just-in-time and respect-for-human system. *International Journal of Production Research* 15 (1977) 6, S. 553-564.

TAACK-TRAKRANEN 2021

Taack-Trakranen, F. von: *Lean 4.0 – Systematische Literaturanalyse zur Wechselwirkung zwischen Schlanker Produktion und Industrie 4.0*. (Semesterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*), Technische Universität München. Garching (2021).

TAKEDA 2013

Takeda, H.: *Das synchrone Produktionssystem. Just-in-time für das ganze Unternehmen*. 7. Auflage. München: Vahlen 2013. ISBN: 3800646072.

TAYLOR 1919

Taylor, F. W.: *The Principles of Scientific Management*. New York, London: Harper & Brothers Publishers 1919. ISBN: 9781421803401

TEGEL 2012

Tegel, A.: Analyse und Optimierung der Produktionsglättung für Mehrprodukt-Fließlinien. Eine Studie zum Lean-Production-Konzept. (Zugl.: Augsburg, Univ., Diss., 2012). Universität Augsburg. Wiesbaden: Gabler Verlag 2012. ISBN: 978-3-8349-3586-1.

THAMES & SCHAEFER 2017

Thames, L.; Schaefer, D.: Cybersecurity for Industry 4.0. Cham: Springer 2017. ISBN: 978-3-319-50659-3.

TIDEMAN ET AL. 2008

Tideman, M.; van der Voort, M. C.; van Houten, F. J.: A new product design method based on virtual reality, gaming and scenarios. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM) 2 (2008) 4, S. 195-205.

TORTORELLA ET AL. 2021

Tortorella, G. L.; Narayanamurthy, G.; Thurer, M.: Identifying pathways to a high-performing lean automation implementation: An empirical study in the manufacturing industry. International Journal of Production Economics 231 (2021), S. 107918.

TORTORELLA & FETTERMANN 2018

Tortorella, G. L.; Fettermann, D.: Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies. International Journal of Production Research 56 (2018) 8, S. 2975-2987.

TROPSCHUH ET AL. 2020

Tropschuh, B.; Korder, S.; Dillinger, F.; Bauer, H.; Reinhardt, G.: Activity-based shop floor management – A concept to enhance flexibility. In: Herberger, D.; Hübner, M. (Hrsg.): Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics: CPSL 2020. Hannover: publish-Ing 2020, S. 259-268.

ULICH 2013

Ulich, E.: Arbeitssysteme als Soziotechnische Systeme - eine Erinnerung. Innsbruck University press 6 (2013) 1, S. 4-14.

ULRICH 1970

Ulrich, H.: Die Unternehmung als produktives soziales System: Grundlagen der allgemeinen Unternehmenslehre. 2. Auflage.: Bern: Haupt 1970.

ULRICH 1982

Ulrich, H.: Anwendungsorientierte Wissenschaft. Die Unternehmung 36 (1982) 1, S. 1-10.

ULRICH & HILL 1976

Ulrich, P.; Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I). WiSt - Wirtschaftswissenschaftliches Studium; Zeitschrift für Studium und Forschung 5 (1976) 7, S. 304-309.

VALAMEDE & AKKARI 2020

Valamede, L. S.; Akkari, A. C.: Lean 4.0: A New Holistic Approach for the Integration of Lean Manufacturing Tools and Digital Technologies. International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences 5 (2020) 5, S. 851-868.

VAN ECK & WALTMAN 2009

van Eck, N. J.; Waltman, L.: How to normalize cooccurrence data? An analysis of some well-known similarity measures. Journal of the American Society for Information Science and Technology 60 (2009) 8, S. 1635-1651.

VARELA ET AL. 2019

Varela, L.; Araújo, A.; Ávila, P.; Castro, H.; Putnik, G.: Evaluation of the Relation between Lean Manufacturing, Industry 4.0, and Sustainability. *Sustainability* 11 (2019) 5, S. 1-19.

VDI 2510

VDI 2510: Fahrerlose Transportsysteme (FTS): 10/2020.

VDI 2870-1

VDI 2870-1: Ganzheitliche Produktionssysteme. Grundlage, Einführung und Bewertung: 07/2012.

VDI 2870-2

VDI 2870-2: Ganzheitliche Produktionssysteme. Methodenkatalog: 02/2013.

VDI 3633-1

VDI 3633-1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen: 12/2014.

VEILE ET AL. 2020

Veile, J. W.; Kiel, D.; Müller, J. M.; Voigt, K.-I.: Lessons learned from Industry 4.0 implementation in the German manufacturing industry. *Journal of Manufacturing Technology Management* 31 (2020) 5, S. 977-997.

VERNIM ET AL. 2021

Vernim, S.; Krauel, M.; Reinhart, G.: Identification of digitization trends and use cases in assembly. *Procedia CIRP* 97 (2021), S. 136-141.

VIGNESHVARAN & VINODH 2021

Vigneshvaran, R.; Vinodh, S.: Prioritizing the Challenges for Lean and Industry 4.0 Integration Using Fuzzy TOPSIS. In: Mohan, S. et al. (Hrsg.): *Materials, Design, and Manufacturing for Sustainable Environment*. Singapore: Springer 2021, S. 495-513. ISBN: 978-981-15-9808-1.

VLACHOS ET AL. 2021

Vlachos, I. P.; Pascuzzi, R. M.; Zobolas, G.; Repoussis, P.; Giannakis, M.: Lean manufacturing systems in the area of Industry 4.0: a lean automation plan of AGVs/IoT integration. *Production Planning & Control* (2021), S. 1-14.

VOGEL-HEUSER ET AL. 2017

Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael ten (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 Bd.4*. Berlin: Springer Vieweg 2017. ISBN: 978-3-662-53253-9.

WAGNER ET AL. 2017

Wagner, T.; Herrmann, C.; Thiede, S.: Industry 4.0 Impacts on Lean Production Systems. *Procedia CIRP* 63 (2017), S. 125-131.

WAGNER 2018

Wagner, R. M.: *Industrie 4.0 für die Praxis. Mit realen Fallbeispielen aus mittelständischen Unternehmen und vielen umsetzbaren Tipps*. Wiesbaden: Springer Gabler 2018. ISBN: 978-3-658-21117-2.

WALTMAN ET AL. 2010

Waltman, L.; van Eck, N. J.; Noyons, E. C.: A unified approach to mapping and clustering of bibliometric networks. *Journal of Informetrics* 4 (2010) 4, S. 629-635.

WANG ET AL. 2016

Wang, S.; Wan, J.; Di Li; Zhang, C.: Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook. International Journal of Distributed Sensor Networks 12 (2016) 1.

WEBER & SCHÄFFER 2016

Weber, J.; Schäffer, U.: Einführung in das Controlling. 15., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Stuttgart: Schäffer Poeschel Verlag 2016. ISBN: 379-1-035-738.

WEISSMANN & WEGERER 2019

Weissmann, A.; Wegerer, S.: Unternehmen 4.0: Wie Digitalisierung Unternehmen & Management verändert. In: Erner, M. (Hrsg.): Management 4.0 - Unternehmensführung Im Digitalen Zeitalter. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler 2019. S. 43-76. ISBN: 978-3-662-57962-6.

WEYER ET AL. 2015

Weyer, S.; Schmitt, M.; Ohmer, M.; Gorecky, D.: Towards Industry 4.0 - Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems. IFAC-PapersOnLine 48 (2015) 3, S. 579-584.

WIENDAHL ET AL. 2007

Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N.; Brieke, M.: Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. CIRP Annals 56 (2007) 2, S. 783-809.

WIRTH ET AL. 2011

Wirth, S.; Schenk, M.; Müller, E.: Fabrikarten, Fabriktypen und ihre Entwicklungsetappen und ihre Entwicklungsetappen. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF 106 (2011) 11, S. 799-802.

WITKOWSKI 2017

Witkowski, K.: Internet of Things, Big Data, Industry 4.0 – Innovative Solutions in Logistics and Supply Chains Management. Procedia Engineering 182 (2017), S. 763-769.

WOHLIN 2014

Wohlin, C.: Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering. In: Shepperd, M. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering. London, New York: ACM Press 2014, S. 1-10. ISBN: 978-1-450-32476-2.

WÖLFL 2021

Wölfl, D.: Konzeption einer unternehmensindividuellen Lean-4.0-Implementierungsstrategie. (Masterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*), Technische Universität München. Garching (2021).

WOMACK ET AL. 1990

Womack, J. P.; Jones, D. T.; Roos, D.: The machine that changed the world. Based on the Massachusetts Institute of Technology 5-million-dollar 5-year study on the future of the automobile. New York: Rawson Associates 1990. ISBN: 0-892.56-350-8.

WOMACK & JONES 1996

Womack, J. P.; Jones, D.: Lean Thinking: banish waste and create wealth in your corporation. New York: Simon & Schuster 1996. ISBN: 978-0-684-81976-1

Studienarbeitsverzeichnis

Im Kontext dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors dieser Arbeit die im Folgenden chronologisch aufgeführten studentischen Forschungsarbeiten. In ihnen wurden verschiedene Fragestellungen in den Themenbereichen Lean Production, Industrie 4.0, Lean 4.0, Kennzahlensysteme, Reifegradmodellierung sowie systemdynamische Ablaufsimulationen untersucht. Deren Ergebnisse sind zum Teil in die vorliegende Arbeit eingeflossen.

Der Autor dankt an dieser Stelle allen Studierenden für das umfassende Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Name	Jahr	Typ	Titel	Mitwirkung
Fabian Formann	2020	SA	Wechselwirkung zwischen Lean Management und Industrie 4.0.	Kapitel 2, Kapitel 3
Loreto Albiñana	2020	MA	A Concept for a Maturity Model to Identify Lean 4.0 Potentials.	Kapitel 2, Kapitel 5
Yagiz Mustafa Dervis	2020	SA	Deriving a Guideline Model for Efficient Implementation of Industrie 4.0 in Existing Lean Production Systems.	Kapitel 5
Yang Chen	2020	BA	Literaturbasierte Untersuchung des Zusammenhangs von Lean Management und Industrie 4.0.	Kapitel 2, Kapitel 3
Clara Mañes Domingo	2020	MA	Design of an Innovation Laboratory for Production at TUM.	Kapitel 5
Cedric Linß	2020	BA	Integration eines digitalen Shopfloor-Managements in die Lernfabrik für Schlanke Produktion (LSP).	Kapitel 5
Nico Rieder	2020	BA	Konzept zur Einführung von Industrie 4.0 in der Produktion bei kleinen und mittleren Unternehmen.	Kapitel 3, Kapitel 5
Ferdinand Volbert	2020	SA	Entwicklung eines Lean 4.0 Kennzahlensystems mit Fokus auf die Produktion.	Kapitel 5
Mathias Ronge	2021	MA	Entwicklung eines Lean-4.0-Produktionssystems.	Kapitel 3, Kapitel 5
Sebastian Amorth	2021	MA	Correlation of Lean Management and Industry 4.0.	Kapitel 3, Kapitel 5
Moritz Kagerer	2021	MA	Konzeptentwicklung eines Reifegradmodells zur kennzahlen- & kompetenzgestützten Lean-4.0-Implementierung in der Produktion.	Kapitel 5
Julia Bergermeier	2021	MA	Implications of Lean 4.0 Use Cases in a Hierarchical Performance Measurement System.	Kapitel 5

Clemens Meßmer	2021	MA	Kompetenzanforderungen in produzierenden Unternehmen im Kontext von Industrie 4.0.	Kapitel 5
Alexander Jacobi	2021	SA	Konzeption eines Lean-4.0-Kennzahlensystems im Bereich der Logistik.	Kapitel 5
Olivia Bernhard	2021	SA	Kompetenzmanagement für Lean 4.0.	Kapitel 5
Ferdinand van Taack-Trakranen	2021	SA	Lean 4.0 – Systematische Literaturanalyse zur Wechselwirkung zwischen Schlanker Produktion und Industrie 4.0.	Kapitel 5
Alexandra Schmied	2021	BA	Systematische Analyse des Technologiereifegrads ausgewählter Industrie-4.0-Elemente.	Kapitel 5
Niklas Martl	2021	SA	Lean Production und Industrie 4.0: Entwicklung einer Methode zur Kategorisierung von Industrieunternehmen auf Basis typologischer Merkmale.	Kapitel 5
Matthias Kreuzer	2021	MA	Entscheidungsunterstützung für die Einführung von Industrie 4.0.	Kapitel 5
Nicolai Ruof	2021	MA	Entwicklung eines Lean-4.0- Kennzahlensystems zur Messung der Nachhaltigkeit in der Produktion.	Kapitel 5 Kapitel 6
Christopher Rupp	2021	SA	Creation of an Assessment System for Lean Management and Industry 4.0 with a Focus on Manufacturing.	Kapitel 5
Yagiz Mustafa Dervis	2021	MA	Developing a Decision-Making Approach to Derive Individual Lean 4.0 Implementation Strategies Based on System-Dynamics-Modeling.	Kapitel 5
De Jun Fu	2021	BA	Analyse der Wirkbeziehung zwischen verschiedenen Industrie-4.0-Technologien.	Kapitel 5
Dominik Wölfl	2021	MA	Konzeption einer unternehmensindividuellen Lean-4.0-Implementierungsstrategie.	Kapitel 5
Bill Fischer	2021	SA	Konzeption und Darstellung von Lean-4.0-Methodensteckbriefen.	Kapitel 5
Niklas Hab	2021	SA	Implications of Lean Management and Industry 4.0 on Sustainable Production in a Performance Measurement System.	Kapitel 5
Alexander Kophal	2021	SA	Identifizierung von Lean-4.0-Methoden und Analyse des Einflusses von Lean-Management-Methoden und Industrie-4.0-Technologien auf die Nachhaltigkeit in der Produktion.	Kapitel 5
Olivia Bernhard	2022	MA	Strategie und Roadmap für die Lean-4.0-Transformation.	Kapitel 4, Kapitel 5
Björn Borchert	2022	MA	Entwicklung eines Assessmentmodells für Lean Management und Industrie 4.0.	Kapitel 5,
Fabian Formann	2022	MA	Entwicklung eines ganzheitlichen Reifegradmodells unter Berücksichtigung der Einflüsse von Lean Production und Industrie 4.0 auf Nachhaltigkeitsaspekte in der Produktion.	Kapitel 5, Kapitel 6
Clemens Meßmer	2022	MA	Entwicklung eines Simulationsmodells zur Ableitung von unternehmensspezifischen Lean-4.0-Implementierungsstrategien	Kapitel 5, Kapitel 6

Legende: MA: Masterarbeit, SA: Semesterarbeit, BA: Bachelorarbeit

Vorveröffentlichungsverzeichnis

Vorläufige Inhalte dieser Arbeit wurden vorab in Buch- und Zeitschriftenbeiträgen sowie auf Konferenzen publiziert, die unterhalb aufgelistet sind.

DILLINGER ET AL. 2020

Dillinger, F.; Formann, F.; Reinhart, G.: Lean Production und Industrie 4.0 in der Produktion. Eine Studie zur Wechselwirkung und den gemeinsamen Potenzialen. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF 115 (2020) 10, S. 738-741.

TROPSCHUH ET AL. 2020

Tropschuh, B.; Korder, S.; Dillinger, F.; Bauer, H.; Reinhardt, G.: Activity-based shop floor management – A concept to enhance flexibility. In: Herberger, D.; Hübner, M. (Hrsg.): Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics: CPSL 2020. Hannover: publish-Ing 2020, S. 259-268.

DILLINGER ET AL. 2021a

Dillinger, F.; Kagerer, M.; Reinhart, G.: Concept for the development of a Lean 4.0 reference implementation strategy for manufacturing companies. Procedia CIRP 104 (2021), S. 330-335.

DILLINGER ET AL. 2021b

Dillinger, F.; Meßmer, C.; Reinhart, G.: Industrie-4.0-Technologiekreis für produzierende Unternehmen. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF 116 (2021) 9, S. 639-643.

DILLINGER ET AL. 2021c

Dillinger, F.; Martl, N.; Reinhart, G.: Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien in der Produktion. Eine Studie zur Einführungsdauer und Relevanz. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF 116 (2021) 12, S. 951-956.

DILLINGER ET AL. 2021d

Dillinger, F.; Kagerer, M.; Brandl, F.; Bauer, H.; Tropschuh, B.; Korder, S.; Reinhart, G.: Managing the Systemic Transition from a Learning Factory for Lean Production (LSP) to an Innovation Lab for Smart & Lean Processes at iwB (TUM). Procedia CLF 11(2021).

TROPSCHUH ET AL. 2021

Tropschuh, B.; Dillinger, F.; Korder, S.; Maier, M.; Gärtner, G.; Vernim, S.: Industrie 5.0 – ein menschenzentrierter Ansatz. Ansätze zur flexiblen und menschenzentrierten Einbindung und Unterstützung der Mitarbeitenden in der digitalisierten und vernetzten Produktion der Zukunft. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF 116 (2021) 6, S. 387-392.

DILLINGER ET AL. 2022a

Dillinger, F.; Kophal, A.; Reinhart, G.: Analysis of the Impact of Lean Production Methods and Industry 4.0 Technologies on Sustainability and Flexibility in the Production. In: Herberger, D.; Hübner, M. (Hrsg.): Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics: CPSL 2022. Hannover: publish-Ing 2022, S. 319-328.

DILLINGER ET AL. 2022b

Dillinger, F.; Bernhard, O.; Kagerer, M.; Reinhart, G.: Industry 4.0 Implementation Sequence for Manufacturing Companies. Production Engineering (2022), S. 705-718.

DILLINGER ET AL. 2022c

Dillinger, F.; Tropschuh, B.; Dervis, M.; Reinhart, G.: A Systematic Approach to Identify the Interdependencies of Lean Production and Industry 4.0 Elements. *Procedia CIRP* 112 (2022), S. 85-95.

DILLINGER ET AL. 2022d

Dillinger, F.; Bergermeier, J.; Reinhart, G.: Implications of Lean 4.0 Methods on Relevant Target Dimensions: Time, Cost, Quality, Employee Involvement, and Flexibility. *Procedia CIRP* 107 (2022), S. 202-208.

Anhang

A. Perspektiven aus der Literatur zu Wechselwirkungsbeziehungen zwischen Lean Production und Industrie 4.0

Tabelle 0-1: Perspektiven aus der Literatur zu Wechselwirkungsbeziehungen zwischen Lean Production und Industrie 4.0

Nr.	Legende: X = Autor*in stimmt mit Aussage überein	Lean Production als Wegbereiter für Industrie 4.0	Industrie 4.0 als Treiber von Lean Production	Lean Production & Industrie 4.0 als gegenseitige Treiber	Lean Production & Industrie 4.0 im Widerspruch
1	BICK (2014)	X			
2	BUER ET AL. (2018)	X	X		
3	CIANO ET AL. (2020)	X		X	
4	DAVIES ET AL. (2017)			X	
5	DEUSE ET AL. (2020)		X	X	
6	DOMBROWSKI ET AL. (2017)	X			
7	DOMBROWSKI & RICHTER (2016)	X			
8	FISCHER & KÖBLER (2018)	X			
9	FRANK (2014)		X		
10	GHOUAT ET AL. (2021)			X	
11	HOFMANN & RÜSCH (2017)			X	
12	HUBER (2016)	X			
13	JAVAID ET AL. (2021)		X	X	
14	KOLBERG ET AL. (2016)		X	X	
15	KOLBERG & ZÜHLKE (2015)			X	
16	KOLLA ET AL. (2019)			X	
17	LEIRAS ET AL. (2019)	X			
18	LEYH ET AL. (2017)		X		
19	MA ET AL. (2017)		X	X	
20	MAGINNIS ET AL. (2019)				
21	MARINELLI ET AL. (2021)			X	
22	MAYR ET AL. (2018)		X	X	
23	MEIER (2017)				X
24	METTERNICH ET AL. (2017)	X		X	X
25	MIQUEO ET AL. (2020)			X	
26	MRUGALSKA & WYRWICKA (2017)			X	
27	NEDJWA ET AL. (2022)			X	
28	PEREIRA ET AL. (2019)		X		
29	PRINZ ET AL. (2018)			X	
30	ROSIN ET AL. (2020)	X		X	
31	RÜTTIMANN & STÖCKLI (2016)		X		X
32	SANDERS ET AL. (2016)		X	X	
33	SANDERS ET AL. (2017)		X	X	
34	SATOGLU ET AL. (2017)		X	X	
35	SATOGLU ET AL. (2018)		X	X	
36	SHAHIN ET AL. (2020)			X	
37	SORDAN ET AL. (2020)			X	
38	TORTORELLA & FETTERMANN (2018)			X	X
39	VALAMEDE & AKKARI (2020)		X		
40	WAGNER ET AL. (2017)		X	X	
	Summe	10	16	26	4

B. Lean-Production-Interdependenzmatrix nach Aull (2012, S. 156)

Tabelle 0-2: Lean-Production-Interdependenzmatrix nach AULL (2012, S. 156)

Legende: <u>Leserichtung:</u> Das Element in der Zeile ist unterstützend (V) oder voraussetzend (U) für das Element in der Spalte. <u>Auswirkung:</u> + 3 sehr positiv + 2 positiv + 1 eher positiv 0 neutral	Lean-Production-Methoden																		Ziele			
	Einzelstückfluss	Flexibles Layout	Produktion im Fluss	Synchronisation	Produktionsnivellierung	Just in Time	Kanban	Mehrmaschinenbedienung	Multidisziplinär ausgebildete Mitarbeitende	Flexibler Mitarbeitereinsatz	Autonomation (Jidoka)	5S	Standardisierung	Visuelles Management	Total Productive Maintenance (TPM)	Single Minute Exchange of Die (SMED)	Poka Yoke	Kaizen	Zeit	Kosten	Qualität	
Einzelstückfluss			U1			U2	U1													3	1	
Flexibles Layout	U1					U1		V2	U1	V2										2	1	
Produktion im Fluss	V3	V1				U2	U1													2	1	
Synchronisation	V2		V1		V2	U1	V1							U1						3	3	
Produktionsnivellierung	U1		U1	U1		U2	U1													3	3	
Just in Time														U1						2	3	
Kanban						U3								U1			U1		2	3		
Mehrmaschinenbedienung	U1	U1																			2	
Multidisziplinär ausgebildete Mitarbeitende	U2	U3			V1			V2		V2			U1	U1	U1	U1	U1	U1	2	2	2	
Flexibler Mitarbeitereinsatz	U1	U1			U1	U1		U1	U1					U1	U1		U1		2	3	2	
Autonomation (Jidoka)	U1					U1	U1	V2											3	2	3	
5S		U1				U1			U1	U1				V1	U1	U1	U2	U1	3	3	3	
Standardisierung	V3		V1	V1	U1		U1	V1	V1	V1		U1			V1	U1		U2	2	2	2	
Visuelles Management				V1	V1	U1	V1		V1	V1	V2	U1	V1		V1	U1		U3	2	2	2	
Total Productive Maintenance			U2	U1		U1	U1	U1		U1									2	2	3	
Single Minute Exchange of Die	U2	U1	U1	U1	V1	U1	U1												3	3	2	
Poka Yoke		U1	U1			U1		U1			V1								2	3		
Kaizen	U1	U1	U1	U1	U1	U1	V1	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U1	U1	V1		3	3	3	

C. Analyse von Lean-Production-Elementen in zehn bestehenden Lean-Produktionssystemen aus der Industrie in Anlehnung an RONGE (2021)

Tabelle 0-3: Analyse von Lean-Production-Elementen in zehn bestehenden Lean-Produktionssystemen aus der Industrie in Anlehnung an RONGE (2021)

Lean-Production-Elemente	Produktionssysteme										Summe	Elemente sind in der Auswahl von AULI (2012) enthalten
	Toyota	Volkswagen	Mercedes-Benz	Lindner Group	BMW	Henkel Digital Lean Lighthouse	Trumpf	Bosch	ZF	Audi		
Legende:												
X	= wird berücksichtigt											
(X)	= wird teilweise berücksichtigt											
Kontinuierliche Verbesserung	X	X	X		X	X		X	X	X	8	X
(Prozess-) Standardisierung	X	X	X	X				X	X	X	7	X
Null-Fehler-Prinzip/Jidoka	X		X				X	X	X	X	7	X
Produktion im Fluss		X	X	X	X		X	X		X	7	X
Pull-Prinzip			X	X			X	X		X	5	(X)
Mitarbeitendenorientierung	X		X	X	X		X	X	X		6	(X)
Visuelles Management	X		X			X	X	X			5	X
5S	X		X	X			X		X		5	X
5x Warum			X				X				2	
Poka Yoke			X		X	X					3	X
Six Sigma		X							X		2	
Statistische Prozessregelung			X								1	
Einzelstückfluss			X								1	X
Schnellrüsten (SMED)			X	X							2	X
Just-in-Time-Prinzip	X		X	X	X		X		X		6	X
Kanban		X	X						X		3	X
Milkrun			X						X		2	
Nivellierung	X		X						X	X	4	X
Supermarkt			X								1	
Audit			X								1	
Ideenmanagement			X								1	
Total Productive Maintenance (TPM)			X	X					X		3	X
Verschwendungsbewertung			X								1	
Andon			X								1	
Shopfloor-Management				X			X				2	

D. Systematische Literaturanalyse in Anlehnung an VERNIM ET AL. (2021)

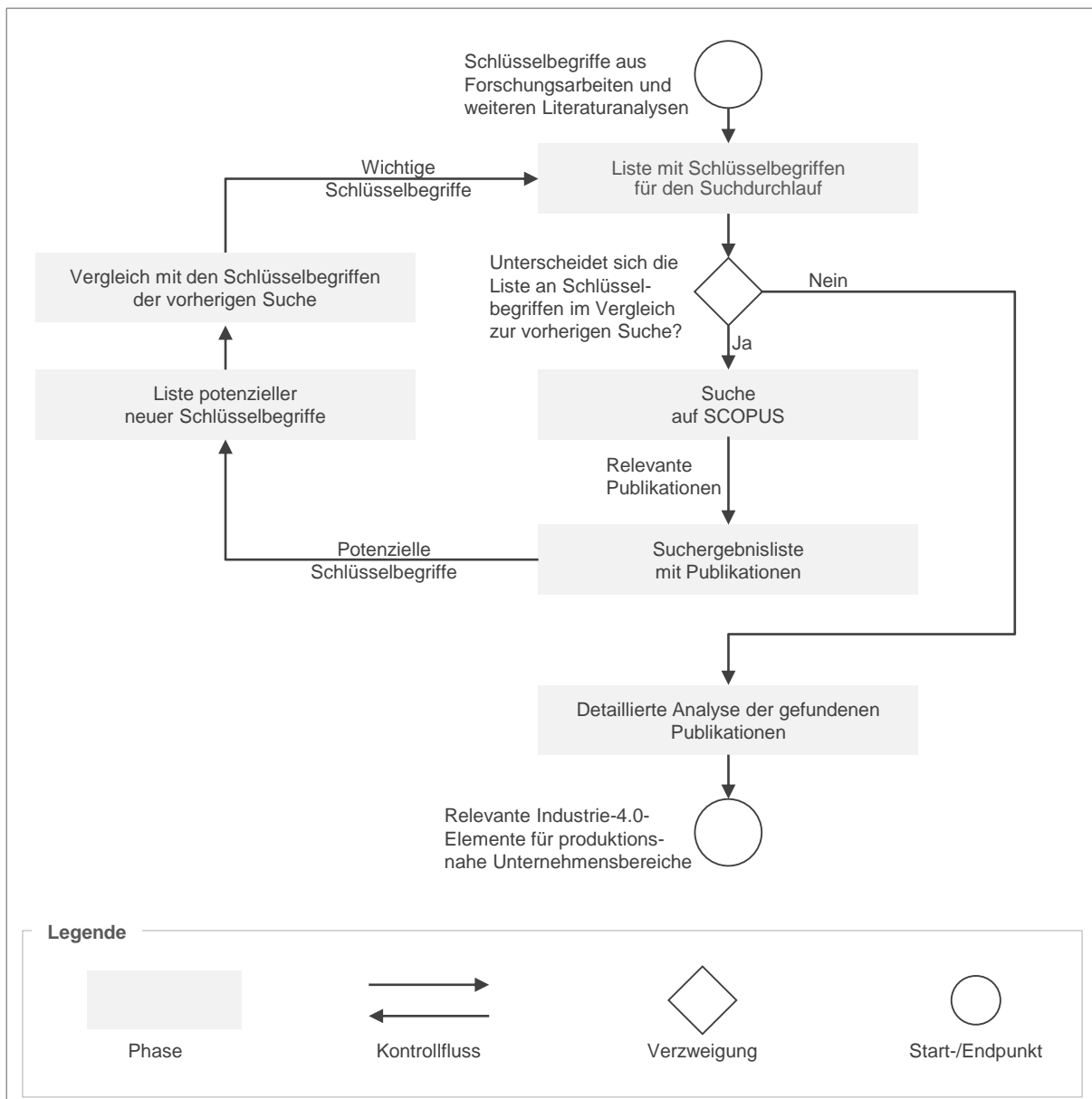


Abbildung 0-1: Systematische Literaturanalyse in Anlehnung an VERNIM ET AL. (2021)

E. Die sechs Forschungskategorien mit den jeweils zugeordneten Schlüsselbegriffen für den finalen Suchdurchlauf zur Identifikation von Industrie-4.0-Technologien in Anlehnung an MEßMER (2021, S. 55)

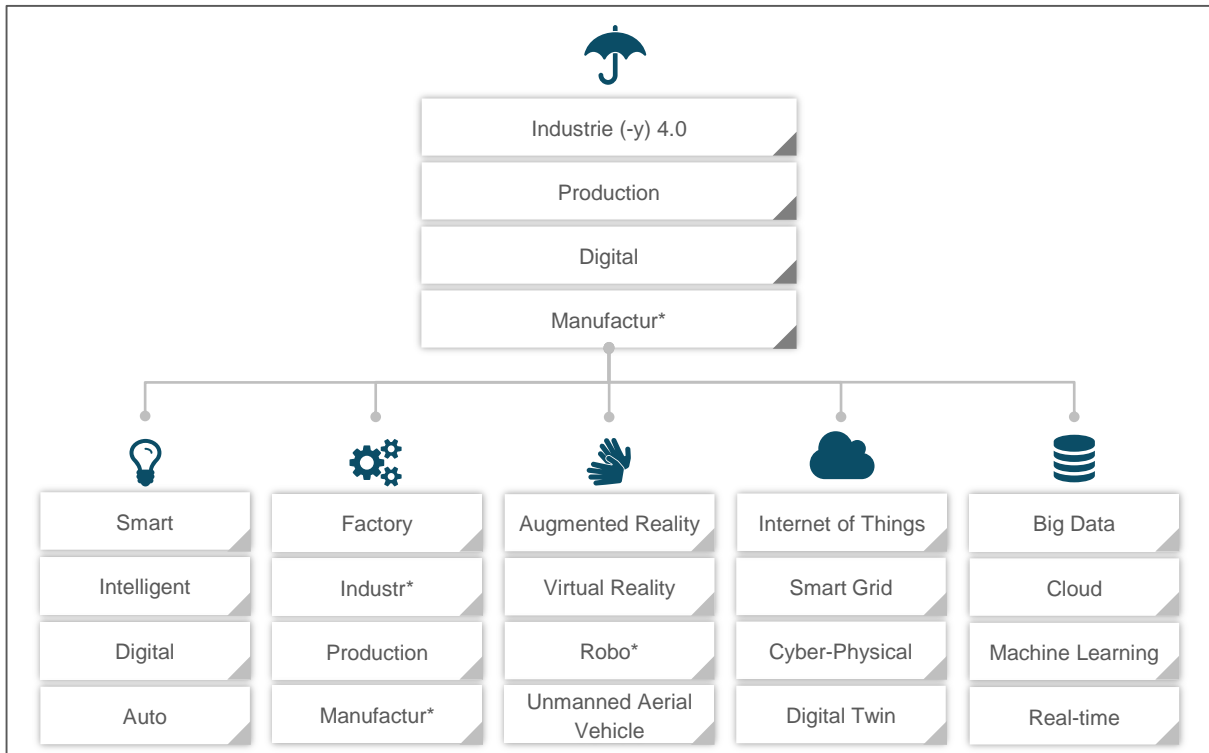


Abbildung 0-2: Die sechs Forschungskategorien mit den jeweils zugeordneten Schlüsselbegriffen für den finalen Suchdurchlauf zur Identifikation von Industrie-4.0-Technologien in Anlehnung an MEßMER (2021, S. 55)

F. Ergebnis der Literaturanalyse zur Identifikation von Industrie-4.0-Technologien in Anlehnung an MERMER (2021, S. 110)

Tabelle 0-4: Ergebnis der Literaturanalyse zur Identifikation von Industrie-4.0-Technologien in Anlehnung an MERMER (2021, S. 110)

Nr.	Industrie-4.0-Elemente	Anzahl Nennungen	Kumulierter Anteil in %	Anzahl Publikationen in:				
				2016	2017	2018	2019	2020
1	Virtual Reality	749	14,44%	1	1	4	8	14
2	Augmented Reality	687	13,24%	2	1	3	13	17
3	Digitaler Zwilling	630	12,14%	0	0	2	7	10
4	Fahrerlose Transportsysteme	438	8,44%	1	0	1	5	7
5	Echtzeitdaten	391	7,54%	2	1	5	12	18
6	Internet der Dinge	386	7,44%	0	1	3	9	10
7	Cyber-physisches System	341	6,57%	2	1	1	9	17
8	Sensoren	304	5,86%	1	1	4	12	12
9	Cloud-Nutzung	301	5,80%	1	1	2	7	14
10	Künstliche Intelligenz	127	2,45%	0	1	3	9	13
11	Big Data	123	2,37%	1	1	2	8	8
12	Datensicherheit	95	1,83%	1	0	0	3	7
13	Mensch-Maschine-Interaktion	88	1,70%	1	0	0	7	16
14	Auto-ID (RFID)	69	1,33%	1	0	1	2	6
15	Computer-aided X (CAX)	60	1,16%	1	0	4	6	10
16	Additive Fertigung	51	0,98%	0	1	0	4	5
17	Quick response	40	0,77%	0	0	0	2	4
18	Kabelloses Netzwerk	38	0,73%	0	0	0	2	4
19	Aktuator	37	0,71%	0	1	1	4	9
20	Big Data Analytics	33	0,64%	0	0	1	3	4
21	Predictive Analytics	33	0,64%	1	1	2	1	4
22	Kollaborative Roboter	29	0,56%	0	0	1	3	1
23	Mobile Elektronik	25	0,48%	0	1	0	3	4
24	Maschine-zu-Maschine Kommunikation	23	0,44%	0	0	0	4	5
25	Edge-computing	20	0,39%	0	0	0	2	3
26	Autonome Roboter/Prozesse	20	0,39%	0	0	0	1	3
27	Horizontale Integration	10	0,19%	0	0	0	1	3
28	Wearables	9	0,17%	0	0	0	0	2
29	Vertikale Integration	9	0,17%	0	0	0	1	2
30	Embedded System	6	0,12%	0	0	0	2	3
31	Plug & Produce	5	0,10%	0	0	0	1	2
32	Mobile Roboter	4	0,08%	0	0	0	2	1
33	Advanced materials	4	0,08%	0	0	0	0	2
34	Datenschutz	3	0,06%	0	0	0	1	1

G. Ergebnis der Industrie-4.0-Anwendungsfallanalyse basierend auf der Industrie-4.0-Plattform in Anlehnung an KREUZER (2021)

Tabelle 0-5: Ergebnis der Industrie-4.0-Anwendungsfallanalyse basierend auf der Industrie-4.0-Plattform in Anlehnung an KREUZER (2021)

Nr.	Industrie-4.0-Technologien	Nennungen	Kumulierter Anteil in %
1	Horizontale Integration	157	11 %
2	Echtzeitdaten	149	21 %
3	Data Analytics	134	31 %
4	Maschine-zu-Maschine-Kommunikation	117	39 %
5	Sensorik/Aktorik	105	46 %
6	Mobile Elektronik	91	52 %
7	Cloud-Nutzung	75	58 %
8	Vertikale Integration	65	62 %
9	Auto-ID (z. B. RFID)	62	66 %
10	Predictive Analytics	38	69 %
11	Datensicherheit	35	72 %
12	Computer-aided X (CAX)	35	74 %
13	Augmented Reality	30	76 %
14	Big Data	29	78 %
15	Mensch-Maschine-Interaktion	29	80 %
16	Remote-Zugriff	28	82 %
17	Kabelloses Netzwerk	27	84 %
18	Intelligente Objekte	27	86 %
19	Cyber-physisches System	26	88 %
20	5G-Netz	23	89 %
21	Digitaler Zwilling	23	91 %
22	Autonome Prozesse	18	92 %
23	Plug & Produce	18	93 %
24	Künstliche Intelligenz	18	95 %
25	Fahrerlose Transportsysteme	16	96 %
26	Kollaborative Roboter	16	97 %
27	Virtual Reality	14	98 %
28	Additive Manufacturing	11	99 %
29	Plug & Play	10	99 %
30	Digitaler Schatten	3	100 %
31	Datenschutz	1	100 %
32	Field-Device-Integration	1	100 %

H. Spezifikation der Lean- und Industrie-4.0-Elemente

Tabelle 0-6: Spezifikation der Lean-Production-Methoden

Legende: Zielgrößen: +3: sehr positiver Einfluss +2: positiver Einfluss +1: eher positiver Einfluss 0: kein Einfluss -1: eher negativer Einfluss -2: negativer Einfluss -1: sehr negativer Einfluss Anwendungsbereich /-ebene: ●: starker Einfluss ●: geringer Einfluss □: kein Einfluss Entwicklungsstufe: siehe Abbildung 5-6	Anwendungsbereich			Anwendungsebene				TRL	Zielgrößen						
	Produktion	Logistik	Instandhaltung	Arbeitsplatzebene	Zellebene	Segmentebene	Fabrikebene	Netzwerkebene	Entwicklungsstufe	Kosten	Zeit	Qualität	Flexibilität	Soziale Nachhaltigkeit	Ökologische Nachhaltigkeit
Lean-Production-Elemente															
Autonomation/Jidoka	●		●	●	●	●	●	●	4	0	3	1	2	1	1
5S	●	●	●	●	●	●	●	●	4	1	2	0	2	1	1
Standardisierung	●	●	●	●	●	●	●	●	4	1	2	0	0	0	1
Visuelles Management	●	●	●	●	●	●	●	●	4	3	3	0	2	1	1
Total Productive Maintenance	●		●	●	●	●	●	●	4	3	3	0	1	1	1
SMED	●			●	●	●	●	●	4	3	2	0	1	0	1
Poka Yoke	●	●	●	●	●	●	●	●	4	3	2	0	2	1	1
Kaizen	●	●	●	●	●	●	●	●	4	2	0	0	3	2	1
Kanban	●	●		●	●	●	●	●	4	2	2	2	1	0	1
Just in Time	●	●		●	●	●	●	●	4	3	2	2	3	2	1
Produktionsnivellierung	●	●		●	●	●	●	●	4	2	3	3	1	1	1
Synchronisation	●	●		●	●	●	●	●	4	3	3	3	1	2	1
Flexibles U-Layout	●	●		●	●	●	●		4	2	2	2	1	1	2
Einzelstückfluss	●	●		●	●	●	●	●	4	2	2	2	2	2	1
Produktion in Fluss	●	●		●	●	●	●		4	2	2	3	1	1	2
Mehrmaschinenbedienung	●	●	●	●	●	●	●	●	4	3	3	2	2	1	1
Multidisziplinär ausgebildete MA	●	●	●	●	●	●	●	●	4	2	0	3	1	1	1
Flexibel Mitarbeitende	●	●	●	●	●	●	●	●	4	3	3	3	1	2	1
Shopfloor-Management	●	●	●	●	●	●	●	●	4	2	2	2	2	2	1
Wertstrommanagement	●	●		●	●	●	●	●	4	3	2	2	1	1	1

Tabelle 0-7: Spezifikation der Industrie-4.0-Technologien

Legende: Zielgrößen: +3: sehr positiver Einfluss +2: positiver Einfluss +1: eher positiver Einfluss 0: kein Einfluss -1: eher negativer Einfluss -2: negativer Einfluss -1: sehr negativer Einfluss Anwendungsbereich /-ebene: ●: starker Einfluss ⦿: geringer Einfluss □: kein Einfluss Entwicklungsstufe: siehe Abbildung 5-6	Anwendungsbereich			Anwendungsebene				TRL	Zielgrößen						
	Produktion	Logistik	Instandhaltung	Arbeitsplatzebene	Zellebene	Segmentebene	Fabrikebene	Netzwerkebene	Entwicklungsstufe	Kosten	Zeit	Qualität	Flexibilität	Soziale Nachhaltigkeit	Ökologische Nachhaltigkeit
Industrie-4.0-Elemente															
Additive Fertigung	●	⦿	⦿	●	●	●	●	⦿	4	1	1	2	1	0	1
Augmented Reality	●	●	●	●	●	●	⦿	⦿	4	2	2	3	2	1	1
Virtual Reality	●	●	●	●	●	●	⦿	⦿	3	3	2	2	2	0	1
Mobile Elektronik	●	●	●	●	●	●	●	●	4	2	2	2	2	0	1
Mensch-Maschinen-Interaktion	●	●	●	●	●	●	⦿		4	2	2	2	1	0	1
Kollaborative Roboter	●	⦿	⦿	●	●	●	⦿		4	2	2	3	1	1	1
Fahrerlose Transportsysteme	●	●	⦿	●	●	●	●	⦿	4	2	2	2	2	0	1
Autonome Roboter	●	⦿	⦿	●	●	●	●		3	2	2	1	1	0	1
Computer-aided X	●	⦿	●	●	●	●	●	⦿	4	2	1	2	2	0	1
Digitaler Zwilling	●	●	●	●	●	●	●	●	4	3	1	1	2	0	1
Maschine-zu-Maschine-Kommunikation	●	●	●	●	●	●	⦿		4	3	3	1	1	0	1
Plug & Produce	●	⦿	●	●	●	●	⦿		4	1	1	1	2	0	1
Vertikale Integration	●	●	●	●	●	●	●	●	4	1	1	1	1	0	1
Horizontale Integration	●	●	●	●	●	●	●	●	4	2	2	3	2	1	1
Datensicherheit	●	●	●	●	●	●	●	●	4	2	2	3	2	1	1
Datenschutz	●	●	●	●	●	●	●	●	4	3	2	1	2	1	1
Cloud-Nutzung	●	●	●	●	●	●	●	●	4	0	0	0	0	1	0
Kabellose Netzwerke	●	●	●	●	●	●	●	●	4	0	0	0	0	1	0
Echtzeitdaten	●	●	●	●	●	●	●	●	4	1	1	1	1	0	0
Sensorik und Aktorik	●	●	●	●	●	●	⦿	⦿	4	1	1	1	2	1	1
Auto-ID (RFID)	●	●	⦿	●	●	●	⦿	⦿	4	2	1	2	2	0	1
Intelligente Objekte	●	●	●	●	●	●	⦿	⦿	4	2	1	1	1	1	1
Predictive Analytics	●	●	●	●	●	●	●	⦿	3	2	2	1	1	1	1
Data-Analytics	●	●	●	●	●	●	●	●	4	1	1	1	2	1	2
Big Data	●	●	●	●	●	●	●	●	4	1	1	2	2	1	1
Cyber-physisches System	●	●	●	●	●	●	●	●	4	2	1	2	2	1	1

I. Implementierungsdauer und Relevanz der Lean- und Industrie-4.0-Elemente (DILLINGER ET AL. 2021c)

Tabelle 0-8: Implementierungsdauer und Relevanz der Lean- und Industrie-4.0-Elemente (DILLINGER ET AL. 2021c)

	Implementierungsdauer					Relevanz				
	Gesamtwert	Niedrig	Eher niedrig	Eher hoch	Hoch	Gesamtwert	Niedrig	Eher niedrig	Eher hoch	Hoch
		1	2	3	4		1	2	3	4
Lean- und Industrie-4.0-Elemente										
Autonomation (Jidoka)	3,38			X		3,55				X
5S	1,46	X				2,93			X	
Standardisierung	3,17			X		3,57				X
Visuelles Management	1,69		X			3,17			X	
Total Productive Maintenance	3,33			X		3,33			X	
Single Minute Exchange of Die	2,16		X			3,28			X	
Poka Yoke	2,08		X			3,00			X	
Kaizen	3,12			X		3,62				X
Kanban	2,21		X			3,13			X	
Just in Time	3,00			X		3,00			X	
Produktionsnivellierung	3,32			X		3,60				X
Synchronisation	2,68			X		3,33			X	
Flexibles U-Layout	2,16		X			2,59			X	
Einzelstückfluss	3,45			X		3,21			X	
Produktion im Fluss	3,11			X		3,60				X
Mehrmaschinenbedienung	3,43			X		3,41			X	
Multidisziplinär ausgebildete MA	3,62				X	3,76				X
Flexibler Mitarbeitereinsatz	3,62				X	3,80				X
Shopfloor-Management	2,79			X		3,62				X
Wertstrommanagement	2,37		X			3,72				X
Additive Fertigung	2,66			X		3,21			X	
Augmented Reality	2,61			X		2,96			X	
Virtual Reality	3,14			X		2,48		X		
Mobile Elektronik	1,22	X				3,59				X
Mensch-Maschinen-Interaktion	2,68			X		3,17			X	
Kollaborative Roboter	2,93			X		2,86			X	
Fahrerlose Transportsysteme	2,74			X		3,10			X	
Autonome Roboter	3,69				X	2,68			X	
Computer-aided X	2,15		X			3,69				X
Digitaler Zwilling	3,52				X	2,38		X		
Maschine-zu-Maschine-Kommunikation	2,52			X		2,69			X	
Plug & Produce	3,00			X		2,76			X	
Vertikale Integration	3,26			X		3,54				X
Horizontale Integration	3,26			X		3,57				X
Datensicherheit	2,30		X			3,73				X
Datenschutz	2,30		X			3,70				X
Cloud-Nutzung	2,45		X			2,97			X	
Kabellose Netzwerke	1,93		X			3,70				X
Echtzeitdaten	3,10			X		3,63				X
Sensorik und Aktorik	2,00		X			3,50				X
Auto-ID	2,11		X			3,48			X	
Intelligente Objekte	3,11			X		3,31			X	
Predictive Analytics	3,59				X	3,38			X	
Data Analytics	3,55				X	3,80				X
Big Data	2,82			X		3,62				X
Cyber-physisches System	3,85				X	3,41			X	

J. Interdependenzanalyse basierend auf den Ergebnissen der Industrie-4.0-Anwendungsfallanalyse in Anlehnung an KREUZER (2021)

Tabelle 0-9: Interdependenzanalyse basierend auf den Ergebnissen der Industrie-4.0-Anwendungsfallanalyse in Anlehnung an KREUZER (2021)

Legende: n: Anzahl Anwendungs-fälle je Wirk-verknüpfung	Industrie-4.0-Technologien																										
	Big Data	Data Analytics	Autonome Roboter	Fahrerlose Transportsysteme	Computer-aided X (CAX)	Predictive Analytics	Digitaler Zwilling	Vertikale Integration	Maschine-zu-Maschine-Kommunikation	Plug & Produce	Horizontale Integration	Auto-ID (RFID)	Sensoren & Aktoren	Intelligente Objekte	Cyber-physisches System	Echtzeitdaten	Datensicherheit	Datenschutz	Cloud-Nutzung	Kabellose Netzwerke	Additive Fertigung	Augmented Reality	Virtual Reality	Mobile Elektronik	Mensch-Maschine-Interaktion	Kollaborative Roboter	
	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	I-7	I-8	I-9	I-10	I-11	I-12	I-13	I-14	I-15	I-16	I-17	I-18	I-19	I-20	I-21	I-22	I-23	I-24	I-25	I-26	
I-1		17	1			7	1	7	9	1	7	3	10	1	1	20	7		10	1	-	3	-	10	2		
I-2	17		8	3	10	26	13	25	42	6	33	11	51	10	5	55	13		36	17	2	6	3	33	8	4	
I-3	1	8		5		2	2	4	11	2	7	3	6	3	2	6	1		3	4			1	5	2	2	
I-4		3	5		1		2	1	7	1	5	2	4	2	2	4			2	2	1		1	2	4	4	
I-5		10	-	1		1	6	6	5	2	18	5	3	3	1	7	1		3		3	1	4	6	2	1	
I-6	7	26	2		1		4	5	14	1	5	3	19	2	2	21	4		15			2		8	2	1	
I-7	1	13	2	2	6	4		9	9	2	9	7	7	4		9			7	4			1	5	3	3	
I-8	7	25	4	1	6	5	9		24	5	39	12	12	3	8	32	5		20	5	4	2		23	5	1	
I-9	9	42	11	7	5	14	9	24		2	38	23	41	16	13	51	12		30	24	2	7	5	27	11	4	
I-10	1	6	2	1	2	1	2	5	2		5	2	3	2	2	4	1		3	1	1	2	2	1		4	
I-11	7	33	7	18	5	5	9	39	38	5		19	14	9	9	51	7		30	8	4	3	1	30	4	4	
I-12	3	11	3	2	5	3	7	12	23	2	9		16	17	4	27	3		9	11	1	9	1	23	3	4	
I-13	10	51	6	4	3	19	7	12	41	3	14	16		7	10	42	12		25	27	3	5	4	24	13	2	
I-14	1	10	3	2	3	2	4	3	16	2	9	17	7		3	14			5	4	1	1	1	8	2		
I-15	1	5	2	2	1	2		8	13	2	9	4	10	3		8	1		6	6			1	6	6	2	
I-16	20	55	6	4	7	21	9	32	51	4	51	27	42	14	8		16		34	22	4	15	3	40	7	2	
I-17	7	13	1		1	4		5	12	1	7	3	12		1	16		1	13	7		2		6	2		
I-18																	1										
I-19	10	36	3	2	3	15	7	20	30	3	30	9	25	5	6	34	13			16	4	2	1	20	8	2	
I-20	1	17	4	2		6	4	5	24	1	8	11	27	4	6	22	7		16		1	5	1	19	5	3	
I-21		2		1	3			4	2	1	4	1	3	1		4			4	1		1	2	1	2	1	
I-22	3	6			1	2		2	7	2	3	9	5	1		15	2		2	5	1		1	14	7	1	
I-23		3	1	1	4		1		5	2	1	1	4	1	1	3			1	1	2	1			2	2	
I-24	10	33	5	2	6	8	5	23	27	1	30	23	24	8	6	40	6		20	19	1	14			8	1	
I-25	2	8	2	4	2	2	3	5	11		4	3	13	2	6	7	2		8	5	2	7	2	8		4	
I-26	4	2	4	1	1	3	1	4	4	4	4	4	2		2	2			2	3	1	1	2	1	4		
Gesamtanzahl an Anwendungs-fällen	29	134	18	16	35	38	23	65	117	18	103	62	105	27	26	149	35	1	75	50	11	30	14	91	29	16	

K. Wirkverknüpfungen zwischen Lean- und Industrie-4.0-Elementen basierend auf der bestehenden Fachliteratur

Tabelle 0-10: Wirkverknüpfungen zwischen Lean- und Industrie-4.0-Elementen basierend auf der bestehenden Fachliteratur

	Industrie-4.0-Technologien																										
	Big Data	Data Analytics	Autonome Roboter	Fahrerlose Transportsysteme	Computer-aided X (CAX)	Predictive Analytics	Digitaler Zwilling	Vertikale Integration	Maschine-zu-Maschine-Kommunikation	Plug & Produce	Horizontale Integration	Auto ID (RFID)	Sensoren & Aktoren	Intelligente Objekte	Cyber-physisches System	Echtzeitdaten	Datensicherheit	Datenschutz	Cloud-Nutzung	Kabellose Netzwerke	Additive Fertigung	Augmented Reality	Virtual Reality	Mobile Elektronik	Mensch-Maschine-Interaktion	Kollaborative Roboter	
Legende:																											
X: literaturbasierte Wirkverknüpfung																											
Lean-Production-Methoden	Einzelstückfluss	X	X	X		X				X						X	X					X	X	X			X
	Flexibles Layout		X					X														X					X
	Produktion im Fluss	X	X	X	X	X		X	X	X		X	X	X		X	X	X		X		X	X	X	X	X	X
	Synchronisation	X	X		X			X	X		X		X			X				X			X	X			
	Produktionsnivellierung	X	X		X		X	X	X		X	X	X	X	X	X				X			X	X		X	
	Just in Time	X	X		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X	X
	Kanban	X	X	X	X	X		X	X		X	X	X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X	X
	Mehrmaschinenbedienung	X	X		X		X	X	X		X		X		X	X				X		X	X	X	X	X	X
	Multidisziplinär ausgebildete Mitarbeitende	X	X		X		X	X	X		X		X		X	X				X			X	X	X	X	X
	Flexibler Mitarbeitendeneinsatz	X	X					X	X		X		X		X	X				X			X	X			X
	Autonation (Jidoka)	X	X	X				X	X		X	X	X	X	X	X				X	X		X	X	X	X	
	5S	X	X		X	X		X	X	X		X	X	X		X				X		X	X	X		X	
	Standardisierung	X	X	X	X	X		X	X		X	X	X		X	X				X			X	X	X	X	X
	Visuelles Management	X	X		X	X		X			X	X	X		X	X				X			X	X	X	X	
	Total Productive Maintenance	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X				X		X	X	X		X	
	Single Minute Exchange of Die	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X		X	X	X			X
	Poka Yoke	X	X		X	X		X	X		X	X	X	X	X	X				X		X	X	X		X	
	Kaizen	X	X	X	X	X		X	X		X	X	X		X	X				X		X	X	X	X	X	X
Shopfloor-Management							X			X						X											
Wertstrommanagement	X	X		X		X	X			X	X	X		X	X				X	X		X	X		X		

L. Hilfsmittel 1 für die Vorbereitungsphase

Hilfsmittel 1 | Checkliste der Lean-4.0-Implementierungsstrategie

a) Allgemeine Informationen

Zielsetzung

Das Ziel dieser Analyse ist Erarbeitung der unternehmensspezifischen Modellparameter für die Generierung einer Lean-4.0-Implementierungsstrategie.

Protokollant*in

Name:	
Abteilung:	
Datum:	

Projektphasen

```

    graph LR
      subgraph Vorbereitung
        V1[Projektinitiierung] --> V2[Typisierung des Anwendungsbereichs]
      end
      subgraph Bewertung[Auswahl]
        B1[Bewertung und Auswahl]
      end
      subgraph Simulation
        S1[Entwicklung der Lean-4.0-Strategie] --> S2[Präsentation der Lean-4.0-Strategie]
      end
      V2 --> B1
      B1 --> S1
      S1 --> S2
      
```

Hilfsmittel:

- Vorbereitung: Hilfsmittel 1 (Excel), Hilfsmittel 2 (Excel)
- Bewertung und Auswahl: Hilfsmittel 3 (Excel)
- Simulation: Hilfsmittel 4 (Simulationsmodell - BlueA), Hilfsmittel 5 (Ergebnispräsentation - Excel, PowerPoint)

b) Projektinitiierung

Vorbereitungsschritte

Nr.	Schritte zur Vorbereitung	Zuständig	Zieltermin	Status
1	Festlegung des Analysebereichs			
2	Erforderliche Teilnehmende zur Durchführung der Analyse auswählen			
3	Erforderliche Unterlagen zur Durchführung der Analyse vorbereiten			
4	Termine und Ablauf zur Erstellung der Lean-4.0-Implementierungsstrategie			

Analysebereich

Werk:	Produkte der Sektion:
Wertstrom:	Kunden der Sektion:
Wertstromsektion:	Lieferanten der Sektion:
Umsatz der Sektion:	Aktuelles Datum:

Teilnehmende

Nr.	Schritte zur Vorbereitung	Abteilung/Funktion	Vorname	Nachname
1	Projektleitung			
2	Projektleitung			
3	Projektbearbeitung (1)			
	Projektbearbeitung (2)			
	Projektbearbeitung (3)			
4	Bereichsverantwortliche (Produktion)			

Stand: 04.08.2022
Seite 1 von 1

Abbildung 0-3: Hilfsmittel 1 für die Vorbereitungsphase

M. Hilfsmittel 2 für die Typisierung des Anwendungsbereichs (Seite 1 von 2)

Hilfsmittel 2 | Typisierung des Anwendungsbereichs

a) Allgemeine Informationen

Zielsetzung

Das Ziel der Typisierung des Anwendungsbereichs besteht darin, die gewählte Wertstromsektion zu spezifizieren und relevante Zielgrößen zu gewichten, um daraus eine Empfehlung für die Implementierung möglicher Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien basierend auf bereitgestellten Steckbriefen abzuleiten.

Protokollant*in

Name:	
Abteilung:	
Datum:	

Projektphasen

b) Morphologischer Kasten

Bitte spezifizieren Sie das Unternehmen durch nachfolgende Merkmale:

1 - Typisierung des Unternehmens

1.1	Unternehmensgröße	Kleine Unternehmen ≤ 10 Mio. € Jahresumsatz < 50 Mitarbeitende	Mittlere Unternehmen ≤ 50 Mio. € Umsatz < 250 Mitarbeitende	Große Unternehmen > 50 Mio. € Umsatz ≥ 250 Mitarbeitende		
1.2	Wirtschaftsbranche	Automotive	Maschinenbau	Elektroindustrie	Holzindustrie	Sonstiges
1.3	Anwendungsfokus	Produktion	Logistik	Instandhaltung		

Bitte spezifizieren Sie den Anwendungsbereich durch nachfolgende Merkmale:


2 - Typisierung des Anwendungsbereichs

2.1	Produktionsart	Einzelproduktion	Kleinserienproduktion	Mittelserienproduktion	Großserienproduktion	Massenproduktion	
2.2	Produktionsprinzip	Baustellenproduktion	Werkstattproduktion	Gruppenproduktion	Fließproduktion		
2.3	Produktionsstrategie	Engineer-to-Order	Make-to-Order	Assemble-to-Order	Make-to-Stock		
2.4	Lean-Production-Reifegrad	Außenstehend	Beginn	Fortgeschritten	Erfahren	Expertise	Exzellenz
2.5	Industrie-4.0-Reifegrad	Außenstehend	Beginn	Fortgeschritten	Erfahren	Expertise	Exzellenz

Stand: 04.08.2022 Seite 1 von 2

Abbildung 0-4: Hilfsmittel 2 für die Typisierung des Anwendungsbereichs (Seite 1 von 2)

N. Hilfsmittel 2 für die Typisierung des Anwendungsbereichs (Seite 2 von 2)

Hilfsmittel 2 Typisierung des Anwendungsbereichs								
b) Morphologischer Kasten								
Bitte spezifizieren Sie die Zielgrößen durch nachfolgende Merkmale:								
 3 - Relevanz der Zielgrößen								
		sehr unwichtig			neutral			sehr wichtig
3.1	Zeit	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
3.2	Kosten	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
3.3	Qualität	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
3.4	Flexibilität	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
3.5	Ökologische Nachhaltigkeit	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
3.6	Soziale Nachhaltigkeit	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

Stand: 04.08.2022 Seite 2 von 2

Abbildung 0-5: Hilfsmittel 2 für die Typisierung des Anwendungsbereichs (Seite 2 von 2)

O. Hilfsmittel 3 für die Bewertungs- und Auswahlphase (Seite 1 von 4)

Hilfsmittel 3 Bewertung und Auswahl																																																																					
a) Allgemeine Informationen																																																																					
<p>Zielsetzung</p> <p>Das Ziel ist es den aktuellen Stand der Lean- und Industrie-4.0-Elemente im Anwendungsbereich zu bewerten, um darauf aufbauend die Relevanz der Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien für das Unternehmen zu bestimmen und die Elemente auszuwählen. Zusätzlich gilt es die Modellparameter zu bewerten.</p>	<p>Protokollant*in</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 60%;">Name:</td><td></td></tr> <tr><td>Abteilung:</td><td></td></tr> <tr><td>Datum:</td><td></td></tr> </table>				Name:		Abteilung:		Datum:																																																												
Name:																																																																					
Abteilung:																																																																					
Datum:																																																																					
Projektphasen																																																																					
<pre> graph LR subgraph Vorbereitung direction TB V1[Projektinitiierung] --- V2[Typisierung des Anwendungsbereichs] end subgraph Bewertung_und_Auswahl direction TB B1[Bewertung und Auswahl] end subgraph Simulation direction TB S1[Entwicklung der Lean-4.0-Strategie] --- S2[Präsentation der Lean-4.0-Strategie] end V2 --> B1 B1 --> S1 S1 --> S2 </pre>																																																																					
Hilfsmittel 1	Hilfsmittel 2	Hilfsmittel 3	Hilfsmittel 4 Simulationsmodell	Hilfsmittel 5 Ergebnispräsentation																																																																	
b) Unterstützung zur Vorbereitung																																																																					
Teilnehmende																																																																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 5%;">Nr.</th> <th style="width: 35%;">Schritte zur Vorbereitung</th> <th style="width: 25%;">Abteilung/Funktion</th> <th style="width: 15%;">Vorname</th> <th style="width: 20%;">Nachname</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>Projektlenkung</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>Projektleitung</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td rowspan="3">3</td><td>Projektbearbeitung (1)</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Projektbearbeitung (2)</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Projektbearbeitung (3)</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>Bereichsverantwortliche (Produktion)</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>					Nr.	Schritte zur Vorbereitung	Abteilung/Funktion	Vorname	Nachname	1	Projektlenkung				2	Projektleitung				3	Projektbearbeitung (1)				Projektbearbeitung (2)				Projektbearbeitung (3)				4	Bereichsverantwortliche (Produktion)																																			
Nr.	Schritte zur Vorbereitung	Abteilung/Funktion	Vorname	Nachname																																																																	
1	Projektlenkung																																																																				
2	Projektleitung																																																																				
3	Projektbearbeitung (1)																																																																				
	Projektbearbeitung (2)																																																																				
	Projektbearbeitung (3)																																																																				
4	Bereichsverantwortliche (Produktion)																																																																				
Dokumente																																																																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 5%;">Nr.</th> <th style="width: 35%;">Schritte zur Vorbereitung</th> <th style="width: 25%;">Zuständig</th> <th style="width: 15%;">Zieltermin</th> <th style="width: 20%;">Status</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>Aktuelle Wertstromanalyse</td><td>Bereichsverantwortliche</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>Aktuelles Wertstromdesign</td><td>Bereichsverantwortliche</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>Prozess-Beziehungs-Diagramm</td><td>Bereichsverantwortliche</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>Liste der A-B-Teile</td><td>Bereichsverantwortliche</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td>Liste der A-B-Kunden</td><td>Bereichsverantwortliche</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td>Liste der Lieferanten</td><td>Bereichsverantwortliche</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td>Typisierung des Anwendungsbereichs</td><td>Projektleitung</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td>Lean-Production-Steckbriefe</td><td>Projektleitung</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>9</td><td>Industrie-4.0-Steckbriefe</td><td>Projektleitung</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td>Lean-Production-Assessmentergebnisse</td><td>Bereichsverantwortliche</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>11</td><td>Industrie-4.0-Assessmentergebnisse</td><td>Bereichsverantwortliche</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>12</td><td>Genehmigung des Betriebsrats</td><td>Projektleitung</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>					Nr.	Schritte zur Vorbereitung	Zuständig	Zieltermin	Status	1	Aktuelle Wertstromanalyse	Bereichsverantwortliche			2	Aktuelles Wertstromdesign	Bereichsverantwortliche			3	Prozess-Beziehungs-Diagramm	Bereichsverantwortliche			4	Liste der A-B-Teile	Bereichsverantwortliche			5	Liste der A-B-Kunden	Bereichsverantwortliche			6	Liste der Lieferanten	Bereichsverantwortliche			7	Typisierung des Anwendungsbereichs	Projektleitung			8	Lean-Production-Steckbriefe	Projektleitung			9	Industrie-4.0-Steckbriefe	Projektleitung			10	Lean-Production-Assessmentergebnisse	Bereichsverantwortliche			11	Industrie-4.0-Assessmentergebnisse	Bereichsverantwortliche			12	Genehmigung des Betriebsrats	Projektleitung		
Nr.	Schritte zur Vorbereitung	Zuständig	Zieltermin	Status																																																																	
1	Aktuelle Wertstromanalyse	Bereichsverantwortliche																																																																			
2	Aktuelles Wertstromdesign	Bereichsverantwortliche																																																																			
3	Prozess-Beziehungs-Diagramm	Bereichsverantwortliche																																																																			
4	Liste der A-B-Teile	Bereichsverantwortliche																																																																			
5	Liste der A-B-Kunden	Bereichsverantwortliche																																																																			
6	Liste der Lieferanten	Bereichsverantwortliche																																																																			
7	Typisierung des Anwendungsbereichs	Projektleitung																																																																			
8	Lean-Production-Steckbriefe	Projektleitung																																																																			
9	Industrie-4.0-Steckbriefe	Projektleitung																																																																			
10	Lean-Production-Assessmentergebnisse	Bereichsverantwortliche																																																																			
11	Industrie-4.0-Assessmentergebnisse	Bereichsverantwortliche																																																																			
12	Genehmigung des Betriebsrats	Projektleitung																																																																			
<p style="display: flex; justify-content: space-between;">Stand: 04.08.2022 Seite 1 von 4</p>																																																																					

Abbildung 0-6: Hilfsmittel 3 für die Bewertungs- und Auswahlphase (Seite 1 von 4)

P. Hilfsmittel 3 für die Bewertungs- und Auswahlphase (Seite 2 von 4)

Hilfsmittel 3 Bewertung und Auswahl						
c) Bestimmung des Initialwerts						
Bitte bestimmen Sie den Initialwert für die Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien:						
	Außenstehend	Beginn	Fortgeschritten	Erfahren	Expertise	Exzellenz
Autonomation						
5S						
Standardisierung						
Visuelles Management						
Total Productive Maintenance (TPM)						
Single Minute Exchange of Die (SMED)						
Poka Yoke						
Kaizen						
Kanban						
Just in Time						
Produktionsnivellierung						
Synchronisation						
Flexibles Layout						
Einzelstückfluss						
Produktion im Fluss						
Mehrmaschinenbedienung						
Multidisziplinär ausgebildete Mitarbeitende						
Flexibler Mitarbeiteneinsatz						
Shopfloor-Management						
Wertstrommanagement						
Additive Fertigung						
Augmented Reality						
Virtual Reality						
Mobile Elektronik						
Mensch-Maschinen-Interaktion						
Kollaborative Roboter						
Fahrerlose Transportsysteme						
Autonome Roboter						
Computer-aided X						
Digitaler Zwilling						
Maschine-zu-Maschine-Kommunikation						
Plug & Produce						
Vertikale Integration						
Horizontale Integration						
Datensicherheit						
Datenschutz						
Cloud-Nutzung						
Kabellose Netzwerke						
Echtzeitdaten						
Sensorik und Aktorik						
Auto-ID (RFID)						
Intelligente Objekte						
Predictive Analytics						
Data Analytics						
Big Data						
Cyber-physisches System						

Stand: 04.08.20122

Seite 2 von 4

Abbildung 0-7: Hilfsmittel 3 für die Bewertungs- und Auswahlphase (Seite 2 von 4)

Q. Hilfsmittel 3 für die Bewertungs- und Auswahlphase (Seite 3 von 4)

Hilfsmittel 3 Bewertung und Auswahl					
d) Bestimmung der Relevanz					
Bitte bestimmen Sie die Relevanz für die Lean-Methoden und Industrie-4.0-Technologien und wählen diese aus:					
	Nicht relevant	Eher relevant	Relevant	Sehr relevant	Auswahl Ja/Nein
Autonomation					
5S					
Standardisierung					
Visuelles Management					
Total Productive Maintenance (TPM)					
Single Minute Exchange of Die (SMED)					
Poka Yoke					
Kaizen					
Kanban					
Just in Time					
Produktionsnivellierung					
Synchronisation					
Flexibles Layout					
Einzelstückfluss					
Produktion im Fluss					
Mehrmaschinenbedienung					
Multidisziplinär ausgebildete Mitarbeitende					
Flexibler Mitarbeiteneinsatz					
Shopfloor-Management					
Wertstrommanagement					
Additive Fertigung					
Augmented Reality					
Virtual Reality					
Mobile Elektronik					
Mensch-Maschinen-Interaktion					
Kollaborative Roboter					
Fahrerlose Transportsysteme					
Autonome Roboter					
Computer-aided X					
Digitaler Zwilling					
Maschine-zu-Maschine-Kommunikation					
Plug & Produce					
Vertikale Integration					
Horizontale Integration					
Datensicherheit					
Datenschutz					
Cloud-Nutzung					
Kabellose Netzwerke					
Echtzeitdaten					
Sensorik und Aktorik					
Auto-ID (RFID)					
Intelligente Objekte					
Predictive Analytics					
Data Analytics					
Big Data					
Cyber-physisches System					

Stand: 04.08.20122 Seite 3 von 4

Abbildung 0-8: Hilfsmittel 3 für die Bewertungs- und Auswahlphase (Seite 3 von 4)

R. Hilfsmittel 3 für die Bewertungs- und Auswahlphase (Seite 4 von 4)

Hilfsmittel 3 Bewertung und Auswahl											
e) Finalisierung der Modellparameter											
Bitte spezifizieren Sie die Modellparameter durch nachfolgende Merkmale:											
Finalisierung der Modellparameter											
4.1	Veränderungsfähigkeit	Keine Bereitschaft (0)	Geringe Bereitschaft (1)	Mittlere Bereitschaft (2)	Hohe Bereitschaft (3)						
4.2	Kompetenz der operativen Mitarbeitenden	Beginn (0)	Basis (1)	Fortgeschritten (2)	Expertise (3)						
4.3	Kompetenz der Projektleitenden	Beginn (0)	Basis (1)	Fortgeschritten (2)	Expertise (3)						
4.4	Max. Anzahl paralleler Verbesserungsprojekte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	> 9
f) Finale Überprüfung der Datengrundlage											
Bitte überprüfen und modifizieren Sie gegebenenfalls die Datengrundlage des Simulationsmodells:											
Nr.	Überprüft	Zuständig	Bis Wann	Status							
1	Lean-Production-Interdependenzmatrix										
2	Industrie-4.0-Interdependenzmatrix										
3	Lean-Industrie-4.0-Interdependenzmatrix										
4	Industrie-4.0-Lean-Interdependenzmatrix										
5	Einfluss Lean-Production-Methoden auf Zielgrößen										
6	Einfluss Industrie-4.0-Technologien auf Zielgrößen										
7	Industrie-4.0-Technologiereifegrad für Produktionsbereich										
Stand: 04.08.20122											
Seite 4 von 4											

Abbildung 0-9: Hilfsmittel 3 für die Bewertungs- und Auswahlphase (Seite 4 von 4)

S. Hilfsmittel 4 zur Simulation der Lean-4.0-Implementierungsstrategie

Hilfsmittel 4 | Simulation

a) Allgemeine Informationen

Zielsetzung

Das Ziel ist es für die ausgewählten Lean-Production-Methoden und Industrie-4.0-Technologien mit Hilfe des System-Dynamics-Simulationsmodells einen Implementierungsfortschritts-Graphen abzuleiten sowie den Entwicklungsverlauf auf die produktionsrelevanten Zielgrößen zu simulieren.

Protokollant*in

Name:	
Abteilung:	
Datum:	

Projektphasen

Vorbereitung

Projekt-initiierung

Hilfsmittel 1

Bewertung und Auswahl

Typisierung des Anwendungsbereichs

Hilfsmittel 2

Simulation

Bewertung und Auswahl

Hilfsmittel 3

Entwicklung der Lean-4.0-Strategie

Hilfsmittel 4 Simulationsmodell

Präsentation der Lean-4.0-Strategie

Hilfsmittel 5 Ergebnispräsentation

b) Beschreibung des Simulationsablaufs

Stand: 04.08.2022
Seite 1 von 1

Abbildung 0-10: Hilfsmittel 4 zur Simulation der Lean-4.0-Implementierungsstrategie

T. Relevante Lean- und Industrie-4.0-Elemente für Unternehmen A

Tabelle 0-11: Relevante Lean- und Industrie-4.0-Elemente für Unternehmen A

Lean-Production- und Industrie-4.0-Elemente	Bewertung						Relevanz und Auswahl			
	Außenstehend	Beginn	Fortgeschritten	Erfahren	Expertise	Exzellenz	Nicht relevant (nicht ausgewählt)	Eher relevant (ausgewählt)	Relevant (ausgewählt)	Sehr Relevant (ausgewählt)
Flexibler Mitarbeitereinsatz				●					●	●
Visuelles Management				●					●	
Shopfloor-Management		●								●
Kaizen		●							●	
5S			●					●		
Total Productive Maintenance (TPM)			●						●	
Standardisierung			●						●	
Mehrmaschinenbedienung				●					●	
Mobile Elektronik				●					●	
Single Minute Exchange of Dies				●				●		
Intelligente Objekte	●							●		
Data Analytics		●								●
Cyber-physisches System	●							●		
Autonation/Jidoka		●						●		
Echtzeitdaten		●						●		
Synchronisation			●						●	
Predictive Analytics (Maintenance)	●								●	
Wertstrommanagement		●							●	
Kollaborative Roboter		●						●		
Kanban		●						●		
Produktionsnivellierung		●								●
Mensch-Maschinen-Interaktion		●						●		
Einzelstückfluss		●							●	
Poka Yoke		●						●		
Virtual Reality	●						●			
Kabellose Netzwerke				●					●	
Flexibles U-Layout			●					●		
Augmented Reality	●									●
Autonome Roboter	●						●			
Digitaler Zwilling	●							●		
Fahrerlose Transportsysteme	●						●			
Horizontale Integration		●								●
Plug & Produce	●								●	
Maschine-zu-Maschine-Kommunikation	●							●		
Additive Fertigung	●							●		
Multidisziplinäre ausgebildete Mitarbeitende				●					●	
Computer-aided X				●					●	
Just in Time			●					●		
Vertikale Integration		●						●		
Auto-ID (RFID)	●							●		
Big Data			●						●	
Sensoren und Aktoren			●					●		
Produktion im Fluss		●						●		
Datenschutz				●				●		
Datensicherheit				●				●		
Cloud-Nutzung		●							●	