



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Antonio Kreß

Methodik zur Konfiguration von Lernfabriken für die schlanke Produktion

**Schriftenreihe des PTW
„Innovation Fertigungstechnik“**

Herausgeber
Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele
Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich
Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

PTW
TU DARMSTADT

Methodik zur Konfiguration von Lernfabriken für die schlanke Produktion

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

eingereichte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Antonio Kreß, M. Sc.

aus Fulda

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. techn. Christian Ramsauer
Tag der Einreichung:	18. Mai 2022
Tag der mündlichen Prüfung:	02. August 2022

Darmstadt 2022
D17

Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik"

Antonio Kreß

**Methodik zur Konfiguration von Lernfabriken
für die schlanke Produktion**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2022

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

License: CC BY-NC 4.0 International - Creative Commons, Attribution, NonCommercial <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8804-5

ISSN 1864-2179

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren Telefon:
02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die effiziente Produktion kundenindividueller Produkte, die Resilienz gegenüber Störungen sowie der Wandel hin zu einer klimaneutralen Produktion stellen nur einige Herausforderungen für produzierende Unternehmen dar. Zur Entwicklung der hierfür notwendigen Kompetenzen der Beschäftigten eignen sich Lernfabriken. Diese stellen in Anlehnung an reale Fabriken authentische Produktionsumgebungen dar, die zur Weiterbildung, Lehre und Forschung genutzt werden. In Lernfabriken können Lernende neues Wissen erwerben, praxisnah anwenden und so vertiefen, dass sie es erfolgreich auf neue Problemstellungen – bspw. im eigenen Unternehmen – übertragen können. Weltweit nutzen Forschungsinstitute und Unternehmen daher vermehrt Lernfabriken.

Für die Gestaltung von Lernfabriken im Sinne einer erfolgreichen Kompetenzvermittlung ist es ausschlaggebend, wie diese konfiguriert werden, d. h. welche Fabrikelemente ausgewählt werden. Die Auswahl der Fabrikelemente bestimmt die Leistungsfähigkeit sowie die künftigen Einsatzpotenziale des Lernsystems. Dabei sind jedoch i. d. R. Budget- und Flächenrestriktionen zu beachten. In den bisherigen Gestaltungsansätzen zu Lernfabriken wird jedoch nicht beschrieben, wie Fabrikelemente nutzenoptimal unter der gleichzeitigen Beachtung von Kosten- und Flächenaspekten auszuwählen sind. Dies gilt übrigens auch für die Planungsansätze für industrielle Fabriken.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurde daher eine Methodik entwickelt, die es ermöglicht, Lernfabriken mithilfe eines Optimierungsmodells unter der Beachtung von Restriktionen nutzenoptimal zu konfigurieren. Die Anwendung der Methodik wird detailliert beschrieben und durch ein software-basiertes Konfigurationssystem erleichtert. Ihre Validierung erfolgte in drei Fallstudien, die unterschiedliche Planungsfälle in Unternehmen und Forschungseinrichtungen darstellen. Die Evaluation dieser Anwendungsfälle zeigte, dass die Methodik die gestellten Anforderungen erfüllt und einen klaren Mehrwert gegenüber bisherigen Ansätzen aufzeigt, indem sie es u. a. erlaubt, Kosten- und Nutzenzuwächse gegenüberzustellen. So gelingt es mithilfe der Methodik nun, vorhandene Budgets und Flächen bei der Planung von (Lern-)fabriken nutzenoptimal zu beachten.

Vorwort des Autors

Die vorliegende Forschungsarbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt. Auf vielfältigste Art und Weise habe ich während der Erstellung dieser Arbeit Unterstützung erhalten, für die ich mich hier bei den einzelnen Personen bedanken möchte.

Mein besonderer Dank gilt zunächst Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich für die professionelle Betreuung der Arbeit. Die vielen fachlichen Diskussionen und kritischen Betrachtung während der Entstehung dieser Forschungsarbeit schätze ich rückblickend als sehr wertvoll ein. Auch für das entgegengebrachte Vertrauen und die vielfältigen Freiheiten während meiner Tätigkeit möchte ich mich bei der Institutsleitung bedanken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Ramsauer der TU Graz danke ich für die bereitwillige Übernahme des Korreferats und für die gründliche Durchsicht dieser Forschungsarbeit.

Ermöglicht wurde die vorliegende Forschungsarbeit vor allem durch die Anwendung und Evaluation in Unternehmen und Forschungsinstituten. Besonderen Dank gilt dabei Frau Nicole Lieb, Frau Verena Lorenz, Herrn Olaf Girschikovski und Herrn Mario Fähmann der DB Netz AG. Allen weiteren Expert*innen und Ansprechpartnern aus der Forschung und Industrie möchte ich ebenfalls danken für die Möglichkeit zur Evaluation der Methodik, der Teilnahme an Umfragen und Experteninterviews sowie kritischen Hinweisen.

Nicht zuletzt hat mich die vertrauensvolle Zusammenarbeit mit Kolleginnen und Kollegen der Forschungsgruppe „Center für industrielle Produktivität“ sowie des gesamten Instituts motiviert und erfüllt. Daher möchte ich mich auch bei meiner Forschungsgruppe bedanken, insbesondere Frau Dr.-Ing. Judith Enke, Herrn Dr.-Ing. Rupert Glass, Frau Astrid Weyand, Herrn Jonas Barth, Herrn Thomas Riemann sowie Herrn Dr.-Ing. Michael Tisch, die mich durch fachliche Diskussionen unterstützt haben. Auch danke ich dem Support-Team des Instituts, die während meiner Tätigkeit vielfältige Aufgaben aus den Bereichen Media, IT, Buchführung und Organisation übernahmen.

Der persönliche Dank gilt meiner Familie, die mir über die gesamte Zeit den Rücken freigehalten und mich ermutigt hat. Aus diesem Grund danke ich meinen Eltern für das entgegengesetzte Vertrauen in meinen Ausbildungsweg und den bindungslosen Rückhalt. Abschließend danke ich meiner Freundin Svenja, die das Lektorat dieser Forschungsarbeit übernommen hat sowie mit ihrer Unterstützung und ihrem Verständnis die Fertigstellung möglich machte.

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	IX
Symbolverzeichnis	XII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2 Ziel der Forschungsarbeit	2
1.3 Aufbau der Forschungsarbeit	3
2 Stand der Forschung und Praxis	7
2.1 Fabrikplanung	7
2.1.1 Begriffsdefinitionen	7
2.1.2 Ziele der Fabrikplanung	9
2.1.3 Phasen der Fabrikplanung	11
2.1.4 Auswahl von Fabrikelementen	13
2.1.5 Layoutplanung	17
2.2 Schlanke Produktionssysteme	21
2.2.1 Grundlagen der schlanken Produktion	21
2.2.2 Gestaltungsprinzipien für schlanke Produktionssysteme	22
2.2.3 Weiterentwicklung der schlanken Produktion durch Industrie 4.0- 25	
2.3 Lernfabriken zur Kompetenzentwicklung	28
2.3.1 Kompetenzentwicklung in der Produktion	29
2.3.2 Konzept Lernfabrik	31
2.3.3 Gestaltungsansätze für Lernfabriken	37
2.4 Zwischenfazit	44
3 Zielsetzung und Forschungsmethodik	47
3.1 Forschungsziele	47
3.2 Anforderungen an die Forschungsmethodik	48
3.2.1 Inhaltliche Anforderungen	48
3.2.2 Formale Anforderungen	48

3.3	Abgrenzung des Untersuchungsbereichs	50
3.4	Forschungskonzeption	51
4	Optimierungsmodell zur Konfiguration von Lernfabriken	55
4.1	Herleitung des Optimierungsmodells	55
4.1.1	Entscheidungsvariablen	55
4.1.2	Zielfunktion	57
4.1.3	Restriktionen	57
4.2	Lösung des Optimierungsmodells	64
4.2.1	Lösung des MMKP	64
4.2.2	Lösung des FCP	69
4.3	Zwischenfazit	72
5	Vorgehen zur Konfiguration von Lernfabriken	73
5.1	Ziel und Struktur des Vorgehens	73
5.2	Vorgehensschritt I: Ermittlung von Anforderungen an die Konfiguration	74
5.2.1	Ermittlung der Anforderungen	74
5.2.2	Strukturierung der Anforderungen	76
5.3	Vorgehensschritt II: Ermittlung von Konfigurationsalternativen	77
5.3.1	Produkte und Dienstleistungen	77
5.3.2	Fabrikbereiche	80
5.3.3	Konfigurationsalternativen und Fabrikelemente	81
5.4	Vorgehensschritt III: Bewertung der Konfigurationsalternativen	83
5.4.1	Bewertungsmethode	83
5.4.2	Bewertungskriterien	87
5.5	Vorgehensschritt IV: Auswahl und Analyse	93
5.5.1	Auswahl der Konfigurationsalternativen	94
5.5.2	Analyse der ermittelten Konfiguration	94
5.6	Zwischenfazit	96
6	Softwarebasiertes Konfigurationssystem für Lernfabriken	99
6.1	Konzeption	99
6.2	Umsetzung als digitale Applikation	104
6.3	Zwischenfazit	110
7	Anwendung und Evaluation	111

7.1 Anwendung der Methodik	111
7.1.1 Anwendung im Unternehmen	112
7.1.2 Anwendung im universitären Umfeld	116
7.1.3 Anwendung zur Rekonfiguration	118
7.2 Evaluation	120
7.2.1 Evaluationskonzept	120
7.2.2 Evaluationsergebnisse	125
7.3 Diskussion	129
8 Zusammenfassung und Ausblick	133
8.1 Zusammenfassung	133
8.2 Ausblick	135
9 Literaturverzeichnis	137
Anhang	163
Anhang 1: Unterlagen zur Lernfabrikgestaltung	164
Anhang 1.1: Lernfabrik-Morphologie	164
Anhang 1.2: Übergeordnete Kompetenzmatrix zur schlanken Produktion	167
Anhang 1.3: Vertikaler und horizontaler Abbildungsumfang	170
Anhang 2: Unterlagen zur Konfiguration von Lernfabriken	171
Anhang 2.1: Beispielhafte Anforderungen zur Lernfabrik-Konfiguration	171
Anhang 2.2: Betrachtete Interaktionen	172
Anhang 2.3: Betrachtete Technologien in Lernfabriken	173
Anhang 2.4: Bewertungskriterien	174
Anhang 2.5: Paarvergleich der Bewertungskriterien	176
Anhang 3: Bewertete Konfigurationsalternativen in den Fallstudien	177
Anhang 3.1: Fallstudie 1	177
Anhang 3.2: Fallstudie 2	178
Anhang 3.3: Fallstudie 3	179
Anhang 4: Evaluationsfragebogen zur entwickelten Methodik	180
Anhang 5: Betreute Abschlussarbeiten	184
Anhang 6: Publikationsübersicht	185

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1.1: Aufbau der Forschungsarbeit -----	5
Abbildung 2.1: Fabrikebenen-----	8
Abbildung 2.2: Flexibilität und Wandlungsfähigkeit-----	10
Abbildung 2.3: Ableitung der Wandlungsbefähiger-----	11
Abbildung 2.4: Phasenmodell der Fabrikplanung nach der VDI 5200-----	12
Abbildung 2.5: Planungsebenen der Layoutplanung nach der VDI 2385 -----	17
Abbildung 2.6: Ideales Funktionsschema und Sankey-Diagramm mit Beispiel	18
Abbildung 2.7: Heuristiken zur Layoutplanung -----	20
Abbildung 2.8: Vorgehen zur algorithmenbasierten Layoutplanung -----	21
Abbildung 2.9: Abgrenzung und Einteilung von Kompetenzen-----	30
Abbildung 2.10: Ausprägungen und Abgrenzungen von Lernfabriken -----	32
Abbildung 2.11: Lebenszyklus einer Lernfabrik -----	34
Abbildung 2.12: Lernfabriken als Basis zur Forschung-----	35
Abbildung 2.13: Ebenen-Modell zur Gestaltung von Lernfabriken -----	38
Abbildung 2.14: Vorgehen zur kompetenzorientierten Gestaltung von Lernfabriken-----	39
Abbildung 2.15: Struktur der Gestaltungsansätze -----	42
Abbildung 3.1: Forschungskonzeption der vorliegenden Forschungsarbeit ----	53
Abbildung 4.1: Modularisierung des technischen Systems einer Lernfabrik----	56
Abbildung 4.2: Relevanz des Packproblems-----	60
Abbildung 4.3: Größen zur Prüfung der Abmessungszulässigkeit -----	61
Abbildung 4.4: Flächenmodellierung eines Fabrikelements -----	63
Abbildung 4.5: Flow-Chart des entwickelten USBB-Algorithmus zur Lösung des MMKP -----	66
Abbildung 4.6: Entscheidungsbaum des entwickelten Algorithmus-----	67
Abbildung 4.7: Beispiel zur Anwendung des USBB-Algorithmus-----	68
Abbildung 4.8: Lösung des Beispiels zum USBB-Algorithmus-----	68
Abbildung 4.9: Flow-Chart des entwickelten Algorithmus zur Lösung des FCP	70
Abbildung 5.1: Vorgehen zur Konfiguration von Lernfabriken -----	74
Abbildung 5.2: Einfluss der Anforderungen auf die nächsten Vorgehensschritte -----	76
Abbildung 5.3: Identifikationskarte zur Dokumentation von Konfigurationsalternativen -----	83
Abbildung 5.4: Vorgehen zur Konfiguration von Lernfabriken -----	98
Abbildung 6.1: Flow-Chart zu den Anwendungsfällen des Konfigurationssystems-----	102
Abbildung 6.2: Eingabe im Konfigurationssystem -----	106
Abbildung 6.3: ERD zur strukturierten Darstellung der Konfigurationsalternativen -----	107
Abbildung 6.4: Ermittelte Konfiguration im Konfigurationssystem-----	108

Abbildung 6.5: Analyse der ermittelten Konfigurationen im Konfigurationssystem	109
Abbildung 7.1: Nutzen-Budget-Kurve der Fallstudie 1	115
Abbildung 7.2: Erstelltes Layout der Fallstudie 1	116
Abbildung 7.3: Ermittelte Konfiguration in Fallstudie 2	117
Abbildung 7.4: Nutzen-Budget-Kurve der Fallstudie 2	118
Abbildung 7.5: Dreidimensionale Ansicht der Prozesslernfabrik CiP	119
Abbildung 7.6: Nutzen-Budget-Kurve der Fallstudie 3	120
Abbildung 7.7: Effizienz und abweichende Entscheidungen der intuitiven Auswahl	126

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1: Übersicht über den Erfüllungsgrad bisheriger quantitativer Ansätze zur Konfiguration industrieller Fabriken anhand der Anforderungen der vorliegenden Forschungsarbeit-----	16
Tabelle 2.2: Materialflussmatrix mit Beispiel -----	19
Tabelle 2.3: Gestaltungsprinzipien und Methoden der schlanken Produktion -	24
Tabelle 2.4: Abhängigkeiten zwischen den Prinzipien der schlanken Produktion und Industrie 4.0-Technologien-----	27
Tabelle 2.5: Übersicht zur Morphologie für Lernfabriken -----	33
Tabelle 2.6: Adressierung der Erfolgsfaktoren zur Kompetenzentwicklung in Lernfabriken-----	35
Tabelle 2.7: Übersicht über den Erfüllungsgrad bisheriger Gestaltungsansätze von Lernfabriken im Hinblick auf die Zielsetzung dieser Arbeit -----	44
Tabelle 3.1: Anforderungen an die Methodik -----	50
Tabelle 5.1: Benötigte Daten für das Optimierungsmodell -----	73
Tabelle 5.2: Anforderungsstruktur zur Konfiguration-----	77
Tabelle 5.3: Gewichtung der Bewertungskriterien -----	84
Tabelle 5.4: Bewertungsmethode für Konfigurationsalternativen-----	86
Tabelle 5.5: Bewertungsintervalle in Abhängigkeit von der Ausprägung -----	86
Tabelle 5.6: Bewertung der Interaktionsfähigkeit -----	89
Tabelle 5.7: Bewertungskriterien zur Auswahl von Konfigurationsalternativen	93
Tabelle 6.1: Funktionale Anforderungen an das Konfigurationssystem -----	104
Tabelle 6.2: Nicht-Funktionale Anforderungen an das Konfigurationssystem-	104
Tabelle 7.1: Übersicht der Fallstudien -----	111
Tabelle 7.2: Anforderungen an die Konfiguration in Fallstudie 1 -----	113
Tabelle 7.3: Konfigurationsszenarien in Fallstudie 1-----	114
Tabelle 7.4: Evaluationskonzept-----	122
Tabelle 7.5: Ergebnis der Expertenbefragung zu den inhaltlichen Anforderungen -----	126
Tabelle 7.6: Ergebnis der Expertenbefragung zu den formalen Anforderungen -----	128
Tabelle 7.7: Ergebnisse der Evaluation -----	131

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Kurzzeichen	Begriff
5G	Fünfte Generation des Mobilfunks
5S	Methode zur Arbeitsplatzgestaltung: Sortieren, Systematisieren, Säubern, Standardisieren, Selbstdisziplin
AGV	Automated Guided Vehicle
AHP	Analytic Hierarchy Process
ANP	Analytic Network Process
AR	Augmented Reality
ARP	Advanced Research Project
ASR	Technischen Regeln für Arbeitsstätten
BPMN	Business Process Model and Notation
BPP	Bin Packing Problem
BT	Bachelorthesis
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CiP	Center für industrielle Produktivität
CIRP	Collège International pour la Recherche en Productique (International Academy for Production Engineering)
CLF	Conference on Learning Factories
COPRAS	Complex Proportional Assessment
CPPS	Cyber-Physische Produktionssysteme
CRM	Customer Relationship Management
csv	Comma-Separated Value
DMU	Digital Mock-Up
DRM	Design Research Methodology
ÉLECTRE	Elimination Et Choix Traduisant la réalité
EMS	Energy Management System
ERD	Entity-Relationship-Diagramm
ERP	Enterprise Resource Planning
FA	Funktionale Anforderung
FCP	Facility Configuration Problem
FEM	Finite-Elemente-Methode
FIFO	First In First Out
FLP	Facility Layout Problem
GD	Gestaltungsdimension
GE	Gestaltungselement

GPS	Global Positioning System
GRA	Grey Relational Analysis
GTMA	Graph Theory and Matrix Approach
IALF	International Association of Learning Factories
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologien
JIS	Just-in-sequence
JIT	Just-in-time
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen
KP	Knapsack Problem
Li-Fi	Light Fidelity
LTE	Long Term Evolution
MCKP	Multiple Choice Knapsack Problem
MDKP	Multidimensional Knapsack Problem
ME	Mengeneinheit
MES	Management Execution System
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MMKP	Multidimensional Multiple Choice Knapsack Problem
MOORA	Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis
MR	Mixed Reality
MT	Masterthesis
NFA	Nicht-funktionale Anforderung
NFC	Near Field Communication
NP	Nichtdeterministische Polynomialzeit
PDCA	Plan Do Check Act
PLC	Programmable Logic Controller
PLM	Product-Lifecycle-Management
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PROMETHEE	Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluation
PTW	Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen
QR	Quick Response
RTLS	Real-Time Location System
SA	Studienarbeit
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SFM	Shopfloor Management
SMED	Single Minute Exchange of Dies

SOA	Serviceorientierte Architektur
SOP	Start of Production
TN	Teilnehmende Personen in Schulungen
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
TPM	Total Productive Maintenance
TPS	Toyota-Produktionssystem
TU	Technische Universität
USBB	Utility-Sorted Branch-and-Bound
UWB	Ultrawide-Band
VBA	Visual Basic for Applications
VDI	Verband deutscher Ingenieure
VIKOR	Vlsekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (multikriterielle Optimierung und Kompromisslösung)
VR	Virtual Reality
WUTA	Weighted Utility Additive Theory

SYMBOLVERZEICHNIS

Kurzzeichen	Einheit	Größe
a_{ijk}	[-]	Ausprägung der verwendete Variable zur Bewertung e_{ijk} zum Bewertungskriterium k der Konfigurationsalternative ij
$a_{k,max}$	[-]	Maximaler Wert der Ausprägung a_{ijk} aller Konfigurationsalternativen ij
$a_{k,min}$	[-]	Minimaler Wert der Ausprägung a_{ijk} aller Konfigurationsalternativen ij
Δa_k	[-]	Spannweite der Ausprägung a_{ijk} aller Konfigurationsalternativen ij
b_m	[m]	Breite eines Fabrikelements m
$b_{\text{Bedienung}}$	[m]	Bedienbreite
$b_{\text{Bereitstellung}}$	[m]	Bereitstellbreite
b_{Gang}	[m]	Gangbreite
b_{Wartung}	[m]	Wartungsbreite
B	[m]	Breite der Lernfabrik
C_{Budget}	[Geldeinheiten]	Budget zur Konfiguration der Lernfabrik
$C_{\text{Fläche}}$	[m ²]	Maximal mögliche Fläche der Lernfabrik
C_r	[-]	Maximal möglicher Ressourcenverbrauch aller ausgewählten Konfigurationssalternativen
D	[-]	Relative Anzahl an abweichenden Entscheidungen aller betrachteten Konfigurationsszenarien S
$e_{h,k_{\text{Produkt}}}$	[-]	Bewertung des Produkts h hinsichtlich des produktbezogenen Bewertungskriteriums k_{Produkt}
e_{ijk}	[-]	Bewertung der Konfigurationsalternative ij hinsichtlich des Bewertungskriteriums k
E	[-]	Durchschnittliche Effizienz aller betrachteten Konfigurationsszenarien S
F	[-]	Flächenzulässigkeitsfaktor
ΔF	[-]	Anpassungsintervall des Flächenzulässigkeitsfaktors F

g_k	[-]	Gewichtungswert des Bewertungskriteriums k zur Bewertung der Konfigurationsalternativen
$g_{k_{\text{Produkt}}}$	[-]	Gewichtungswert des Bewertungskriteriums k_{Produkt} zur Bewertung des Produkts
h	[-]	Laufvariable für Produkte
H	[-]	Gesamtanzahl aller Produkte
i	[-]	Laufvariable der Fabrikbereiche
I	[-]	Gesamtanzahl der Fabrikbereiche
η_{ij}	[-]	Relativer Ressourcenverbrauch zur Kapazitätsgrenze
j	[-]	Laufvariable der Konfigurationsalternativen
J	[-]	Gesamtanzahl der Konfigurationsalternativen im Fabrikbereich
k	[-]	Laufvariable für die Bewertungskriterien der Konfigurationsalternativen
k_{Produkt}	[-]	Laufvariable für die produktbezogenen Bewertungskriterien
K	[-]	Gesamtanzahl aller Bewertungskriterien der Konfigurationsalternativen
K_{Produkt}	[-]	Gesamtanzahl aller produktbezogenen Bewertungskriterien
κ_{Fleiss}	[-]	Fleiss' Kappa zur Berechnung der Interrater-Reliabilität
l_m	[m]	Länge des Fabrikelements m
L	[m]	Länge der Lernfabrik
m	[-]	Laufvariable für ausgewählte Fabrikelemente
n	[-]	Laufvariable für ausgewählte Fabrikelemente
n_{ij}	[-]	Nutzwert der Konfigurationsalternative ij
N	[-]	Gesamter Nutzen aller ausgewählten Konfigurationsalternativen
$N_{\text{intuitiv},s,\text{person}}$	[-]	Durch die intuitive Auswahl ermittelter Nutzen aller Konfigurationsalternativen
$N_{\text{maximal},s}$	[-]	Maximal möglicher Nutzen aller ausgewählten Konfigurationsalternativen im Konfigurationsszenario s

$N_{\text{minimal},s}$	[-]	Minimal möglicher Nutzen aller ausgewählten Konfigurationsalternativen im Konfigurationsszenario s
$N_{\text{optimal},s}$	[-]	Durch die Lösung des Optimierungsmodells ermittelter Nutzen aller Konfigurationsalternativen im Konfigurationsszenario s
N_{relativ}	[%]	Relativer Nutzen aller ausgewählten Konfigurationsalternativen im Verhältnis zum insgesamt maximal möglichen Nutzen N_{max}
o_{ij}	[-]	Laufvariable für Fabrikelemente der Konfigurationsalternative ij
O_{ij}	[-]	Gesamtzahl an unterschiedlichen Fabrikelementen der Konfigurationsalternative ij
p_{xm}	[m]	Position in x-Richtung des Fabrikelements m
p_{ym}	[m]	Position in y-Richtung des Fabrikelements m
$p_{xm,\text{zulässig,max}}$	[m]	Maximal zulässige Position in x-Richtung des ausgewählten Fabrikelements m
$p_{xm,\text{zulässig,min}}$	[m]	Minimal zulässige Position in x-Richtung des ausgewählten Fabrikelements m
$p_{ym,\text{zulässig,max}}$	[m]	Maximal zulässige Position in y-Richtung des ausgewählten Fabrikelements m
$p_{ym,\text{zulässig,min}}$	[m]	Minimal zulässige Position in y-Richtung des ausgewählten Fabrikelements m
Person	[-]	Laufvariable für Personen zur Auswertung des intuitiven Vorgehens
P	[-]	Person zur Auswertung des intuitiven Vorgehens
\bar{P}	[-]	Beobachtbarer Anteil der Übereinstimmungen in der Expertenbefragung
\bar{P}_e	[-]	Erwartungswert des Anteils an Fällen, in denen die Bewertungen zufällig übereinstimmen
$q_{o_{ij}}$	[-]	Anzahl der gleichen Fabrikelemente o_{ij} in der Konfigurationsalternative ij

r	[-]	Laufvariable für Ressourcenrestriktionen
R	[-]	Gesamtanzahl aller Ressourcenrestriktionen
s	[-]	Laufvariable für Konfigurationsszenarien
S	[-]	Gesamtanzahl an betrachteten Konfigurationsszenarien
t_m	[-]	Binärvariable, die anzeigt, ob das Fabrikelement m gedreht wurde
ua_{mn}	[-]	Binärvariablen, die angeben, ob das Fabrikelement m über Fabrikelement n positioniert ist
ul_{mn}	[-]	Binärvariablen, die angeben, ob das Fabrikelement m links von Fabrikelement n positioniert ist
ur_{mn}	[-]	Binärvariablen, die angeben, ob das Fabrikelement m rechts von Fabrikelement n positioniert ist
uu_{mn}	[-]	Binärvariablen, die angeben, ob das Fabrikelemente m unter Fabrikelement n positioniert ist
v_{ij}	[-]	Binärvariable, die angibt, ob die Konfigurationsalternative ij bereits in der bestehenden Lernfabrik vorhanden ist (1) oder nicht (0)
$\sum w_{\text{Fläche}}$	[m ²]	Gesamter Flächenbedarf der Konfigurationsalternativen
$w_{ij,r}$	[-]	Ressourcenverbrauch der Konfigurationsalternative ij der Ressource r
$w_{ij,\text{Kosten Alternative}}$	[Geldeinheiten]	Kosten einer Konfigurationsalternative
$w_{ij,\text{Kosten Fabrikelement}}$	[Geldeinheiten]	Kosten eines Fabrikelements
$\sum w_{\text{Kosten}}$	[Geldeinheiten]	Gesamte Kosten aller ausgewählten Konfigurationsalternativen
x_{ij}	[-]	Binärvariable, die anzeigt, ob die Konfigurationsalternative ij in der Lernfabrik enthalten ist (1) oder nicht (0)
$x_{ij,s,\text{person,intuitiv}}$	[-]	Binärvariable, die für die intuitive Auswahl anzeigt, ob die Konfigurationsalternative ij Im Konfigurationsszenario s

		von Person person in der Lernfabrik enthalten ist (1) oder nicht (0)
Z_{ij}	[-]	Kostenzusatzfaktor der Konfigurationsalternative ij

1 EINLEITUNG

In diesem Kapitel wird die vorliegende Forschungsarbeit eingeleitet. Die Ausgangssituation und Problemstellung werden beschrieben (Abschnitt 1.1). Im Anschluss werden die Ziele (Abschnitt 1.2) und der Aufbau der Arbeit (Abschnitt 1.3) erläutert.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Mit einem Gesamtumsatz von 2,1 Millionen € und mit 7,4 Millionen Beschäftigten stützen die Industrie und das verarbeitende Gewerbe die wirtschaftliche Leistung der Bundesrepublik Deutschland [St]. Gegenwärtige Krisen wirken sich durch nachhaltige Strukturveränderungen auf diese wirtschaftliche Leistung und den Wohlstand aus [Be20]. Bereits ADAM SMITH betonte in seinem Hauptwerk „The Wealth of Nations“ die Wichtigkeit der erworbenen Fähigkeiten einer Gesellschaft für deren Wohlstand [Sm10]. Die moderne Wirtschaftswissenschaft greift dies mit dem Begriff „Humankapital“ auf, welcher allgemein für das erworbene Wissen, die angeeigneten Fähigkeiten und die entwickelten Kompetenzen der Beschäftigten steht [Be09]. Die vorhandenen Kompetenzen im Unternehmen sind mitunter zur Verbesserung von Produktionsprozessen und zur Einführung neuer Technologien notwendig, z. B. im Rahmen des Programms Industrie 4.0 [Pr17]. In kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU), die einen Anteil von 99,6 % aller Unternehmen in Deutschland ausmachen [SS21], verändern sich Prozesse ständig oder werden weiterentwickelt. Gerade in diesem Umfeld sind Modelle zur Kompetenzentwicklung, bspw. nach TENBERG [TE20], notwendig [Kr18]. Im Sinne der schlanken Produktion sollte die Kompetenzentwicklung von Beschäftigten zur Verbesserung von Prozessen und Wertschöpfungsketten kontinuierlich stattfinden [Ve12]. Eine aktuelle Studie des Forschungsbeirats der Plattform Industrie 4.0 und der Deutschen Akademie der Technikwissenschaft (Acatech) verdeutlicht die Wichtigkeit der Kompetenzentwicklung für die digitale Transformation der Produktion: 80 % der befragten Unternehmen gaben an, dass fehlende Kompetenzen ein Hemmnis darstellen [Fo22]. Auch im Hinblick auf weitere aktuelle Herausforderungen, wie z. B. dem demografischen Wandel und der Klimaneutralität, wird der Einfluss von Kompetenzen auf die Wertschöpfung deutlich [AR11], [De21]. Insgesamt stellen die Kompetenzen von Beschäftigten nach dem ressourcenbasierten Ansatz einen der wichtigsten Wettbewerbsfaktoren von Unternehmen dar [BC07].

Die Entwicklung von Kompetenzen in der Produktion kann zum einen integriert am Arbeitsplatz selbst stattfinden oder zum anderen arbeitsplatzbezogen in speziell entwickelten Lernumgebungen. Das Lernen am Arbeitsplatz ist jedoch hinsichtlich einiger Faktoren eingeschränkt: So ist es bspw. nicht immer möglich bzw. betriebssicher, Prozesse im laufenden Betrieb didaktisch anzupassen. Aus

diesem Grund gewinnen seit der Industrialisierung arbeitsplatzbezogene Lernumgebungen zunehmend an Bedeutung [Sc00].

Lernfabriken stellen einen vielversprechenden Ansatz dar, um arbeitsplatzbezogenes Lernen für die Produktion möglichst realistisch umzusetzen, da sie spezifisch auf den Lerninhalt abgestimmt werden können [SSJ98]. In Lernfabriken findet „Lernen“ in einer realitätsnahen Produktionsumgebung bzw. „Fabrik“ statt [Ab15b]. Weltweit werden zunehmend Lernfabriken in Unternehmen und Forschungsinstituten zur Weiterbildung, Lehre und Forschung eingesetzt [AMT19]. Bereits während der Gestaltung von Lernfabriken werden die zukünftigen Möglichkeiten zur Weiterbildung, Lehre und Forschung festgelegt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass zum Aufbau von Lernfabriken nicht unerhebliche finanzielle und bauliche Ressourcen beansprucht werden, die bestmöglich genutzt werden sollten.

1.2 Ziel der Forschungsarbeit

In der Vergangenheit wurden unterschiedliche Ansätze zur Gestaltung von Lernfabriken erarbeitet.¹ Neben der Orientierung an Kompetenzen und Lernzielen während der Gestaltung, bieten die bisherigen Ansätze ein erstes grundlegendes Vorgehen [KWM21]. Allerdings wird die technische Konfiguration einer Lernfabrik, d. h. die tatsächliche Auswahl der eingesetzten Fabrikelemente (wie z. B. Maschinen, Anlagen und Arbeitsplätzen), in diesen Ansätzen nicht fokussiert. Bisher deuten diese Ansätze die Auswahl lediglich an und greifen auf intuitive Entscheidungen zurück. Zur technischen Konfiguration existiert bislang kein Ansatz, mit dem die bestmögliche Kombination an Fabrikelementen unter Beachtung gegebener Restriktionen zu finanziellen und baulichen Ressourcen ermittelt werden kann. Die vorliegende Forschungsarbeit setzt an dieser Forschungslücke an und beschäftigt sich mit der technischen Konfiguration von Lernfabriken für die schlanke Produktion. Diese Zielstellung wird durch drei Forschungsfragen gegliedert, die im Folgenden erläutert werden.

Die Konfiguration von Lernfabriken soll zur bestmöglichen Auswahl an Fabrikelementen führen. Dabei soll die Auswahl im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen möglichst zielorientiert und von der intuitiven Entscheidung einzelner Personen weitestgehend unabhängig sein. Hieran schließt sich die erste Forschungsfrage an:

Forschungsfrage 1:

Wie kann die bestmögliche Konfiguration einer Lernfabrik ermittelt werden?

¹ Eine detaillierte Betrachtung der Gestaltungsansätze für Lernfabriken findet sich in Abschnitt 2.3.3.

Die Konfiguration von Lernfabriken hängt von projektspezifischen Rahmenbedingungen ab, die zu beachten sind. Zur Ermittlung der bestmöglichen Auswahl an Fabrikelementen ist deshalb ein systematisches Vorgehen notwendig, um diese Rahmenbedingungen zu berücksichtigen und die praktische Anwendung zu unterstützen. Die zweite Forschungsfrage lautet deshalb wie folgt:

Forschungsfrage 2:

Nach welchem strukturierten Vorgehen können Lernfabriken konfiguriert werden?

In der vorliegenden Forschungsarbeit soll außerdem untersucht werden, inwieweit die intuitiv ermittelten von den bestmöglichen Konfigurationen abweichen. Aus diesem Vergleich kann der Mehrwert der zu entwickelnden Methodik ermittelt werden. Hieraus lässt sich die dritte Forschungsfrage ableiten:

Forschungsfrage 3:

Welchen Mehrwert bietet die Methodik dieser Arbeit im Vergleich zur intuitiven Auswahl?

1.3 Aufbau der Forschungsarbeit

Der Aufbau der vorliegenden Forschungsarbeit ist in Abbildung 1.1 dargestellt und orientiert sich am systemorientierten Forschungsprozess nach ULRICH UND HILL [UH76]. Praxis- und Konzeptionsphasen sind durch Symbole gekennzeichnet. Die Arbeit ist in insgesamt acht Kapitel gegliedert, die im Folgenden beschrieben werden.

Nach der Einleitung in Kapitel 1 behandelt Kapitel 2 den Stand der wissenschaftlichen Forschung und industriellen Praxis in Form von relevanten Theorien, Modellen und Methoden. Dieses Kapitel fundiert die Forschungsleistung in den darauffolgenden Kapiteln. Thematisch baut die vorliegende Forschungsarbeit auf dem Stand der Forschung in den Gebieten der Fabrikplanung, der schlanken Produktion und der Lernfabriken auf. Bisher erarbeitete Vorgehen zur Fabrikplanung dienen als Ansatzpunkte für die Planung von Lernfabriken (Abschnitt 2.1). Weiterhin fallen hierunter Grundlagen der schlanken Produktion als fokussierter Lerninhalt (Abschnitt 2.2). Zur Darstellung der Forschungslücke wird der Stand der Forschung und Praxis zur Gestaltung von Lernfabriken behandelt (Abschnitt 2.3). Das Kapitel schließt mit einem Zwischenfazit ab (Abschnitt 2.4).

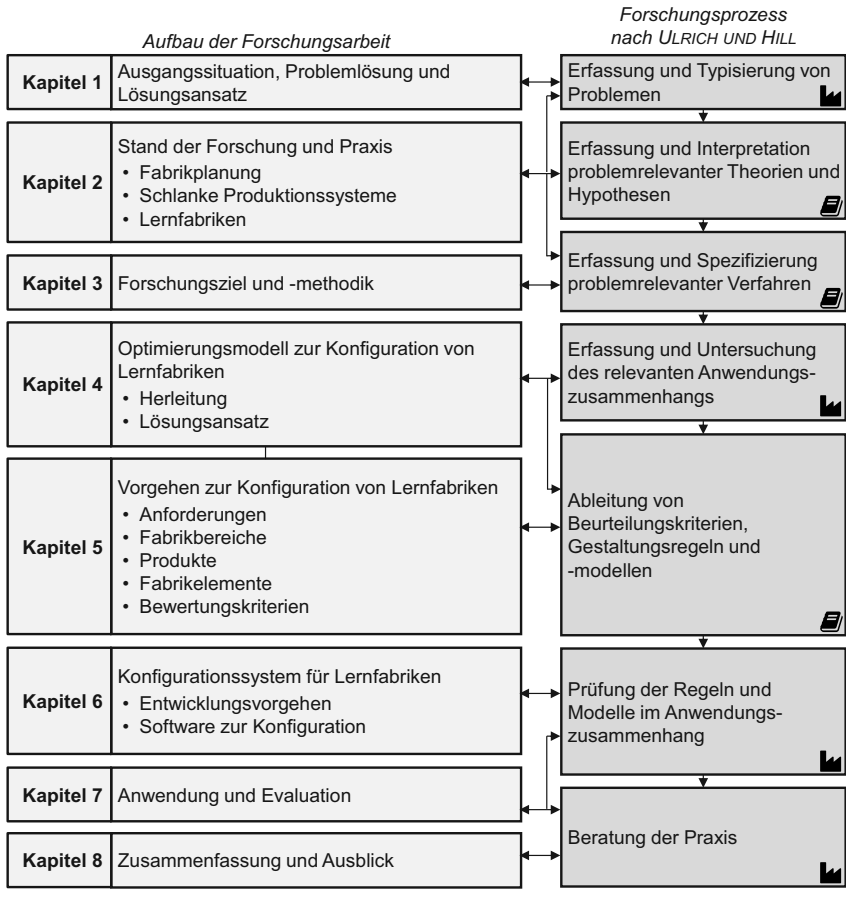
In Kapitel 3 wird die Forschungsmethodik beschrieben. Aufbauend auf den Rahmenbedingungen und Herausforderungen bei der Gestaltung von Lernfabriken erfolgt die Zielsetzung dieser Arbeit (Abschnitt 3.1). Aus dieser leiten sich die inhaltlichen und formalen Anforderungen (Abschnitt 3.2), die Abgrenzung des Untersuchungsbereichs (Abschnitt 3.3) sowie die Forschungskonzeption der Methodik (Abschnitt 3.4) ab.

Die Methodik zur Konfiguration baut auf einem Optimierungsmodell auf, das in Kapitel 4 hergeleitet wird. Dazu sind vor allem die Entscheidungsvariablen, die Zielfunktion sowie vorliegende Restriktionen zu bestimmen (Abschnitt 4.1). Zur exakten Lösung des Optimierungsmodells werden vom Autor dieser Forschungsarbeit Algorithmen entwickelt, die im Anschluss beschrieben werden (Abschnitt 4.2).

Das Vorgehen zur Konfiguration von Lernfabriken wird in Kapitel 5 dargestellt. Zunächst wird die grundlegende Struktur des Modells beschrieben (Abschnitt 5.1). In Lernfabriken sollen Kompetenzen entwickelt werden. Demzufolge sollte die Gestaltung von Lernfabriken kompetenzorientiert erfolgen. Aus den Primärzielen einer Lernfabrik und den projektspezifischen Rahmenbedingungen sind Anforderungen an die Konfiguration von Lernfabriken abzuleiten (Abschnitt 5.2). Für die detaillierte Planung werden das herzustellende Produkt, die Fabrikbereiche sowie -elemente bestimmt (Abschnitt 5.3). Diese sind im Anschluss auf Basis von festzulegenden Kriterien zu bewerten (Abschnitt 5.4). Schließlich kann die bestmögliche Konfiguration auf Basis des abgeleiteten Optimierungsmodells ermittelt und analysiert werden (Abschnitt 5.5).

Zur praktischen Anwendung und Vereinfachung der Methodik wird ein softwarebasiertes Konfigurationssystem entwickelt. In Kapitel 6 wird zum einen dessen Konzeption (Abschnitt 6.1) und zum anderen dessen Umsetzung als digitale Applikation (Abschnitt 6.2) beschrieben.

Kapitel 7 zeigt die Anwendung und Evaluation der Methodik in der Praxis. Insgesamt wurde die Methodik in drei verschiedenen Anwendungsfällen angewendet (Abschnitt 7.1): zur Konfiguration einer neuen Lernfabrik für ein Unternehmen, zur Konfiguration einer neuen Lernfabrik für ein Forschungsinstitut und zur Rekonfiguration einer bestehenden Lernfabrik. Im Anschluss wird die empirische Evaluation der Methodik beschrieben und deren Ergebnisse gezeigt (Abschnitt 7.2). Kapitel 8 schließt die Forschungsarbeit mit einer Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse (Abschnitt 8.1) und einem Ausblick auf zukünftige Forschungsfelder (Abschnitt 8.2) ab.





Legende  Praxisphase  Konzeptionsphase

Abbildung 1.1: Aufbau der Forschungsarbeit, eigene Darstellung in Anlehnung an [UH76]

2 STAND DER FORSCHUNG UND PRAXIS

Die zu entwickelnde Methodik zur Konfiguration von Lernfabriken für die schlanke Produktion geht aus unterschiedlichen Forschungsfeldern hervor, deren Grundlagen im Folgenden dargestellt werden. Dieses Kapitel dient dabei zur Fundierung der eigenen Forschungsleistung in dieser Arbeit. Dazu wird der Stand der Forschung und Praxis in den Forschungsfeldern Fabrikplanung (Abschnitt 2.1), schlanke Produktionssysteme (Abschnitt 2.2) und Lernfabriken (Abschnitt 2.3) beschrieben.

2.1 Fabrikplanung

Die Grundlagen zur Planung von Lernfabriken gehen aus der Planung herkömmlicher Fabriken hervor, die in diesem Abschnitt erläutert werden. Zunächst werden wichtige Begriffe der Fabrikplanung definiert (Abschnitt 2.1.1) sowie darauf aufbauend die Ziele (Abschnitt 2.1.2) und Phasen (Abschnitt 2.1.3) der Fabrikplanung dargestellt. Zudem werden Verfahren zur Auswahl von Fabrikelementen (Abschnitt 2.1.4) und zur Layoutplanung (Abschnitt 2.1.5) erläutert.

2.1.1 Begriffsdefinitionen

Fabrik

Das Wort „Fabrik“ hat seinen Ursprung im Lateinischen: „fabrica“ bezeichnet Künstler- und Handwerksarbeit oder steht für Werkstätten. Eine Fabrik ist laut Duden ein „Betrieb, in dem auf industriellem Wege durch Be- und Verarbeitung von Werkstoffen unter Einsatz mechanischer und maschineller Hilfsmittel bestimmte Waren, Produkte (oder Teile davon) in großer Stückzahl hergestellt werden“ [Du]. Der VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE definiert eine Fabrik spezifischer als einen Ort, „[...] an dem Wertschöpfung durch arbeitsteilige Produktion industrieller Güter unter Einsatz von Produktionsfaktoren stattfindet“ [Ve11]. Aus diesen Definitionen wird ersichtlich, dass Fabriken als sozio-technische Systeme verstanden werden können, die sich aus einem technischen Subsystem (bestehend aus Aufgaben und Technologien) sowie einem sozialen Subsystem (bestehend aus Mitgliedern und Rollen) zusammensetzt [Sy85], [CI12].

Fabrikebenen

Eine Fabrik kann hierarchisch in mehrere Ebenen eingeteilt werden. So kann ein Fabriknetzwerk als oberste Ebene aus mehreren Standorten bestehen, die sich aus mehreren Fabriken zusammensetzen (s. Abbildung 2.1). Eine Fabrik wird in mehrere Fabrikbereiche gegliedert, die wiederum aus verschiedenen Linien bestehen. Diese beinhalten Zellen mit einzelnen Fabrikelemente [Wi07b].



Abbildung 2.1: Fabrikebenen, eigene Darstellung in Anlehnung an [Wi07b]

Fabrikelement

Fabrikelemente stellen einzelne Komponenten einer Fabrik dar. Die Verwendung dieses Begriffs ist in der Literatur nicht eindeutig: Während manche Autoren diesen Begriff sehr breit verwenden und bspw. das Gebäude als Element mit einschließen [WNR14], wird er von anderen Autoren lediglich für produktionsrelevante Betriebsmittel genutzt [He18]. In dieser Arbeit werden Fabrikelemente analog zu Betriebsmitteln definiert, die direkt oder indirekt für die Wertschöpfung in einer Fabrik benötigt werden. Beispiele für Fabrikelemente sind Fertigungsmaschinen, Montage- und Logistiksysteme.

Fabrikplanung

Fabrikplanung wird nach dem VDI als „systematischer, zielorientierter, in aufeinander aufbauende Phasen strukturierter und unter Zuhilfenahme von Methoden und Werkzeugen durchgeführter Prozess zur Planung (und Realisierung i. w. S.) einer Fabrik von der Zielfestlegung bis zum Hochlauf der Produktion“ definiert [Ve11]. Da diese Definition am häufigsten verwendet wird, wird sie im weiteren Verlauf dieser Forschungsarbeit genutzt.

Konfiguration

Die Konfiguration wird in dieser Forschungsarbeit als die systematische Auswahl von Fabrikelementen im Rahmen der Fabrikplanung definiert. Dabei werden in allen vorliegenden Fabrikbereichen Entscheidungen zu konkreten Alternativen getroffen.

2.1.2 Ziele der Fabrikplanung

Zu den Zielen der Fabrikplanung existieren vier Planungsfälle [Ve11]:

1. Bei der *Neuplanung* einer Fabrik wird ein von Grund auf ein neues Gebäude bzw. Werk zur industriellen Leistungserstellung geplant.
2. Bei der *Umplanung* wird eine bestehende Fabrik ausgehend von aktuellen Anforderungen verändert.
3. Beim *Rückbau* wird eine Fabrik demontiert und stillgelegt.
4. Bei der *Revitalisierung* wird eine bereits stillgelegte Fabrik derart umstrukturiert, dass sie erneut zur Produktion genutzt werden kann. [Ve11]

In der betrieblichen Praxis finden sich vorwiegend die ersten beiden Planungsfälle wieder. Bei den Planungsfällen zu beachten ist, dass der Umfang stark variieren kann. So kann auch die Neuplanung einer einzelnen Maschine der Fabrikplanung zugeordnet werden [He07].

Aufbauend auf den Planungsfällen lassen sich die Ziele der Fabrikplanung aus den übergeordneten Unternehmenszielen ableiten, die sich aus Qualität, Zeit, Kosten und Flexibilität zusammensetzen [Ve12]. Allerdings werden die Ziele von verschiedenen Experten unterschiedlich systematisiert sowie durch weitere Ziele ergänzt [He10]. Hierbei sind vor allem drei Themen zu nennen: Wandlungsfähigkeit, Nachhaltigkeit und Globalisierung. In der VDI 5200 werden die folgenden Ziele zur Fabrikplanung genannt: Flexibilität und Wandlungsfähigkeit, Produkt- und Produktionsprozessqualität, Geschwindigkeit, Wirtschaftlichkeit, Mitarbeiterorientierung, Kommunikationsunterstützung und Attraktivität, Nachhaltigkeit, Transparenz [Ve11].

An dieser Stelle ist eine Begriffsabgrenzung zwischen der Flexibilität und der Wandlungsfähigkeit von Fabriken notwendig [He03]:

- Durch *Flexibilität* wird eine kurzfristige Reaktion auf Marktbedingungen ohne strukturelle Änderungen erreicht. D. h., dass Flexibilität Veränderungen in einem vordefinierten Flexibilitätskorridor ermöglicht.
- Durch *Wandlungsfähigkeit* können strukturelle Änderungen mit wenig Aufwand vorgenommen werden, sofern die Möglichkeiten der Flexibilität nicht ausreichend sind. Dadurch verändert sich der Flexibilitätskorridor. Die strukturellen Veränderungen sind kurzfristig innerhalb eines Wandlungskorridors möglich (s. Abbildung 2.2). [He03]

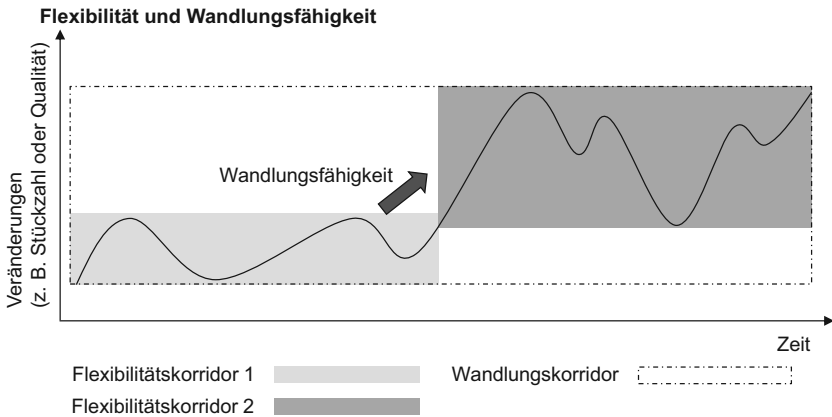


Abbildung 2.2: Flexibilität und Wandlungsfähigkeit, in Anlehnung an [WNR14]

Strukturelle Änderungen als wichtiger Bestandteil der Wandlungsfähigkeit verändern die folgenden drei Systemeigenschaften einer Fabrik:

- Mit wachsender *Dynamik* vergrößert sich die Änderungsrate von Elementen und Beziehungen in kurzer Zeit.
- *Komplexität* bezeichnet die Fähigkeit, individuelle Systemzustände in angemessener Zeit einzunehmen.
- Durch *Vernetztheit* entstehen Regelkreise, die das System wachsen bzw. schrumpfen lassen oder stabil halten. [WNR14]

Auf Basis der Systemeigenschaften lassen sich fünf Wandlungsbefähiger einer Fabrik ableiten, welche Einfluss auf die strukturellen Änderungen haben: Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit, Modularität und Kompatibilität (s. Abbildung 2.3).

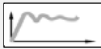







Systemeigenschaften einer Fabrik mit Einfluss auf die Wandlungsfähigkeit	Wandlungsbefähiger
<p>Dynamik</p>  <p>Änderungsrate von Elementen und Beziehungen</p>	<p>Mobilität</p>  <p>Örtlich uneingeschränkt bewegbare Objekte</p> <p>Skalierbarkeit</p>  <p>Technisch, räumlich und personell skalierbar</p>
<p>Komplexität</p>  <p>Fähigkeit, zahlreiche Systemzustände in angemessener Zeit einzunehmen</p>	<p>Universalität</p>  <p>Dimensionierung und Gestaltung für unterschiedliche Anforderungen</p> <p>Modularität</p>  <p>Standardisierte Schnittstellen, funktionsfähige Einheiten oder Elemente</p>
<p>Vernetztheit</p>  <p>Regelkreise, die das System wachsen bzw. schrumpfen lassen oder stabil halten</p>	<p>Kompatibilität</p>  <p>Vernetzungsfähigkeit von Material, Information, Medien und Energie</p>

Abbildung 2.3: Ableitung der Wandlungsbefähiger, eigene Darstellung in Anlehnung an [WNR14]

2.1.3 Phasen der Fabrikplanung

Der Fabrikplanungsprozess wird in Phasen gegliedert, um das Fabrikplanungsprojekt zu strukturieren. In vielen Fabrikplanungsprojekten werden zunächst die Arbeitsprozesse, die technische Einrichtung und das Layout geplant (Prozesssicht) [WNR14]. Im Anschluss planen Architekten das Gebäude sowie dessen Ausrüstung (Raumsicht). Die Folgen dieser separaten Betrachtung sind Insellösungen sowie Budget- und Terminüberschreitungen mit unzureichenden Ergebnissen. Die Wechselwirkungen zwischen der Prozess- und der Raumsicht werden in der synergetischen Fabrikplanung genutzt, indem beide Sichtweisen parallel und nicht sequenziell betrachtet werden. [WNR14]

Der in dieser Forschungsarbeit vorgestellte Planungsprozess für Fabriken baut auf der synergetischen Fabrikplanung auf und gliedert sich nach der VDI 5200 in sieben Phasen, die in Abbildung 2.4 dargestellt sind und im Folgenden näher beschrieben werden:

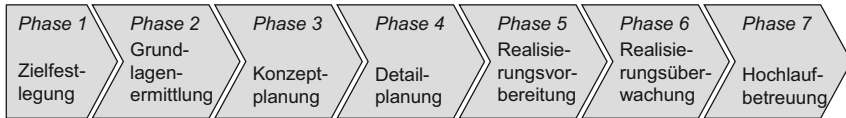


Abbildung 2.4: Phasenmodell der Fabrikplanung nach der VDI 5200 [Ve11]

- **Phase 1: Zielfestlegung**

Zuerst werden die Unternehmensziele und Rahmenbedingungen analysiert, sodass als Ergebnis die Fabrik- und Projektziele geklärt, Anforderungen ermittelt sowie Bewertungskriterien gewichtet sind. Außerdem werden Arbeitspakete in einem Projektplan strukturiert.

- **Phase 2: Grundlagenermittlung**

Danach werden die weiteren Grundlagen der Anforderungen und Bewertungskriterien ermittelt. Nach dieser Phase sollten als Ergebnis alle notwendigen Informationen und Daten für die nächsten Phasen vorliegen.

- **Phase 3: Konzeptplanung**

In der nächsten Phase wird das Konzept erstellt. Als Output dieser Phase steht zum einen ein bevorzugtes Reallayout, das sowohl quantitativ als auch quantitativ bewertet wurde. Zum anderen sollte der dazugehörige Gebäudeentwurf festgelegt werden.

- **Phase 4: Detailplanung**

Für das bevorzugte Reallayout werden weitere Details geplant, wie z. B. das Feinlayout, ein Lastenheft, zu beschaffende Fabrikelemente, ein Logistikkonzept und erforderliche Genehmigungsanträge. Die Konfiguration von Fabriken ist demnach in dieser Phase zu verorten.

- **Phase 5: Realisierungsvorbereitung**

In der Realisierungsvorbereitung wird die weitere Umsetzung geplant sowie die Beschaffung der Fabrikelemente organisiert. Dazu werden aufbauend auf einer Lieferantenliste Angebote eingeholt.

- **Phase 6: Realisierungsüberwachung**

Die ordnungsgemäße Realisierung der Fabrik (inklusive der Außenanlage und der Fabrikelemente) wird überwacht, sodass der festgelegte Zeitplan und das Budget eingehalten werden. Nach Abschluss dieser Phase kann die Fabrik in Betrieb genommen werden.

- **Phase 7: Hochlaufbetreuung**

Zuletzt wird der Hochlauf der Fabrik betreut, bis die geplante Produktionsleistung stabil erreicht wird. [Ve11]

Alternativen zur Strukturierung der Phasen finden sich in GRUNDIG [Gr15] und WIENDAHL ET AL. [WNR14]. Von besonderer Bedeutung für den weiteren Verlauf der Arbeit sind die Auswahl von Fabrikelementen und die Layoutplanung als Teil der Konzept- und Detailplanung. Daher werden diese beiden Aspekte im Folgenden näher betrachtet.

2.1.4 Auswahl von Fabrikelementen

Die Auswahl von Fabrikelementen – wie bspw. Maschinen, Anlagen sowie Logistik- und Montagesysteme – stellt einen wichtigen Aspekt der Detailplanung (Phase 4 der VDI 5200) dar, da die ausgewählten Fabrikelemente die Möglichkeiten des technischen Systems eines Unternehmens maßgeblich beeinflussen und beschränken [AÖ12]. Außerdem entsteht während der Fabrikplanung ein großer Anteil der Investitionskosten durch die Anschaffung von Fabrikelementen [KK15]. Die Auswahl von Fabrikelementen stellt ein multikriterielles Entscheidungsproblem dar, zu dessen Lösung unterschiedliche Methoden existieren [Ge88]. Diese werden im Folgenden kurz vorgestellt. Für eine detaillierte Beschreibung der Methoden wird auf die zitierten Literaturquellen verwiesen. Hierbei handelt es sich um die bisher entwickelten Ansätze zur Konfiguration herkömmlicher Fabriken.

Zu den etabliertesten Methoden zur Auswahl von Fabrikelementen gehört die **Nutzwertanalyse** [WNR14].² Dabei werden zunächst die wichtigsten Kriterien zur Beurteilung von Fabrikelementen durch Experten ausgewählt und anschließend mittels Gewichtungsverfahren, wie dem Paarvergleich [BT52], gewichtet. Anschließend erfolgt die Bewertung der Fabrikelemente hinsichtlich der ermittelten Kriterien [WNR14]. Die Entscheidungsmatrix, mit den potenziellen Fabrikelementen in den Zeilen und den Kriterien in den Spalten, wird normiert. Durch die Bildung des Summenprodukts aus den normalisierten Bewertungen und der Gewichtung berechnet sich ein Nutzwert. Das Fabrikelement mit dem höchsten Nutzen wird schließlich ausgewählt. Der Ansatz wurde bspw. von ÖZDAĞOĞLU zur Maschinenauswahl angewendet [ÖYB17]. Die Vorteile dieses Ansatzes sind der geringe Aufwand in der Durchführung sowie die Tatsache, dass sich die Rangfolge der Bewertung beim Hinzufügen einer Alternative nicht verändern [Th21]. Im Gegensatz zu den weiteren hier aufgeführten Ansätzen wird die Nutzwertanalyse als sehr praxisrelevant eingestuft, da die Ergebnisse leicht interpretierbar sind [KP16].

Beim **Analytic Hierarchy Process** (AHP) nach SAATY wird zunächst eine hierarchische Struktur zwischen den zu erreichenden Zielen, Kriterien und Unterkriterien gebildet [Sa87]. Im Anschluss erfolgt ein Paarvergleich anhand der Neun-Punkt-Skala von SAATY, wobei sich die Gewichtung der Kriterien durch den Eigenvektor der Paarvergleichsmatrix ergibt. Die Bewertung der Fabrikelemente berechnet sich durch einen erneuten Paarvergleich hinsichtlich aller Kriterien und einer erneuten Berechnung der Eigenvektoren. Dabei ist das Fabrikelement auszuwählen, das die höchste Bewertung aufweist [Ay07].³

² Dieser Ansatz ist auch bekannt als „Simple Additive Weightage“ [ZW83].

³ Der AHP wurde z. B. von ÇİMREN ET AL. genutzt, um Maschinen auszuwählen [ÇÇB07].

Der **Analytic Network Process** (ANP) baut auf dem AHP auf und wurde ebenfalls in seiner Grundform von SAATY entwickelt [Sa96]. Zusätzlich zum AHP werden mögliche Abhängigkeiten und Wechselwirkungen der Kriterien durch den Aufbau in einer Netzwerkstruktur berücksichtigt. Der Ablauf der Methode ist ähnlich dem des AHP. Die Netzwerkstruktur kann in einer sogenannten Super-Matrix dargestellt werden, in der alle Ziele, Kriterien und Fabrikelemente in den Zeilen und Spalten enthalten sind [KK15]. In Vergleichsmatrizen werden die gegenseitigen Beziehungen der Kriterien abgebildet. Die Berechnung der Gewichtungen erfolgt analog zum AHP, wobei zusätzlich zum unabhängigen Gewicht der Anteil zur Beeinflussung der weiteren Kriterien addiert wird. Das Fabrikelement mit der höchsten Bewertung wird ausgewählt [Th21].⁴

Auch der Ansatz **Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution** (TOPSIS), der von HWANG UND YOON entwickelt wurde, kann zur Auswahl von Fabrikelementen genutzt werden [TH11]. Das bestmögliche Fabrikelement ist nach dieser Methode dasjenige, welches die kürzeste (geometrische) Distanz zu der ideal besten Lösung und die weiteste Distanz zu der ideal schlechtesten Lösung aufweist [KK16].⁵

Die **Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluation** (PROMETHEE) wurde von BRANS UND VINCKE entwickelt [BV85]. Durch eine Präferenzfunktion wird anhand der normalisierten Attributwerte der Kriterien ein Präferenzwert zwischen zwei Fabrikelementen berechnet. Die Präferenzwerte können durch eine Gewichtungsfunktion, die frei gewählt werden kann, aggregiert werden. Die Rangfolge der Fabrikelemente ergibt sich aus der Differenz zwischen den Mittelwerten der Präferenzwerte sowohl zu als auch von den weiteren Fabrikelementen [Da08]. Bei PROMETHEE werden demnach keine Nutzwerte berechnet.⁶

Beim **Goal Programming** von CHARNES ET AL. werden zunächst zu erwartende Attributwerte für die ermittelten Kriterien aufgestellt. Jede Unter- und Übererfüllung führt zu gewichteten Strafwerten, die es zu minimieren gilt [CCF55]. Somit werden beim Goal Programming keine Nutzwerte berechnet, sondern nur summierte Strafwerte.⁷

Der Ansatz **Complex Proportional Assessment** (COPRAS) wurde von ZAVADSKAS UND KAKLAUSKAS entwickelt [LR96]. Generell werden hier zwischen

⁴ Der ANP wurde von PARAMASIVAM ET AL. genutzt, um eine Fräsmaschine auszuwählen [PSR11].

⁵ TOPSIS wurde bisher von ATHAWALE UND CHAKRABORTY zur Auswahl einer CNC-Werkzeugmaschine genutzt [AC10].

⁶ PROMETHEE wurde in Kombination mit dem ANP von TUZKAYA ET AL. zur Auswahl von Materialtransportmitteln genutzt [Tu10].

⁷ Der Ansatz wird beispielsweise von YILMAZ UND DAĞDEVIREN in Kombination mit PROMETHEE genutzt [YD11].

Maximierungs- und Minimierungsattributen unterschieden. Dazu wird die Summe der gewichteten normalisierten Attributwerte und darauf aufbauend die relative Wichtigkeit berechnet. Das Fabrikelement mit der höchsten relativen Wichtigkeit wird ausgewählt [AZZ13].⁸

Beim Ansatz **ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje** (VIKOR, deutsch: multikriterielle Optimierung und Kompromisslösung), der von OPRIKOVIC entwickelt wurde, wird ein sog. Verlustnutzen berücksichtigt [Op98]. Multipliziert mit einem zusätzlichen Gewichtungsfaktor erhöht der Verlustnutzen den Zielfunktionswert eines Fabrikelements. Das Fabrikelement mit dem kleinsten Zielfunktionswert wird bei dieser Methode ausgewählt [OT04].⁹

Neben den vorgestellten Ansätzen zur Auswahl von Fabrikelementen existieren **weitere Ansätze** der multikriteriellen Entscheidungsfindung, die jedoch an dieser Stelle nicht detailliert beschrieben werden. Beispiele sind Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis (MOORA)¹⁰, Grey Relational Analysis (GRA)¹¹, Élimination Et Choix Traduisant la REalité (ÉLECTRE)¹², Weighted Utility Additive Theory (WUTA)¹³ und Graph Theory and Matrix Approach (GTMA)¹⁴.

Im Folgenden werden die bestehenden Ansätze zur Konfiguration kriterienbasiert ausgewertet (s. Tabelle 2.1). Die Kriterien wurden dabei aus der Zielstellung dieser Arbeit hergeleitet, um die bestmögliche Kombination an Fabrikelementen zu ermitteln:

- Die Quantifizierung des Ergebnisses, z. B. durch Angabe eines Nutzwerts, erleichtert die objektive Entscheidung.
- Durch Hinzufügen neuer Alternativen sollten die Ergebnisse weiterhin konsistent sein, d.h., dass sich die Rangfolge der bevorzugten Fabrikelemente nicht verändert.
- Der Aufwand bei der Durchführung der Ansätze sollte möglichst gering sein.
- Die Ansätze sollten in der betrieblichen Praxis relevant sein.
- Bei der Planung von Fabriken sollten nicht nur einzelne Fabrikbereiche separat betrachtet werden. Der Planungsansatz sollte sich ganzheitlich auf die gesamte Fabrik beziehen.

⁸ Bisher wurde der COPRAS-Ansatz von NGUYEN ET AL. lediglich in Kombination mit dem AHP angewendet, um eine Werkzeugmaschine auszuwählen [Ng15].

⁹ VIKOR wurde bspw. von WU ET AL. für die Auswahl einer CNC-Werkzeugmaschine verwendet [WAX16].

¹⁰ [Br03], angewendet in [Ch11].

¹¹ [Ju82], angewendet in [SJC12].

¹² [Ro68], angewendet in [BGK09].

¹³ [Ra07], basierend auf dem Ansatz von [JS82] und angewendet in [KC13].

¹⁴ [Ra07], angewendet in [SFF13].

- Gegebene Restriktionen, die sich auf die gesamte Fabrik beziehen, sollten einbezogen werden.

Tabelle 2.1: Übersicht über den Erfüllungsgrad bisheriger quantitativer Ansätze zur Konfiguration industrieller Fabriken anhand der Anforderungen der vorliegenden Forschungsarbeit, eigene Darstellung

Ansätze zur Auswahl von Fabrikelementen	Kriterien					
	Angabe eines Nutzwertes	Konsistenz beim Hinzufügen neuer Alternativen	Geringer Aufwand	Relevanz in der betrieblichen Praxis	Betrachtung mehrerer Fabrikbereiche	Beachtung von Restriktionen
Nutzwertanalyse	●	●	●	●	○	○
AHP	●	○	●	●	○	○
ANP	●	○	●	●	○	○
TOPSIS	●	○	●	●	○	○
PROMETHEE	○	○	●	○	○	○
Goal Programming	○	●	●	●	○	○
COPRAS	●	●	●	○	○	○
VIKOR	●	○	●	○	○	○
MOORA	●	○	●	○	○	○
GRA	○	○	●	○	○	○
ÉLECTRE	○	○	●	○	○	○
WUTA	●	●	●	○	○	○
GTMA	○	●	●	○	○	○

Dabei ist zu erkennen, dass bisher kein Ansatz existiert, bei dem Fabrikelemente mehrerer Fabrikbereiche gleichzeitig betrachtet werden. Zur Anwendung auf mehrere Fabrikbereiche werden die bestehenden Ansätze für jeden Fabrikbereich einzeln angewendet. Gegenseitige Abhängigkeiten und Restriktionen, wie z. B. die Verwendung eines Gesamtbudgets oder einer maximal verfügbaren Fabrikfläche, werden damit nicht beachtet. Unter diesem Gesichtspunkt ist die Verwendung eines Nutzwerts relevant, um Fabrikelemente bereichsübergreifend vergleichen zu können. Nicht alle Ansätze verwenden jedoch einen Nutzwert zur Auswahl. Werden außerdem bereichsübergreifend mehrere Alternativen zu möglichen Fabrikelementen verglichen, sollte der Aufwand bei der Bewertung möglichst gering sein. Außerdem sollte der Ansatz möglichst praxisnah, leicht nachvollziehbar und interpretierbar sein. Beide Kriterien werden lediglich von der Nutzwertanalyse vollständig berücksichtigt [KP16]. Des Weiteren kann es beim Hinzufügen oder Entfernen von Alternativen vorkommen, dass sich deren

Rangfolge verändert. Dieses Phänomen wird Rank Reversal genannt und vermindert die Validität und Aussagekraft der Ansätze [H110], [CCK14], [NŁ16], [AF18], [Ag21].

Auf Basis der Bewertung kann festgestellt werden, dass bisher kein Ansatz zur Konfiguration industrieller Fabriken für dieses Forschungsvorhaben besteht, da im Rahmen dieses Forschungsvorhabens mehrere Fabrikbereiche gleichzeitig betrachtet werden sollen. Die Nutzwertanalyse kann jedoch aufgrund ihres geringen Aufwands und der Relevanz in der betrieblichen Praxis [WNR14] als Grundlage zur Weiterentwicklung angesehen werden.

2.1.5 Layoutplanung

Layoutplanung bezeichnet die Anordnung von Betriebsmitteln bzw. Fabrikelementen zur Umsetzung der Fabrikplanungsziele (s. Abschnitt 2.1.2) [Ve89]. Dabei werden unterschiedliche Planungsebenen beschrieben, welche in Abbildung 2.5 dargestellt sind. Während beim Groblayout Fertigungshallen, Freilagerflächen und Verwaltungsgebäude geplant werden, beschäftigt sich das Blocklayout detaillierter mit den einzelnen Fertigungsbereichen, Lagerflächen für Roh- und Fertigteile und Hauptausrüstungen. Das Groblayout stellt das Ergebnis der dritten Phase des beschriebenen Phasenmodells der Fabrikplanung dar (s. Abschnitt 2.1.3) [Ve11]. Im Detaillayout werden Fertigungsgruppen, Maschinen, Anlagen sowie einzelne Arbeitsplätze einschließlich der Transportwegen betrachtet [Ve89]. Die Planung des Detaillayouts findet in der vierten Phase (Detailplanung) des Phasenmodells statt [Ve11].

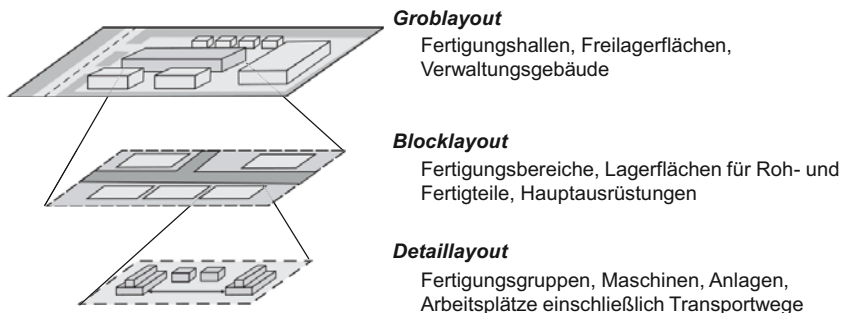


Abbildung 2.5: Planungsebenen der Layoutplanung nach der VDI 2385, eigene Darstellung in Anlehnung an [Ve89]

Die **Planungsgrundlage** eines Fabriklayouts basiert auf dem zugrundeliegenden Materialfluss. Dabei sind die Materialflussbeziehungen zwischen den einzelnen Fabrikbereichen sowie die Transportmengen relevant. Zur Darstellung der Materialflussbeziehungen eignet sich ein ideales Funktionsschema, das durch die Abstraktion der in den Arbeitsplänen enthaltenen Arbeitsgänge erstellt

werden kann (s. Abbildung 2.6 links). Dabei werden vorliegende Restriktionen zunächst nicht beachtet, um eine erste Übersicht des betrieblichen Produktionsablaufs zu gewinnen. Darüber hinaus können die Transportmengen (bspw. als Mengeneinheiten) zwischen den einzelnen Fabrikbereichen in einem Sankey-Diagramm veranschaulicht werden (s. Abbildung 2.6 rechts). Die Dicke der Pfeile verhält sich proportional zur Transportmenge. [KSG84]

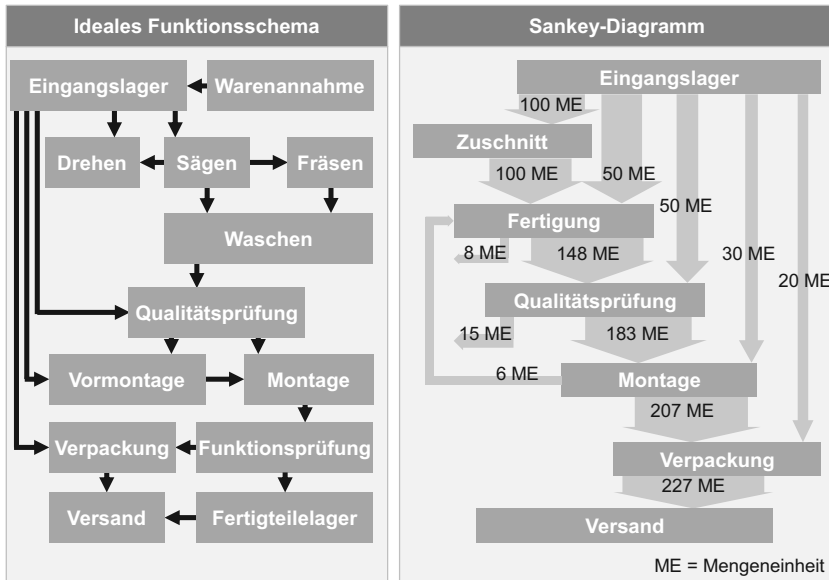


Abbildung 2.6: Ideales Funktionsschema und Sankey-Diagramm mit Beispiel, eigene Darstellung in Anlehnung an [KSG84]

Für komplexere Zusammenhänge, insbesondere einer hohen Anzahl an Fabrikbereichen, eignet sich jedoch stattdessen eine Materialflussmatrix¹⁵, in der tabellarisch in den Spalten abgehende und in den Zeilen eingehende Materialflüsse quantitativ eingetragen werden [Ag90]. Tabelle 2.2 zeigt dazu ein Beispiel, das auf dem Sankey-Diagramm aus Abbildung 2.6 aufbaut. Dabei sind Rückführungen im Materialfluss als graues Dreieck dargestellt. Alternativ kann statt der Transportmenge auch die Anzahl an Transporten in einem vorgegebenen Zeitintervall angegeben werden. Die Verwendung einer Materialflussmatrix wird insbesondere ab einer Anzahl von über zehn Fabrikbereichen empfohlen [BS21].

¹⁵ Die Materialflussmatrix wird oft auch „Von-Nach-Matrix“ genannt.

Tabelle 2.2: Materialflussmatrix mit Beispiel, eigene Darstellung in Anlehnung an [Ag90]

Nach Von	Eingangslager	Zuschnitt	Fertigung	Qualitätsprüfung	Montage	Verpackung	Versand	Ausschuss	Summe
Eingangslager	X	100	50	50	30	20			250
Zuschnitt		X	100						100
Fertigung			X	148				8	156
Qualitätsprüfung			Rückführungen	X	183			15	198
Montage			6		X	207			207
Verpackung						X	227		227
Versand							X		
Summe		100	156	198	213	227	227	23	

Zur tatsächlichen **Ermittlung von Fabriklayouts** existieren mehrere methodische Vorgehensweisen, die sich zum einen in heuristische und zum anderen in optimierende Verfahren einteilen lassen. Zu den etabliertesten heuristischen Verfahren zählen das Kreis- und das Dreiecksverfahren. Beim Kreisverfahren nach SCHWERDTFEGER werden die einzelnen Fabrikbereiche kreisförmig angeordnet (s. Abbildung 2.7), wobei die Stärke der Linien zwischen den Fabrikelementen den Materialfluss abbildet. Durch Vertauschen der Fabrikelemente entlang des Kreises sollen die Fabrikelemente mit einem erhöhten Materialfluss nahe beieinander liegen [Gr15]. Das Verfahren ist zwar einfach anwendbar, jedoch liegt keine systematische Vorgehensweise zugrunde, wodurch es vornehmlich intuitiv und erfahrungsbasiert ist [BS21]. Beim Dreiecksverfahren nach BLOCH UND SCHMIGALLA werden die Fabrikelemente iterativ nach absteigendem Materialfluss auf einem Dreiecksraster platziert. Hierzu ist die Materialflussmatrix nach jedem Schritt anzupassen. Das Verfahren basiert auf einer eindeutigen Reihenfolge der Fabrikelemente, die nach und nach in die Dreiecksmatrix gesetzt werden [Gr15]. Bei den heuristischen Verfahren kann allerdings nicht sichergestellt werden, dass eine optimale Lösung gefunden wird.

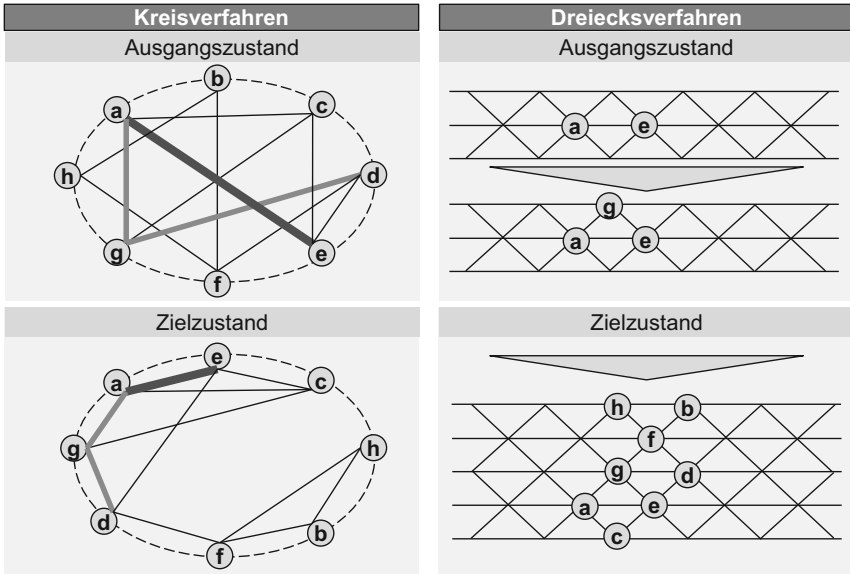


Abbildung 2.7: Heuristiken zur Layoutplanung, eigene Darstellung in Anlehnung an [Gr15]

Verfahren zur Optimierung von Fabriklayouts werden durch das sogenannte Facility Layout Problem (FLP) beschrieben [Sc10]. Hierbei wird eine Klasse von Optimierungsproblemen zur Layoutplanung beschrieben, die unterschiedlich modelliert werden¹⁶. In den meisten Fällen soll ein Layout gefunden werden, das eine zuvor definierte Zielfunktion minimiert. In den bisher entwickelten Ansätzen setzt sich diese Zielfunktion meistens aus den gesamten Transportkosten zusammen. Als Ergebnis werden die einzelnen Koordinaten der Fabrikelemente ausgewiesen, welche die Entscheidungsvariablen des Optimierungsproblems darstellen [SS06]. In einem Fabrikplanungsprojekt, unter Beteiligung des Autors dieser Forschungsarbeit, konnte gezeigt werden, dass durch die Anwendung des FLP Fabriklayouts generiert werden können, die im Vergleich zum bisherigen Planungsstand 14 % bessere Zielfunktionswerte aufweisen. Abbildung 2.8 veranschaulicht das dabei entstandene Vorgehen nach KREß ET AL. zur Anwendung von Optimierungsalgorithmen bei der Layoutplanung: Zunächst sind die notwendigen Rahmenbedingungen, insbesondere der Fabrikziele, zu klären. Auf dieser Basis können die notwendigen Daten, wie z. B. die Materialflüsse und die Abmessungen der Fabrikelemente, ermittelt werden. Dadurch können erste Layouts durch die Anwendung von Heuristiken (z. B. von genetischen Algorithmen) erstellt werden, die abschließend auf deren Umsetzbarkeit zu überprüfen sind [Kr21a]. Der Vorteil

¹⁶ Beispiele hierfür sind nach [Sc10] die Unterscheidung in statische und dynamische Probleme, die Größe und Form der zu platzierenden Einheiten oder die Verwendung von diskreten oder kontinuierlichen Modellen.

der optimierenden Verfahren besteht darin, dass die erstellten Layouts hinsichtlich der zugrundeliegenden Zielfunktion signifikant besser abschneiden als intuitiv ermittelte Layouts. Allerdings stellt die Modellierung einen erheblichen Aufwand dar, zumal keine bedienungsfreundliche Software für diese Verfahren auf dem Markt verfügbar ist, in der diese Verfahren implementiert sind.



Abbildung 2.8: Vorgehen zur algorithmenbasierten Layoutplanung, eigene Darstellung in Anlehnung an [Kr21a]

2.2 Schlanke Produktionssysteme

Dieser Abschnitt behandelt die Grundlagen schlanker Produktionssysteme als Basis für Lernfabriken mit dem inhaltlichen Fokus auf der schlanken Produktion. Dazu werden die Grundlagen schlanker Produktionssysteme beschrieben (Abschnitt 2.2.1) und deren Gestaltungsprinzipien vorgestellt (Abschnitt 2.2.2). In Lernfabriken werden außerdem Ansätze der schlanken, digitalen Produktion betrachtet, die zum Abschluss dieses Abschnitts ergänzend beschrieben werden (Abschnitt 2.2.3).

2.2.1 Grundlagen der schlanken Produktion

Die speziellen Rahmenbedingungen nach dem zweiten Weltkrieg in Japan sorgten für Umstände, die zu dem heute bekannten Konzept der schlanken Produktion (auch „Lean Production“) führten. Die Ursprünge der schlanken Produktion finden sich im Toyota-Produktionssystem (TPS) [Oh13]. Im Kern des TPS steht die Vermeidung von Verschwendung, d. h. jener Tätigkeiten, die keinen Bezug zum Kundennutzen oder zur Wertschöpfung aufweisen [SH92]. Üblicherweise werden sieben Arten der Verschwendung unterschieden: Überproduktion, Bestände, Bewegung, Ausschuss, Transport, Prozessübererfüllung und Warten [Oh13]. Der zeitliche Aufwand, der nicht-wertschöpfend ist, sollte eliminiert oder zumindest reduziert werden. Prozesse und Wertströme sollen kontinuierlich

verbessert werden, indem Abweichungen erkannt und Probleme in der Produktion gelöst werden. Als achte Art der Verschwendung werden zudem ungenutzte Fähigkeiten bzw. Kompetenzen der Beschäftigten genannt [KS15]. Basierend auf den Prozessverbesserungen entwickeln Beschäftigte so fortlaufend Kompetenzen zur Problemlösung. Deshalb wird als weiteres Grundelement der schlanken Produktion auch die „lernende Organisation“ genannt [Li12]. Neben den reaktiven Verbesserungen zur Einhaltung eines etablierten Standards, sollte der aktuelle Zustand der Produktion auch proaktiv weiterentwickelt werden [ABC11]. International bekannt wurde das Konzept der schlanken Produktion vor allem durch eine von WOMACK ET AL. durchgeführten Studie am MIT zur globalen Automobilindustrie. In der Studie werden die Vorteile der schlanken Produktion im Vergleich zur Massenproduktion, welche in Europa und den USA bis dahin üblich war, dargestellt [WJR90]. Die aktuell verwendeten Produktionssysteme basieren weitestgehend auf dem TPS und den im nächsten Abschnitt vorgestellten Gestaltungsprinzipien [DHS06]. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Methoden und Prinzipien der schlanken Produktion vermehrt Einzug in Bereiche außerhalb der Produktion finden [WSG15]. Als Beispiele können an dieser Stelle die Baubranche [Fi18], die Produktentwicklung [Do15b] sowie Softwaretechnik [PC12] genannt werden.

Zusammenfassend stellt die „schlanke Produktion“ somit ein integriertes sozio-technisches System dar, dessen Ziel die Vermeidung von Verschwendung ist [SW03].

2.2.2 Gestaltungsprinzipien für schlanke Produktionssysteme

Zur ausführbaren Umsetzung einer schlanken Produktion existieren verschiedene Gestaltungsprinzipien und Methoden. Ein Methodenkatalog zu ganzheitlichen Produktionssystemen findet sich in der VDI 2870 [Ve12]. Die Methoden zur Umsetzung der schlanken Produktion werden dabei thematisch zu Gestaltungsprinzipien zusammengefasst.

Im Folgenden werden die Gestaltungsprinzipien ganzheitlicher Produktionssysteme der VDI 2870 kurz erläutert [Ve12].

- Durch **Standardisierung** werden wiederkehrende Prozesse, Arbeitsabläufe sowie der Arbeitsplatz klar definiert. So werden Abweichungen innerhalb geplanter Prozessschritte identifiziert und die Einarbeitung neuer Beschäftigten erleichtert. [Di08]
- Das **Null-Fehler-Prinzip** beschreibt eine fehler- und ausschussfreie Produktion ohne Nacharbeit als Leitbild [Tö07]. Dabei zielt das Prinzip nicht nur auf fehlerfreie Produkte am Ende der Wertschöpfung ab, sondern bereits nach jedem einzelnen Prozess. [We97]
- **Visuelles Management** stellt Hilfsmittel zur Verfügung, mit denen Abweichungen von Standards und Probleme sichtbar gemacht werden. Dies erleichtert die Identifikation von Verschwendung. [In16]

- Zu den **kontinuierlichen Verbesserungsprozessen** gehören vor allem Routinen zur zielorientierten Führung und Problemlösung in der Produktion, wie z. B. der PDCA-Zyklus und die Coaching-Routine. Auf diese Weise werden Prozesse kontinuierlich überprüft und verbessert [RK09]. Die tägliche Verbesserung von Prozessen spielt in der schlanken Produktion eine bedeutende Rolle, was durch den Begriff „Kaizen“ (dt. Verändern zum Verbessern) geprägt ist. [KK13]
- Durch **Mitarbeiterorientierung und zielorientierte Führung** soll eine Verhaltensänderung bei Beschäftigten hinsichtlich der Unternehmensziele erreicht werden [DBJ16]. Beschäftigte stellen klassischerweise die wichtigste Quelle für Ideen zur Prozessverbesserung dar.
- Nach dem **Fließprinzip** werden die Erzeugnisse einzeln nach der Bearbeitung zum nächsten Prozess freigegeben, ohne auf die Fertigstellung der weiteren Erzeugnisse zu warten. Dies ermöglicht einen unterbrechungsfreien Materialfluss, wodurch sich die Durchlaufzeit der Erzeugnisse verkürzt. [Wi07a]
- Produktionsaufträge werden nach dem **Pull-Prinzip** erst ausgelöst, wenn Erzeugnisse von den darauffolgenden Prozessen benötigt werden. Auf diese Weise wird vor allem Überproduktion vermieden. [We08]
- Wie bereits erwähnt, stellt das Gestaltungsprinzip **Vermeidung von Verschwendung** die Eliminierung bzw. Reduzierung nicht-wertschöpfender Tätigkeiten dar [SH92].

Tabelle 2.3 zeigt die dargestellten Gestaltungsprinzipien und Methoden sowie eine Einordnung in Zielgruppen und den Einfluss auf Unternehmensziele, welche in der VDI 2870 zu finden sind [Ve12].¹⁷ Die Zielgruppen bestehen dabei aus den operativen Beschäftigten sowie dem operativen, taktischen und strategischem Management. Als Unternehmensziele werden Qualität, Kosten und Zeit gewählt. Zur detaillierten Beschreibung der zu den Gestaltungsprinzipien zugeordneten Methoden wird auf die VDI 2870 verwiesen [Ve12].

¹⁷ In der Tabelle wurden die Begriffe „Mitarbeiterorientierung“ durch „Beschäftigtenorientierung“ und „Werkerselbstkontrolle“ durch „Qualitäts selbstkontrolle“ gendergerecht ersetzt. Die Gestaltungsprinzipien und Methoden der schlanken Produktion werden im weiteren Verlauf dieser Forschungsarbeit zur Auswahl von Fabrikelementen herangezogen, insbesondere zu deren Bewertung (s. Abschnitt 5.4).

Tabelle 2.3: Gestaltungsprinzipien und Methoden der schlanken Produktion, eigene Darstellung in Anlehnung an [Ve12]

Gestaltungsprinzip	Methode	Zielgruppe				Ziel			
		Operative Beschäftigte	Operatives Management	Taktisches Management	Strategisches Management	Qualität	Kosten	Zeit	
1	Standardisierung	1.1	5S				2	1	2
		1.2	Prozessstandardisierung				3	2	3
2	Null-Fehler-Prinzip	2.1	5x Warum				3	1	2
		2.2	8D-Report				2	2	2
		2.3	A3-Methode				2	2	2
		2.4	Autonomation				3	2	2
		2.5	Ishikawa-Diagramm				2	2	2
		2.6	Kurze Regelkreise				2	1	2
		2.7	Poka Yoka				3	2	2
		2.8	Six Sigma				3	2	2
		2.9	Stat. Prozessregelung				3	1	1
		2.10	Qualitätsselbstkontrolle				3	2	2
3	Visuelles Management	3.1	Andon				3	1	2
		3.2	Shopfloor Management				3	3	3
4	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess	4.1	Audit				2	2	2
		4.2	Benchmarking				2	2	2
		4.3	Cardboard Engineering				1	3	2
		4.4	Ideenmanagement				3	3	3
		4.5	PDCA				2	2	2
5	Beschäftigtenorientierung und Führung	5.1	Hancho				3	2	2
		5.2	Zielmanagement				2	2	2
6	Fließprinzip	6.1	FIFO				2	1	1
		6.2	One Piece Flow				3	3	3
		6.3	Schnellrüsten				1	2	3
		6.4	Wertstromplanung				1	2	3
		6.5	U-Layout				1	1	3
7	Pull-Prinzip	7.1	JIT/JIS				1	2	3
		7.2	Kanban				1	3	3
		7.3	Milkrun				1	2	2
		7.4	Nivellierung				1	1	2
		7.5	Supermarkt				1	2	2
8	Vermeidung von Verschwendung	8.1	Chaku-Chaku				1	2	2
		8.2	Low-Cost Automation				1	3	2
		8.3	TPM				1	3	1
		8.4	Verschwendungsbewertung				1	3	2

Mit der **Umsetzung der Gestaltungsprinzipien** aus der schlanken Produktion ist ein kultureller Wandel im Unternehmen verbunden [An11]. Aus diesem Grund sollte die Einführung der genannten Gestaltungsprinzipien iterativ Schritten

erfolgen [Br17]. Bei der Einführung der Methoden sollte beachtet werden, dass sich diese grundsätzlich für das Unternehmen bzw. dem entsprechenden Fabrikbereich eignen. Dabei werden zum einen der problem- sowie zum anderen der gestaltungsprinziporientierte Ansatz genannt. Beim problemorientierten Ansatz werden die Methoden reaktiv zur Lösung spezifischer Probleme ausgewählt. Der gestaltungsprinziporientierte Ansatz eignet sich bei der proaktiven Einführung eines Gestaltungsprinzips in Bezug auf die übergeordneten Unternehmensziele [Ve12]. Neben der Entwicklung eines Produktionssystems und der notwendigen Motivation der Führungsebene spielt vor allem die Vermittlung der Prinzipien und Methoden sowie die damit verbundene Kompetenzentwicklung der Beschäftigten eine wichtige Rolle bei der Implementierung der schlanken Produktion in eine bestehende Unternehmenskultur (s. Abschnitt 2.3). [B14]

2.2.3 Weiterentwicklung der schlanken Produktion durch Industrie 4.0

Während sich die Gestaltungsprinzipien und Methoden der schlanken Produktion bereits seit mehreren Jahrzehnten in weiteren Unternehmensbereichen durchsetzen, spielt parallel die Integration von Informations- und Kommunikationstechnologien in der Produktion eine wichtiger werdende Rolle. Dies sollte in der zu entwickelnden Methodik dieser Arbeit beachtet werden. Die grundlegenden Ideen zur Verknüpfung digitaler Technologien in der Produktion wurden 2011 auf der Hannovermesse mit dem Schlagwort „Industrie 4.0“ veröffentlicht [KLW11]. Während die deutsche Bundesregierung die Integration neuer Technologien durch das Programm „High-Tech Strategie 2020“ fördert [KWH13], verfolgen andere Staaten ähnliche Strategien, wie z. B. die USA mit dem Begriff „Smart Industry“ oder China mit „Made in China 2020“ [Ro20].

Zu den Prinzipien des Industrie 4.0-Ansatzes zählen Interoperabilität, Virtualisierung, Dezentralisierung, Echtzeitfähigkeit, serviceorientierte Architekturen (SOA) und Modularität [HPO16]:

- **Interoperabilität** bezeichnet dabei die Möglichkeit zum uneingeschränkten und zweckmäßigen Informationstausch von informationsverarbeitenden Systemen [Si20].
- Die **Virtualisierung** der Produktion umfasst verschiedene Simulationstechniken basierend auf einer durchgängigen Datenerfassung [Br14].
- Die **Dezentralisierung** ermöglicht autonome und teil-autonome Entscheidungen einzelner Systeme [BHV14].
- Die DIN 44300 definiert **Echtzeit** als „den Betrieb eines Rechensystems, bei dem Programme zur Verarbeitung anfallender Daten ständig betriebsbereit sind, derart, dass die Verarbeitungsergebnisse innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne verfügbar sind“ [Sc05].

- **Serviceorientierte Architekturen** bestehen aus logischen Modellen, in denen Software-Applikationen sowie die IT-Infrastruktur in interagierende Dienste reorganisiert sind [RG18].
- Der Wandlungsbefähiger **Modularität** (s. Abschnitt 2.1.2) beschreibt in diesem Kontext die Zusammensetzung der verwendeten informationsverarbeitenden Systeme in voneinander unabhängig funktionsfähige Einheiten [BHV14].

Im Vergleich zu den Prinzipien der schlanken Produktion existieren sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede zum Industrie 4.0-Ansatz [Me17]. Beide Ansätze verfolgen die gleichen übergeordneten Unternehmensziele, wie Qualität, Kosten und Zeit [VBH17]. Schlanke und standardisierte Prozesse dienen als notwendige Grundlage zur Einführung neuer Technologien [KM17], [Ma18]. Die bisherigen Prinzipien und Methoden der schlanken Produktion können durch die erweiterten Möglichkeiten neuer Technologien verbessert werden [RS16]: Z. B. ist die Fertigung individualisierter Produkte durch einen verbesserten Informationsfluss möglich und neue Technologien können bei der Erfassung nicht-wertschöpfender Tätigkeiten unterstützen. Außerdem können Echtzeitdaten zur systematischen Problemlösung genutzt werden [Me17].

Seit mehreren Jahren wird das Ziel verfolgt, den Ansatz der schlanken Produktion mit dem Industrie 4.0-Ansatz zu vereinen. Von ENKE ET AL. wurden vier Handlungsfelder definiert, in denen die schlanke Produktion durch die Möglichkeiten neuer Technologien profitiert:

- Digitalisierung verbindet die Produktion mit der Kundennachfrage, die durch digitale Geschäftsmodelle disruptive Veränderungen erfährt.
- Die Auswertung von Echtzeitdaten schafft neue Möglichkeiten bestehende Methoden der schlanken Produktion zu erweitern.
- Digitalisierung unterstützt bei der Umsetzung von Gestaltungsprinzipien der schlanken Produktion in neuen Bereichen, wie der Einzelfertigung.
- Das Produkt kennt die Produktionsumgebung und kann diese steuern. [En18]

Eine Untersuchung auf Basis von 260 Anwendungsfällen der Plattform Industrie 4.0 wurde von DOMBROWSKI ET AL. durchgeführt. Tabelle 2.4 stellt das Ergebnis dieser Studie mit grauen Hervorhebungen dar. Dabei zeigt sich die größte Abhängigkeit zwischen dem Prinzip „Vermeidung von Verschwendung“ und der Technologie „Cloud Computing“¹⁸ mit 84 Anwendungsfällen. Neben dem Einsatz

¹⁸ Cloud Computing bezeichnet „ein Modell eines universellen, praktischen und bedarfsgerechten Netzwerkzugangs zu gemeinsam genutzten Computerressourcen (z. B. Netze, Server, Speicher, Anwendungen und Dienste), die mit minimalem Verwaltungsaufwand und ohne Interaktion des Diensteanbieters schnell bereitgestellt und freigegeben werden können“ [MG11].

von „Cloud Computing“ wurden Technologien aus dem Bereich „Big Data“¹⁹ häufig in den betrachteten Anwendungsfällen eingesetzt. Die geringsten Abhängigkeiten zu neuen Technologien zeigen sich in den Gestaltungsprinzipien Mitarbeiterorientierung und Führung und dem kontinuierlichen Verbesserungsprozess [DRK17]. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die Anzahl der eingeordneten Anwendungsfälle nicht die generelle Zweckmäßigkeit der Technologien in Bezug auf die Gestaltungsprinzipien widerspiegelt.

Tabelle 2.4: Abhängigkeiten zwischen den Prinzipien der schlanken Produktion und Industrie 4.0-Technologien, eigene Darstellung in Anlehnung an [DRK17]

Industrie 4.0-Technologien	Prinzipien der schlanken Produktion									
	Big Data	RFID / Identifikation	Cloud Computing	Augmented & Virtual Reality	Automated Guided Vehicle	Smart Glasses	Consumer Electronics	Sensoren/Aktoren		Σ
Standardisierung	57	27	64	11	1	0	17	35		212
Null-Fehler-Prinzip	37	22	33	16	2	7	12	25		154
Visuelles Management	31	20	51	31	1	13	31	19		197
Kontinuierlicher Verbesserungsprozess	43	15	39	5	1	0	12	35		150
Mitarbeiterorientierung und Führung	22	13	38	15	2	12	24	14		140
Fließprinzip	49	39	50	12	9	1	15	27		202
Pull-Prinzip	37	53	68	18	12	3	16	28		235
Vermeidung von Verschwendung	65	43	84	15	10	3	25	50		295
Σ	341	232	427	123	38	39	152	233		

ROSIN ET AL. haben den Zusammenhang der Prinzipien der schlanken Produktion mit den Technologien des Industrie 4.0-Ansatzes literaturbasiert verglichen [Ro20]. Allerdings wird hier eine andere Einteilung der Lean-Prinzipien sowie der Technologien gewählt, weshalb die Studie nicht direkt mit anderen Studien vergleichbar ist. Dabei zeigt sich, dass das Fließ-Prinzip und das visuelle Management am häufigsten durch neue Technologien adressiert werden. Zu den am häufigsten verwendeten Technologien in Verbindung mit der schlanken Produktion gehören das Internet of Things²⁰ sowie Simulation: Bspw. wird häufig das Internet of Things genutzt, um Daten aus der Produktion zu erfassen und in geeigneter Weise über das Internet zur Verfügung zu stellen [SEW16].²¹ Auch in

¹⁹ Big Data bezieht sich auf einen Datensatz, der große und komplexe Daten sammelt, die mit herkömmlichen Anwendungen nur schwer zu verarbeiten sind [Ja09].

²⁰ Mit Internet of Things wird eine globale Infrastruktur für die Informationsgesellschaft beschrieben, die fortgeschrittene Dienste durch die Vernetzung (physischer und virtueller) Dinge auf der Grundlage bestehender und sich weiterentwickelnder interoperabler Informations- und Kommunikationstechnologien ermöglicht [WF15].

²¹ Siehe auch [MXZ18], [Mü18], [SEW16], [WHT17], [Yu17].

der Studie von ROSIN ET AL. zeigt sich, dass das Prinzip Mitarbeiterorientierung und Führung bisher kaum durch neue Technologien adressiert wird [Ro20].

CIANO ET AL. haben in acht Unternehmen jeweils mehrere Führungskräfte nach der Einführung und der Beziehung der schlanken Produktion und Industrie 4.0 befragt. Die untersuchten Unternehmen verfolgen beide Ansätze und sind unterschiedlichen Branchen zuzuordnen. In der Studie konnte gezeigt werden, dass sich beide Ansätze gegenseitig beeinflussen: Einerseits bildet ein gewisser Reifegrad bezüglich der schlanken Produktion eine Grundlage zur Einführung von Industrie 4.0-Technologien: Bspw. unterstützten standardisierte Prozesse bei der Datenaufnahme in Echtzeit. Andererseits stellen die Industrie 4.0-Technologien neue Möglichkeiten bereit, die Prinzipien der schlanken Produktion umzusetzen. Als Beispiel dient die Anwendung von genetischen Algorithmen aus dem Bereich künstliche Intelligenz zur Umsetzung einer geglätteten Produktion (auch „Heijunka“ genannt). Das Ergebnis zeigt detailliert eine Zuordnung der grundlegenden Prinzipien der schlanken Produktion zu den Technologien sowie die neuen Möglichkeiten dieser Technologien für die Prinzipien. Zu Details wird auf die genannte Veröffentlichung verwiesen. [Ci21]

Abschließend lässt sich feststellen, dass sich die Prinzipien und Methoden der schlanken Produktion um den Einsatz neuer Technologien kombinieren und ergänzen lassen, um die bisherigen Schwächen beider Ansätze auszugleichen [VBH17], [En18]. Die Gestaltungsprinzipien der schlanken Produktion werden vor allem durch neue digitale Technologien ergänzt. Die vorgestellten Ansätze können in realistischen Lern- und Forschungsumgebungen, wie in Lernfabriken, untersucht und vermittelt werden. In wissenschaftlichen Veröffentlichungen werden für die Kombination dieser Ansätze verschiedene Begriffe genutzt, wie z. B. „Lean 4.0“, „Smart Lean“ oder „Lean Automation“ [Ma18]. Da sich die eingesetzten Methoden der schlanken Produktion seit dem Erscheinen der MIT-Studie fortlaufend durch neue Technologien verbessert haben und die Gestaltungsprinzipien der schlanken Produktion im Hinblick auf neue Technologien dennoch die gleichen sind, wird in dieser Forschungsarbeit auf die Einführung eines neuen Begriffs verzichtet. Stattdessen wird weiterhin der Begriff „schlanke Produktion“ genutzt, der jedoch im Kontext neuer Technologien steht.

2.3 Lernfabriken zur Kompetenzentwicklung

In diesem Abschnitt wird der Stand der Forschung zum Forschungsgebiet Lernfabriken erläutert. Dazu werden zunächst Grundlagen zur Kompetenzentwicklung (Abschnitt 2.3.1) aufgezeigt, das Lernfabrikkonzept beschrieben (Abschnitt 2.3.2) sowie bisherige Ansätze zur Gestaltung von Lernfabriken gegenübergestellt und bewertet (Abschnitt 2.3.3).

2.3.1 Kompetenzentwicklung in der Produktion

Um aktuelle und zukünftige Herausforderungen in produzierenden Unternehmen begegnen zu können, sind kompetente Beschäftigte notwendig [AR11]. Im Rahmen der schlanken Produktion geht die Kompetenzentwicklung der Beschäftigten im Zusammenhang mit der reaktiven Problemlösung und der proaktiven Verbesserung des aktuellen Ist-Zustands der Produktion einher [Li12].

Zunächst findet eine Unterscheidung zwischen den Begriffen Wissen, Qualifikation und Kompetenz statt, zu denen unterschiedliche Modelle existieren [Te20]. Nach der europäischen Kommission wird **Wissen** als die „Kombination von Daten und Information, unter Einbeziehung von Expertenmeinungen, Fähigkeiten und Erfahrung, mit dem Ergebnis einer verbesserten Entscheidungsfindung“ verstanden [Al04]. Diese Definition, die sich vor allem auf Informations-, Fach- und Sachwissen bezieht, stellt allerdings lediglich Wissen im engeren Sinne dar [ES13]. Wissen im weiteren Sinne umfasst darüber hinaus motivatorisches Wissen (durch Normen und Werte) und prozedurales Wissen (durch eigene Handlungen), welche durch subjektive Erfahrungen verknüpft werden. [Fr98], [ES13]

Der Begriff **Qualifikation** umschließt das Wissen im engeren Sinne sowie Fähigkeiten und Fertigkeiten zur anforderungsorientierten Ausübung beruflicher Tätigkeiten [ER07]. Somit können Qualifikationen im Rahmen von Zertifizierungsprozeduren eindeutig überprüft werden [ALR20]. Fähigkeiten umfassen physische und psychische Handlungsprozesse als notwendige Voraussetzung menschlichen Verhaltens [Ha05]. Darauf aufbauend bezeichnen Fertigkeiten automatisierte Fähigkeiten im beruflichen Anforderungsbereich [Ju10], [ES13]. Als Beispiel einer Fertigkeit kann die Ausführung sich wiederholender Montageprozesse genannt werden. Wissen und Qualifikation sind Voraussetzungen für Kompetenzen, jedoch von diesen abzugrenzen [HE09]. In Abbildung 2.9 wird diese Abgrenzung veranschaulicht.

Nach ERPENBECK UND ROSENSTIEL stellen **Kompetenzen** erlernbare Dispositionen zum kreativen und selbstorganisierten Handeln in offenen, unsicheren, komplexen und dynamischen Situationen dar [ER07]. Diese Definition fokussiert die eigenständige und zielgerichtete Lösung zuvor unbekannter Herausforderungen in neuartigen Situationen und Umgebungen, wie sie in der Produktion vorzufinden sind²². Auch in Situationen, in denen nur unvollkommenes oder gar kein Wissen vorhanden ist, ermöglichen Kompetenzen lösungsorientiertes Handeln durch Regeln, Werte und Normen [ER07], [ALR20]. Zur Strukturierung verschiedener Kompetenzen, die in der Praxis benötigt werden, hat sich die dargestellte Strukturierung in vier Klassen durchgesetzt: Aktivitäts- und Handlungskompetenzen, personale Kompetenzen, soziale kommunikative Kompetenzen sowie Fach- und

²² Aus diesem Grund wird diese Definition häufig im Kontext von Lernfabriken verwendet.

Methodenkompetenzen [HE09]. Beispielhafte Inhalte dieser Kompetenzklassen finden sich in Abbildung 2.9²³.

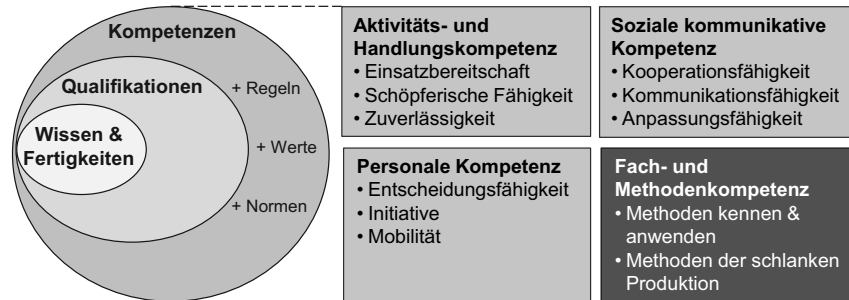


Abbildung 2.9: Abgrenzung und Einteilung von Kompetenzen, eigene Darstellung in Anlehnung an [ER07]

Bei der Entwicklung von Kompetenzen in der Produktion wird zwischen impliziten und expliziten **Lernprozessen** unterschieden. Bei impliziten Lernprozessen (auch „Lernen in der Arbeit“ genannt) findet die Kompetenzentwicklung während der Arbeitsausführung statt, wobei der Arbeits- und Lernort identisch sind sowie die Arbeitsaufgabe deckungsgleich mit dem Lerninhalt ist [SSJ98]. Dies ist bei expliziten Lernprozessen (auch „arbeitsbezogenes Lernen“ genannt) nicht der Fall, bei denen jedoch die Arbeitsinhalte weiterhin die zentralen Bezugspunkte darstellen [DHN96] [De93]. Dabei werden drei Formen des arbeitsbezogenen Lernens in Abhängigkeit ihres Ortes unterschieden: arbeitsgebundenes, arbeitsverbundenes und arbeitsbasiertes Lernen [DHN96], [DS17]. Beim *arbeitsgebundenen Lernen* ist der Arbeitsort auch der Lernort (wie beim Lernen in der Arbeit), wobei der Lernprozess explizit und durch didaktische Interventionen abläuft, z. B. durch Anleitungen oder Vorführungen. Beim *arbeitsverbundenen Lernen* besteht zwischen dem Arbeits- und dem Lernort eine räumliche und organisatorische Verbindung, wie z. B. bei Lernstationen, die sich in der Nähe des Arbeitsplatzes befinden, oder Qualitätszirkeln. Beim *arbeitsbasierten Lernen* sind der Arbeits- und Lernort voneinander getrennt, wie z. B. in Aus- und Weiterbildungszentren oder Lernfabriken [DHN96], [SSJ98].

Im Folgenden werden zu diesem Abschnitt abschließend wichtige Aspekte zur **Förderung von Lernprozessen** genannt. Zur Entwicklung von Kompetenzen sind nach ERPENBECK UND SAUTER reale, offene und neuartige Lernsituationen notwendig, in denen Probleme kreativ gelöst werden können [ES13]. Lernumgebungen sollten das situierte Lernen vor allem durch authentische Bedingungen ermöglichen [JR99], [DJ13]. Demnach ist der Bezug zum beruflichen Alltag beim Lernen zu berücksichtigen, bspw. indem eine realistische Fabrikumgebung

²³ In der vorliegenden Forschungsarbeit werden dabei die Fach- und Methodenkompetenzen fokussiert, da diese in den Curricula von Lernfabriken oft als Lernziele formuliert werden [Ti18].

genutzt wird [Ti18]. Lernende sollten beim Lernprozess möglichst aktiv sein [JJS91], [Br19b]. Das zu erlernende Wissen ist also in der Fabrikumgebung durch entsprechende Handlungen der Lernenden anzuwenden. Dabei sollten sich die Phasen der Wissensvermittlung, welche die kognitiven Fähigkeiten der Lernenden anstoßen, mit Handlungsphasen abwechseln [Ae94]. Nach dem Ansatz des problembasierten Lernens sollten Lernende authentische Problemstellungen selbstorganisiert und in vollständigen Handlungen lösen [FK87], [BF99]. Die Fabrikumgebung ist demnach auf die verschiedenen Probleme aus dem Arbeitsalltag in der Produktion anzupassen. Auf die Motivation der Lernenden ist besonderen Wert zu legen, da diese die Voraussetzungen für die erwähnten Handlungen darstellt [De91], [RVB01]. Da Lernen grundsätzlich als sozialer Prozess zu verstehen ist [GCR96], sollten die Handlungen in Teams durchgeführt werden. Nicht zuletzt ist der zugrundeliegende Handlungsspielraum beim Lernen hinsichtlich des didaktischen Prinzips der Selbstregulierung und -steuerung angemessen zu berücksichtigen [FK87], [Ga97]. Die aufgeführten Aspekte lassen sich durch das Lernfabrikkonzept umsetzen, das im folgenden Abschnitt behandelt wird.

2.3.2 Konzept Lernfabrik

Zunächst wird eine **Definition** des Begriffs Lernfabrik kurz erörtert. Lernfabriken stellen Umgebungen zur Kompetenzentwicklung dar, in der betriebliche Prozesse in einer realistischen Fabrik abgebildet werden [Ab15b]. Laut der International Academy for Production Engineering (CIRP) und der International Association of Learning Factories (IALF) wird eine Lernfabrik im engeren Sinne durch die folgenden Gestaltungsdimensionen (GD) definiert [LR15]:

- GD 1 Ziele, die sich an den Bereichen Weiterbildung, Forschung und/oder Lehre orientieren,
- GD 2 Prozesse, die authentisch sind, mehrere Stationen und sowohl technische als auch organisatorische Aspekte umfassen,
- GD 3 eine veränderbare Umgebung, die einer realen Wertschöpfungskette entspricht und wandlungsfähig ist,
- GD 4 ein physisches Produkt, das hergestellt wird,
- GD 5 ein didaktisches Konzept, das formelles, informelles und nicht-formelles Lernen vor Ort durch die aktive Beteiligung und eigene Handlungen der Lernenden ermöglicht, und
- GD 6 ein definiertes Betreibermodell, welches den kontinuierlichen Betrieb einer Lernfabrik gewährleistet.²⁴ [Ti15c]

²⁴ Die Nummerierung der Gestaltungsdimensionen wurde für diese Forschungsarbeit angepasst und wird im Folgenden durchgängig verwendet.

Um verschiedene Formen und Typen von Lernfabriken zu unterscheiden, wird eine **Abgrenzung** von Lernfabriken im engeren Sinne zu Lernfabriken im weiteren Sinne vorgenommen. In Lernfabriken im engeren Sinne wird ein physisches Produkt in einer realen Lernumgebung hergestellt, wobei Lernprozesse vor Ort in der Lernfabrik stattfinden. Demgegenüber stehen Lernfabriken im weiteren Sinne, die eine virtuelle Lernumgebung nutzen, eine Dienstleistung abbilden und/oder der Lernprozess aus der Ferne (z. B. durch Videokonferenzen) stattfindet [Ab15b]. Werden sowohl eine virtuelle als auch eine physische Lernumgebung genutzt, handelt es sich um eine hybride Lernfabrik [Ri21d]. Abbildung 2.10 zeigt die verschiedenen Ausprägungen von Lernfabriken sowie die betrachtete Abgrenzung.

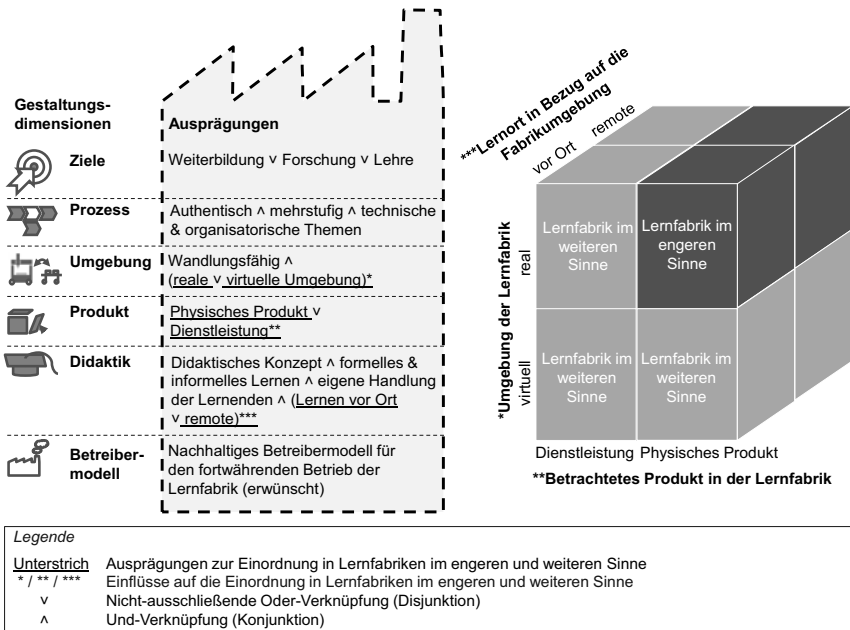


Abbildung 2.10: Ausprägungen und Abgrenzungen von Lernfabriken, eigene Darstellung in Anlehnung an [Ab15b]

Zur detaillierteren Beschreibung von Lernfabriken wurde von TISCH ET AL. ein **morphologisches Modell** entwickelt [Ti15c]. Zu jeder Gestaltungsdimension (GD) wurden – aufbauend auf der Definition von Lernfabriken – Gestaltungselemente (GE) zugeordnet, die verschiedene Attribute aufweisen können [Ti18]. Tabelle 2.5 zeigt eine Übersicht der Gestaltungsdimensionen und -elemente in der Morphologie für Lernfabriken. Das gesamte morphologische Modell findet sich in Anhang 1.1. Die wichtigsten Gestaltungsdimensionen der vorliegenden

Forschungsarbeit zur Konfiguration von Lernfabriken betreffen die Umgebung (GD 3), den Prozess (GD 2) und das Produkt (GD 4).

Tabelle 2.5: Übersicht zur Morphologie für Lernfabriken, entnommen aus [Ti18]

GD		GE	
1	Ziele	1.1 Primärziele	1.5 Anvisierte Industriezweige
		1.2 Sekundärzweck	1.6 Lerninhalt
		1.3 Zielgruppe	1.7 Rolle der LF in der Forschung
		1.4 Gruppenzusammenstellung	1.8 Forschungsfelder
2	Prozess	2.1 Produktlebenszyklus	2.7 Prozesstyp
		2.2 Fabriklebenszyklus	2.8 Fertigungsorganisation
		2.3 Auftragslebenszyklus	2.9 Automatisierungsgrad
		2.4 Technologielebenszyklus	2.10 Fertigungsverfahren
		2.5 Indirekte Funktionen	2.11 Fertigungstechnologie
		2.6 Materialfluss	
3	Umgebung	3.1 Virtualität der Lernumgebung	3.4 Wandlungsbefähiger
		3.2 Skalierung	3.5 Wandlungsdimensionen
		3.3 Arbeitssystemebenen	4.6 IT-Integration
4	Produkt	4.1 Materialität	4.6 Anzahl unterschiedlicher Produkte
		4.2 Erzeugungsform	4.7 Anzahl der Produktvarianten
		4.3 Produktherkunft	4.8 Anzahl der Produktkomponenten
		4.4 Marktfähigkeit	4.9 Weiterer Produkteinsatz
		4.5 Funktionalität	
5	Didaktik	5.1 Kompetenzklassen	5.7 Rolle des Trainers
		5.2 Lernzieldimensionen	5.8 Format
		5.3 Lernszenario	5.9 Standardisierungsgrad
		5.4 Art der Lernumgebung	5.10 Theoretische Grundlagen
		5.5 Kommunikationskanal	5.11 Bewertungsniveaus
		5.6 Maß an Autonomie der Lernenden	5.12 Messinstrumente
6	Betreibermodell	6.1 Betreibende Organisation	6.5 Laufende Finanzierung
		6.2 Trainerrolle	6.6 Kontinuität der Finanzierung
		6.3 Entwicklungsprozess	6.7 Geschäftsmodell für Trainings
		6.4 Initialfinanzierung	

Der **Lebenszyklus einer Lernfabrik** unterteilt sich in sechs verschiedene Phasen: Planung, Entwicklung, Aufbau, Vertrieb/Beratung/Verkauf, Nutzung und Umgestaltung (s. Abbildung 2.11) [Ti18].²⁵ Bei der Lernfabrikplanung finden zunächst Untersuchungen zum Markt und zu den Zielgruppen in Unternehmen

²⁵ In Anlehnung an die [Ve93] mit Bezug auf die [Ve02].

Die vorliegende Forschungsarbeit adressiert vor allem die Phase Lernfabrikentwicklung.

statt. Darauf aufbauend werden übergeordnete Kompetenzen hergeleitet sowie erste Lernkonzepte erstellt. Die Lernfabrikentwicklung beschäftigt sich mit der Auswahl von Produkten und Fabrikelementen – also der Konfiguration der Lernfabrik –, mit der Erstellung eines Layouts sowie mit der Entwicklung von Schulungen anhand der konkreten Lerninhalte. Beim Lernfabrikaufbau findet der Bau der Fabrikhalle statt, die ausgewählten Fabrikelemente werden beschafft und das Lernfabrikkonzept generell umgesetzt. In der nächsten Phase werden der Vertrieb, die Beratung und der Verkauf von Lernfabriken an Unternehmen und Universitäten konkretisiert, sofern dies im Betreibermodell (GD 6) vorgesehen ist. Bei der Lernfabriknutzung finden die entwickelten Schulungen (bezüglich der Primärziele Weiterbildung und Lehre) und Forschungsprojekte (bezüglich des Primärziels Forschung) statt. Dabei sollte auf die kontinuierliche Umgestaltung der Lernfabrik durch neue Themen geachtet werden. Zur systematischen Weiterentwicklung von Lernfabriken wurde von ENKE ein Reifegradmodell entwickelt [Ti18], [En20b].



Abbildung 2.11: Lebenszyklus einer Lernfabrik, entnommen aus [TM17]

Im Folgenden wird auf die **Potenziale und Einschränkungen** des Lernfabrikkonzepts eingegangen. In Bezug auf die Primärziele Weiterbildung und Lehre erfüllen Lernfabriken die in Abschnitt 2.3.1 genannten förderlichen Aspekte zu Lernprozessen, wie z. B. dem aktiven Lernen oder der Realitätsnähe der Lernumgebung [BE91], [JJS91], [LW91], [Br19b]. Tabelle 2.6 fasst die Erfolgsfaktoren zur Kompetenzentwicklung zusammen und zeigt deren Adressierung in Lernfabriken. Lernprozesse in industriellen Fabriken eignen durch deren hohe Komplexität nicht als ideale Lernumgebung. Kontrollierte und sichere Experimente, die zur Kompetenzentwicklung notwendig sind, sind durch die betrieblichen Einschränkungen häufig nicht möglich. Demgegenüber bieten Lernfabriken eine sichere und realitätsnahe Lernumgebung, in der experimentelle Handlungen möglich sind [Ab15b].

Tabelle 2.6: Adressierung der Erfolgsfaktoren zur Kompetenzentwicklung in Lernfabriken [TM17]

Erfolgsfaktoren zur Kompetenzentwicklung	Adressierung in Lernfabriken
Kontextualisierung und situierter Kontext [LW91], [Re99]	Realistisches Modell einer Fabrik
Aktives Lernen [BE91], [JJS91]	Anwendung des erlernten Wissens in Lernfabriken
Problem-basiertes Lernen [BF99]	Lösung praxisnaher Probleme in Lernfabriken
Motivation der Lernenden [De91]	Motivation durch Realitätsnähe und eigenen Handlungen
Kollektivierung [GCR96]	Selbstorganisierter Lernprozess in Gruppen
Integration von Denken und Handeln [Ae94]	Wechsel von Theorievermittlung und praktischen Übungen
Selbstregulierung [Sc90] und Selbstausrichtung [Ga97]	Kontrolle der Lernprozesse durch die Lernenden

Die Durchführbarkeit von Experimenten bietet auch Potenziale bezüglich des Primärziels Forschung: In Lernfabriken – als physikalisches Modell der Realität – kann der Einfluss neuer Methoden und Technologien in der Produktion realitätsnah gemessen und validiert werden²⁶. Aus dem betrieblichen Alltag bestehende Probleme werden in Lernfabriken abstrahiert und simuliert (s. Abbildung 2.12); die entwickelten Lösungen können im Anschluss wieder auf die reale Fabrik übertragen und verifiziert werden, wodurch neues Wissen entsteht [SMA14].

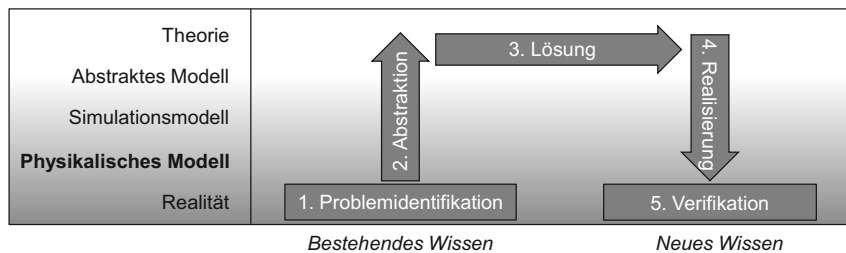


Abbildung 2.12: Lernfabriken als Basis zur Forschung, eigene Darstellung in Anlehnung an [SMA14]

Neben der Forschung in Lernfabriken wird auch am Lernfabrikkonzept selbst geforscht, um dieses weiterzuentwickeln [Ti15c]. Bei der Weiterentwicklung von Lernfabriken sind vor allem auch deren Einschränkungen zu beachten [TM17]:

- **Ressourcen:** Zur Gestaltung, den Aufbau und den Betrieb von Lernfabriken werden Ressourcen benötigt. Geeignetes Personal ist zur Organisation, Schulung und Instandhaltung notwendig, da die anfallenden laufenden Kosten durch entsprechende Erlöse abzudecken sind [AMT19]. Projekte zur Lernfa-

²⁶ Beispiele finden sich in [As15], [Ab16] und [EI18].

brikgestaltung dauern meist mehrere Monate bis Jahre. Dazu sind auch finanzielle Ressourcen zur Beschaffung der notwendigen Fabrikelemente und dem Bau einer eventuell benötigten Fabrikhalle erforderlich. Zu diesem Bau ist außerdem genehmigte Baufläche nötig.

- *Abbildungsmöglichkeiten:* Auch die Möglichkeiten zur Abbildung realer Produktionssysteme in Lernfabriken sind beschränkt, da nur eine begrenzte Anzahl an Produkten, Prozessen und Fabrikelementen modelliert werden kann. Meist fokussieren sich Lernfabriken auf ausgewählte Schulungs- und Forschungsinhalte [AMT19]. Diese Einschränkung ist mit der begrenzten Verfügbarkeit der Ressourcen verbunden. Außerdem hängen die Abbildungsmöglichkeiten von der Wandlungsfähigkeit der Lernfabrik ab [Wi07b].
- *Skalierbarkeit:* Im Vergleich zu anderen Lehr-Lern-Formaten ist die Skalierbarkeit in Lernfabriken limitiert. Während in Lernfabrik-Trainings i. d. R. 10-15 Personen gleichzeitig geschult werden, existieren beim Frontalunterricht vergleichsweise weniger Beschränkungen.
- *Mobilität:* Außerdem ist die Mobilität beschränkt, da Lernfabriken i. d. R. standortgebunden sind.
- *Effektivität:* Die Effektivität von Lernfabriken ist eingeschränkt, wenn die Primärziele (Weiterbildung, Lehre und Forschung) bei der Gestaltung vernachlässigt werden. [TM17]

Zu den genannten Einschränkungen des Lernfabrikkonzepts wurden von TISCH UND METTERNICH die folgenden Ansätze zur Erweiterung und Verbesserung des Lernfabrikkonzepts genannt [TM17]:

- Um die Abbildungsfähigkeit von Lernfabriken zu ergänzen, können digitale und virtuelle Lernfabriken zur Erweiterung physischer Lernfabriken gestaltet werden. Insbesondere der Einsatz hybrider Lernfabriken verbindet dazu die Vorteile mit physischen Lernfabriken [Ha14], [Ri20b], [Ri21d].
- Durch die Bildung von Lernfabrik-Netzwerken können die Einschränkungen einzelner Lernfabriken überwunden werden. Im Rahmen der International Association of Learning Factories (IALF) kooperieren bspw. drei Institute miteinander, um einen gemeinsamen Kurs für Studierende in drei Lernfabriken anzubieten [We16], [En20a].
- Zur theoretischen Wissensvermittlung können ergänzend E-Learning- und Blended-Learning-Ansätze integriert werden [La16].
- Die räumliche Flexibilität kann außerdem durch die Integration von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) verbessert werden. Erste Ansätze dazu finden sich im „Teaching Factory“-Konzept [RMC15], [MGC18], [Mo18].
- Der Lernprozess kann mit dem Einsatz innovativer Medienansätze, wie z. B. Tablets, unterstützt werden [TMK16].

- Systematische Ansätze zur Gestaltung von Lernfabriken sollten die oben genannten Einschränkungen und die hier aufgeführten Konzepterweiterungen beachten [Ti15b].
- Durch Methoden zur Messung des Lernerfolgs kann die Effektivität von Lernfabriken gemessen werden [HTM15], [Ti15a]. Dazu eignet sich bspw. das von GLASS entwickelte Verfahren zur Kompetenzmessung [GM20], [GI21].
- Mini- und Low-Cost-Lernfabriken können als (mobile) Konzepte zusätzlich angeboten werden [MRD14], [Kr19].

Diese Forschungsarbeit fokussiert sich auf die Verbesserung der systematischen Ansätze zur Gestaltung von Lernfabriken bezüglich der Einschränkungen des Lernfabrikkonzepts.

2.3.3 Gestaltungsansätze für Lernfabriken

Seit den Anfängen des Lernfabrikkonzepts wurden verschiedene Ansätze zur Gestaltung von Lernfabriken entwickelt und angewendet. Diese werden in diesem Abschnitt beschrieben.

Gestaltungsansatz nach ABELE ET AL.

Der nach der Studie von KREB ET AL. [KWM21] am häufigsten angewendete Ansatz zur Gestaltung von Lernfabriken basiert auf den Arbeiten von ABELE ET AL. [AMT19] und ist in der Dissertationsschrift von TISCH [Ti18] detailliert beschrieben. Im Ansatz werden unterschiedliche *Gestaltungsebenen* in Lernfabriken unterschieden [SE05], [Ti15b]: Die Makro-Ebene bezieht sich auf die gesamte Lernfabrik einschließlich ihrer sozio-technischen Infrastruktur und dem Curriculum einer Lernfabrik, die Meso-Ebene auf einzelne Lernmodule (innerhalb des Curriculums) und die Mikro-Ebene auf einzelne Lernsituationen (innerhalb eines Lernmoduls). Dabei umfasst ein Curriculum mehrere Lernmodule und ein Lernmodul mehrere Lernsituation [Ti15b]. Das Ebenen-Modell ist in Abbildung 2.13 dargestellt.

Die Gestaltung von Lernfabriken wird innerhalb jeder Gestaltungsebene in zwei *didaktische Transformationen* unterteilt, anlehnend an TENBERG [Te11]. In der ersten didaktischen Transformation werden die intendierten Kompetenzen, Lernziele und -inhalte einer Lernfabrik aus den technischen, organisatorischen und didaktischen Anforderungen abgeleitet. Die Anforderungen können zum einen aus der Lernfabrik-Morphologie (s. Anhang 1.1), zum anderen aus den organisationalen Rahmenbedingungen hergeleitet werden [Ti15c]. Eine mögliche Priorisierung der Anforderungen findet sich in ENKE ET AL. [ETM16]. Die zweite didaktische Transformation beschreibt, wie die abgeleiteten Lernziele adressiert und umgesetzt werden. Da es sich bei der Lernfabrikgestaltung um einen iterativen Prozess handelt, können Rückkopplungen zwischen den Gestaltungsebenen auftreten [Ti15b].

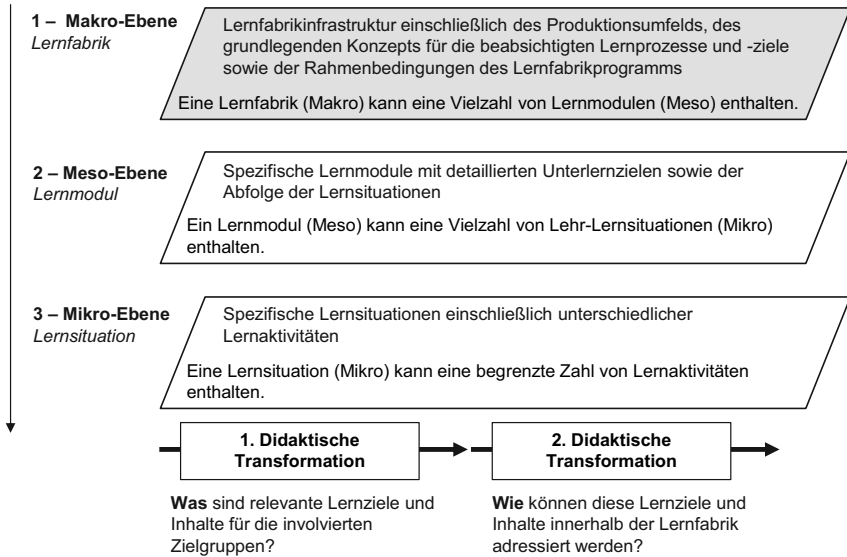


Abbildung 2.13: Ebenen-Modell zur Gestaltung von Lernfabriken [Ti15b]

Das Vorgehen zur kompetenzorientierten Gestaltung nach TISCH (angepasst in [Kr19]) ist in Abbildung 2.14 skizziert [Ti18]. Basierend auf den organisationalen Rahmenbedingungen werden die Unternehmensziele und die Zielgruppe der Lernfabrik beschrieben. Dieser Ansatz leitet sich aus der Gestaltung arbeitsbezogener Lernumgebungen ab [DP04], [RSM08]. Aus diesen Informationen werden intendierte Kompetenzen in Form von Kompetenzmatrizen abgeleitet [Ab15a]. In den Kompetenzmatrizen werden die intendierten Kompetenzen in Teilkompetenzen aufgeteilt, die sich wiederum in spezifische Wissens- und dazugehörigen Handlungselementen gliedern [EKM15]. Die grobe Beschreibung erster Trainingsszenarien unterstützt die nachfolgenden Schritte, in denen die sozio-technische und die didaktische Infrastruktur detailliert entworfen werden [Kr19]. Die sozio-technische Infrastruktur behandelt die betrachteten Prozesse, Produkte und Fabrikelemente einer Lernfabrik. Die didaktische Infrastruktur beinhaltet Lernprozesse, Lehrmethoden und Medien [Ti15b]. Die didaktische Infrastruktur leitet sich aus dem Berliner Modell nach HEIMANN ET AL. ab [HOS79]. Dabei wird deutlich, dass die Orientierung an intendierten Kompetenzen im Mittelpunkt stehen, was diesen Ansatz von zeitlich zuvor entwickelten Ansätzen unterscheidet, welche sich vor allem auf technische Aspekte fokussiert haben.

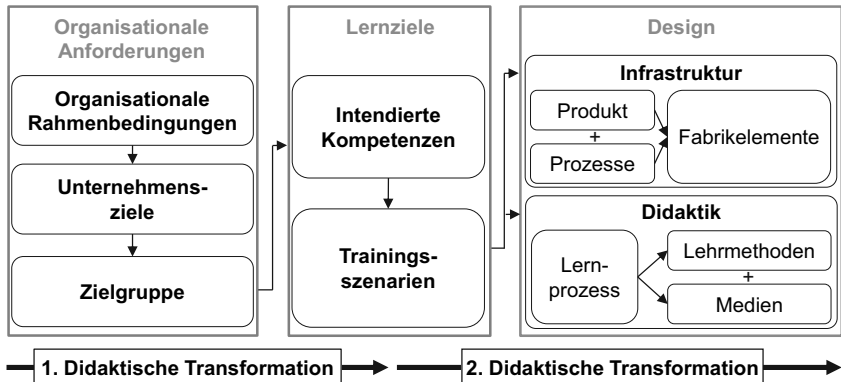


Abbildung 2.14: Vorgehen zur kompetenzorientierten Gestaltung von Lernfabriken [Ti18], [Kr19]

Das gezeigte Vorgehen unterteilt den Gestaltungsansatz der Makro-Ebene in sechs Schritte [Ti18]:

1. Zunächst werden die Ziele festgelegt und die notwendigen Grundlagen sowie Rahmenbedingungen und Zielgruppen ermittelt. Dabei werden aus den organisatorischen Rahmenbedingungen Anforderungen abgeleitet sowie ein Projektplan erstellt.
2. Anschließend werden die Lernziele festgelegt. Diese sollten konkret, überprüfbar, kompakt sowie tätigkeits- und kontextbezogen formuliert werden [Be02], [SHB13]. Als Hilfestellung dienen dazu Lernzieltaxonomien, durch welche die intendierten Kompetenzen in verschiedene Klassen eingeteilt werden [AKA01].
3. Danach findet die horizontale und vertikale Strukturplanung statt. Hierzu wird die Fabrik in unterschiedliche Ebenen (Netzwerk, Fabrik, Segment, System, Zelle, Station) vertikal sowie entlang unterschiedlicher Lebenszyklen (des Produkts, der Fabrik, der betrachteten Produktionsaufträge und der eingesetzten Technologien) horizontal unterteilt (s. Anhang 1.3). Durch die tabellarische Gegenüberstellung der Fabrikebenen mit den intendierten Kompetenzen können weitere Anforderungen abgeleitet werden.
4. In der Konzept- und Detailplanung werden das Produkt sowie die verschiedenen Fabrikebenen gestaltet. Zwar wird erwähnt, dass die Verwendung eines Optimierungsmodells möglich wäre, allerdings wird dies weder detailliert beschrieben noch angewendet. Aus den Anforderungen werden die Produkte und Fabrikelemente letztendlich intuitiv hergeleitet.
5. Durch eine Überprüfung wird ermittelt, ob die ausgearbeitete Lernfabrik die hergeleiteten Kompetenzen hinreichend adressiert. Falls nicht, wird auf vorherige Schritte zurückgesprungen.
6. Die intendierten Kompetenzen werden zu Lernmodulen zusammengefasst, wobei diese das Curriculum der Lernfabrik darstellen.

Auch zur Meso- und Mikro-Ebene finden sich detaillierte Beschreibungen, die jedoch nicht im Fokus dieser Forschungsarbeit stehen. Zu Details wird auf die Dissertationsschrift von TISCH verwiesen [Ti18]. Der Gestaltungsansatz von ABELE ET AL. gehört ist der meist zitierteste Ansatz. Insgesamt wurde der Ansatz weltweit am häufigsten zur Gestaltung von Lernfabriken genutzt und zudem mehrfach erweitert [KWM21].²⁷

Gestaltungsansatz nach KÜSTERS

KÜSTERS beschreibt einen weiteren Gestaltungsansatz für Lernfabriken, mit welchem die Lernfabrik Digital Capability Center Aachen konzipiert wurde, die einen Wertstrom der Textilproduktion abbildet [Kü18]. Im Fokus des Ansatzes stehen Lernfabriken für die digitale Transformation der Produktion. Dabei bezieht sich der Ansatz an vielen Stellen auf den eben vorgestellten von TISCH [Ti18] und ABELE ET AL. [AMT19]. Die Gestaltung von Lernfabriken findet in fünf Schritten statt [Kü18]:

1. Zuerst werden die Ziele und der Umfang definiert. Hier werden die betreibende Organisation und das Angebot der Lernfabrik spezifiziert sowie die Zielgruppe beschrieben. Das Ergebnis stellt eine Anforderungsliste basierend auf Anwendungsfällen dar.
2. Schulungsinhalte und das Curriculum der Lernfabrik werden abgeleitet, indem ein Unternehmensplanspiel entworfen wird.
3. Anschließend wird die Lernfabrikinfrastruktur geplant. Hier werden Wertströme in mehreren Zuständen festgelegt, Produkte und Prozesse ausgewählt sowie die notwendige IT-Infrastruktur bestimmt.
4. Im Anschluss werden der Standort und das Gebäude der Lernfabrik festgelegt.
5. Schließlich wird die Organisationsstruktur behandelt und die Wirtschaftlichkeit der Lernfabrik ermittelt.

Die Auswahl an Fabrikelementen wird zwar (im dritten Schritt) erwähnt, fokussiert sich jedoch auf die Gestaltung von Wertströmen. Zur Auswahl der technischen Infrastruktur wird ein morphologischer Kasten verwendet. Allerdings wird nicht beschrieben, wie die Alternativen im morphologischen Kasten gebildet und bewertet werden. Die Auswahl der bestmöglichen Alternative wird ebenfalls nicht diskutiert. Auch in diesem Ansatz werden die Fabrikelemente intuitiv ausgewählt, ohne diese zu bewerten. An dieser Stelle ist anzumerken, dass ein möglicher Einfluss des Gebäudes (im vierten Schritt) auf die Lernfabrik-Infrastruktur (im dritten Schritt) nicht beachtet wird. Weist das Gebäude nicht die geplanten Abmessungen auf, wird die technische Infrastruktur nicht angepasst. [Kü18]

²⁷ Die Modellerweiterungen finden sich in den folgenden Publikationen: [Ab16], [AFS17], [AKR19], [En20a], [GPP16], [Kr19], [Kü18], [La15], [LFZ20], [Mä19], [Me18b], [Og17], [Pe19], [SHR20], [SSK20], [SB19], [We20], [WHR19].

Der Gestaltungsansatz KÜSTERS' wurde für zwei Lernfabriken verwendet [Kü18]. Außerdem wird in NIEMEYER ET AL. erwähnt, dass der Gestaltungsansatz verwendet wurde [Ni20].

Gestaltungsansatz nach WAGNER ET AL.

WAGNER ET AL. beschreiben einen Ansatz zur Gestaltung von Produkten in Lernfabriken, die sich thematisch auf die Wandlungsfähigkeit fokussieren. Im Ansatz werden fünf Schritte zur Gestaltung einer Lernfabrik vorgestellt [Wa15]:

1. Zu Beginn werden die Ziele der Lernfabrik und das technische System untersucht.
2. Danach werden Anforderungen an das künftige technische System gestellt.
3. Zu diesen Anforderungen werden realisierbare Produkt ermittelt und mithilfe einer Nutzwertanalyse bewertet.
4. Nach der Bewertung wird das Produkt ausgewählt und das Layout entworfen.
5. Im fünften Schritt werden die technischen Prozesse vorbereitet.

Der Gestaltungsansatz wurde zur Verbesserung einer bestehenden Lernfabrik, der iFactory, genutzt [Wa15]. Außerdem wurde der Ansatz in Kombination mit dem Ansatz von TISCH und ABELE ET AL. von STOJKIĆ UND BOŠNJAK zur Gestaltung der Lernfabrik an der Universität Mostar eingesetzt [SB19]. ELMARAGHY ET AL. nutzen und erweitern diesen Ansatz zur Integration neuer Produktfamilien in Lernfabriken mit dem Fokus Wandlungsfähigkeit [E17].

Während der Gestaltungsansatz von WAGNER ET AL. die Auswahl von Produkten fokussiert und kurz auf die Layoutplanung einer Lernfabrik eingeht, findet weder eine Betrachtung möglicher Alternativen für Fabrikbereiche noch eine Bewertung und Auswahl von Fabrikelementen statt. Außerdem werden die Primärziele Weiterbildung und Lehre nicht explizit beachtet, da die Gestaltung des Produkts und des technischen Bereichs nicht von Lernzielen oder Kompetenzen ausgehen. Die einzelnen Fabrikelemente werden im Gegensatz zum Produkt ebenfalls intuitiv ausgewählt. [Wa15]

In Abbildung 2.15 ist die Struktur der drei vorgestellten Gestaltungsansätze von ABELE ET AL./TISCH, KÜSTERS und WAGNER dargestellt. Die verbindenden Linien deuten ähnliche Inhalte innerhalb der Gestaltungsansätze an. Dabei wird die Ähnlichkeit zwischen den Ansätzen von KÜSTERS und ABELE ET AL./TISCH deutlich, die sich vom Ansatz von WAGNER in der Aufteilung der Schritte unterscheiden.

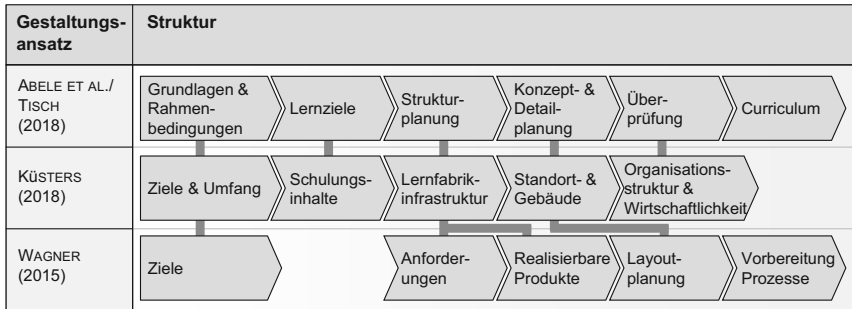


Abbildung 2.15: Struktur der Gestaltungsansätze, eigene Darstellung in Anlehnung an [Wa15], [Kü18], [Ti18]

Weitere Gestaltungsansätze

Im Folgenden werden die wichtigsten Merkmale weiterer Gestaltungsansätze zusammengefasst. Dabei ist jedoch zu erwähnen, dass diese – im Gegensatz zu den drei bisher vorgestellten Ansätzen – lediglich jeweils für eine Lernfabrik genutzt wurden.

- REINER beschreibt den ersten Ansatz mit grundlegenden didaktischen Prinzipien. Hier finden sich vor allem Prinzipien (wie z. B. Realitätsnähe), die für die nachfolgenden Arbeiten wegweisend sind. Allerdings findet sich kein strukturiertes Vorgehen. [Re09]
- RIFFELMACHER hebt die Bedeutung der Wandlungsfähigkeit für Lernfabriken hervor und stellt ein erstes Vorgehen zur Planung variantenreicher Montagesysteme in Lernfabriken vor. In der Arbeit finden sich bereits erste Kriterien zur Bewertung von potenziellen Produkten in Lernfabriken, wie z. B. die Adaptierbarkeit für zukünftige Technologien. [Ri13]
- DOCH ET AL. zeigen ein Vorgehen in drei Schritten (Bedarfsanalyse, Konzeption sowie Ausgestaltung und Umsetzung) zur Entwicklung von Lernmodulen in Lernfabriken und gestalten eine Lernfabrik für die Pharmaindustrie, in der die Tablettenherstellung abgebildet ist. Die Gestaltung der sozio-technischen Infrastruktur wird jedoch nicht behandelt. [Do15a]
- FLORIN zeigt ein Gestaltungsmodell für Lernfabriken, das in acht Phasen unterteilt ist. Die ersten sechs Phasen beschäftigen sich mit der Analyse des Ist-Zustands und der zielgruppenorientierten Lernmodul-Gestaltung. Bei der Gestaltung der Lernumgebung wird zwar zur Gestaltung des Produkts auf WAGNER ET AL. verwiesen, jedoch finden sich keine weiteren Beschreibungen zur Auswahl und Gestaltung von Prozessen und Fabrikelementen. [Pl16]
- BAENA ET AL. beschreiben in ihrer Publikation ein Vorgehen in vier Schritten (Produkt, Wertschöpfungskette, Einsatz von IKT-Technologien, Integration des Industrie 4.0-Ansatzes). Darin wird der Einsatz neuer Technologien betont. [Ba17]

- KARRE ET AL. stellen einen Gestaltungsansatz in fünf Schritten dar, um eine bestehende Lernfabrik um den Industrie 4.0-Ansatz zu erweitern. [Ka17]
- SADAJ ET AL. zeigen einen Ansatz in drei Phasen, mit dem erstmals beschrieben wird, wie eine Lernfabrik i. w. S. für Dienstleistungen gestaltet werden kann. [SHR20]
- TSCHANDL ET AL. zeigen ein Vorgehen in vier Schritten (Analyse, Konzept, Validierung, Design), das den Fokus auf die digitale Transformation sowie Industrie 4.0 bei der Lernfabrikgestaltung legt. [TMS20]

Bewertung der Gestaltungsansätze

Eine Übersicht der Gestaltungsansätze findet sich in Tabelle 2.7, in der der Erfüllungsgrad im Hinblick auf die Zielsetzung dieser Arbeit aufgezeigt ist. Die Gestaltungsansätze sind nach Jahr sortiert. Einige Ansätze fokussieren sich bereits auf Lernfabriken für die schlanke Produktion, jedoch werden auch weitere Themen betrachtet, wie z. B. die Wandlungsfähigkeit oder das Industrie 4.0-Konzept. Zu erkennen ist außerdem, dass kein Gestaltungsansatz für Lernfabriken die technische Konfiguration fokussiert. Die meisten Ansätze erwähnen diesen Punkt, beschreiben jedoch keine dazugehörige Methode oder deuten diese nur an. Ein strukturiertes Vorgehen zur technischen Konfiguration einer Lernfabrik mit einer detaillierten Beschreibung fehlt. In einigen Ansätzen finden sich bereits Methoden zur Auswahl des herzustellenden Produkts bzw. der abgebildeten Dienstleistung. Auf welche Weise benötigte Fabrikbereiche ermittelt werden, wird nicht dargestellt und nur in weniger Ansätzen – ohne die Angabe einer Methode – erwähnt. Daher erfolgen bei allen gezeigten Ansätzen die Auswahl der Fabrikelemente intuitiv. In keinem Ansatz wird gezeigt, wie Alternativen für Fabrikbereiche ermittelt werden können. Auch die entsprechende Bewertung dieser Alternativen wird bisher nicht beschrieben. Dadurch existiert bisher auch kein Ansatz, mit dem die bestmögliche Auswahl an Fabrikelementen bzw. die bestmögliche Konfiguration ermittelt werden kann.

Tabelle 2.7: Übersicht über den Erfüllungsgrad bisheriger Gestaltungsansätze von Lernfabriken im Hinblick auf die Zielsetzung dieser Arbeit, eigene Darstellung

Ansätze zur Gestaltung von Lernfabriken	Kriterien								
	Fokus auf Lernfabriken für die schlanke Produktion	Fokus auf die technische Konfiguration einer Lernfabrik	Strukturiertes Vorgehen zur technischen Konfiguration	Methode zur Auswahl von Produkten bzw. Dienstleistungen	Systematische Bestimmung möglicher Fabrikbereiche	Methode zur Auswahl von Fabrikelementen	Ermittlung möglicher Alternativen für Fabrikbereiche	Bewertung möglicher Alternativen	Bestmögliche Auswahl von Fabrikelementen
REINER (2009)	●	○	○	●	○	○	○	○	○
RIFFELMACHER (2013)	○	○	○	●	○	○	○	○	○
WAGNER ET AL. (2015)	○	○	○	●	○	○	○	○	○
DOCH ET AL. (2015)	●	○	○	○	○	○	○	○	○
PLORIN (2016)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
BAENA ET AL. (2017)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
KARRE ET AL. (2017)	●	○	○	○	○	○	○	○	○
KÜSTERS (2018)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
TISCH (2018) / ABELE ET AL. (2019)	●	○	○	○	○	○	○	○	○
SADAJ ET AL. (2020)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
TSCHANDL ET AL. (2020)	○	○	○	○	○	○	○	○	○

2.4 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde der Stand der Forschung und Praxis zur Konfiguration von Lernfabriken für die schlanke Produktion aufgezeigt. Lernfabriken haben sich als bewährtes Konzept zur Kompetenzentwicklung in der Produktion etabliert. Durch das hohe Potenzial von Lernfabriken in Bezug auf Forschung, Weiterbildung und Lehre in der Produktion, beschäftigt sich die anwendungsnahe Forschung damit, auf welche Weise Lernfabriken zu gestalten sind.

Die Grundlagen zur Gestaltung von Lernfabriken stammen aus der klassischen Fabrikplanung. Hier wird gerade der Aspekt Wandlungsfähigkeit als über-

geordnetes Ziel – neben Qualität, Zeit und Kosten – betont. Zur Planung von Fabriken hat sich der Planungsprozess nach der VDI 5200 etabliert. In der Detailplanung (Phase 4) wird die Konfiguration einer Fabrik betrachtet, da hier u. a. die Fabrikelemente ausgewählt werden. Während es zur Layoutplanung verschiedene ganzheitliche Verfahren gibt, beschränken sich die bisherigen Ansätze zur Auswahl von Fabrikelementen jeweils auf nur einen Fabrikbereich und so werden übergeordnete finanzielle und bauliche Restriktionen nicht beachtet. Zur Planung industrieller Fabriken existiert noch kein ganzheitlicher Ansatz, der zur Konfiguration von Lernfabriken genutzt werden kann.

Die Grundprinzipien der schlanken Produktion sollten bei der Fabrikplanung beachtet werden. In dieser Forschungsarbeit stellt die schlanke Produktion außerdem die Grundlage für die intendierten Kompetenzen bzw. die betrachteten Lerninhalte der zu konfigurierenden Lernfabriken dar. In den letzten Jahren werden diese Prinzipien und Methoden unter der Betrachtung neuer digitaler Technologien aus dem Bereich Industrie 4.0 erweitert, wodurch neue Möglichkeiten zur Erkennung und Vermeidung von Verschwendung in der Produktion entstehen. In der zu entwickelnden Methodik sollten diese intendierten Kompetenzen beachtet werden.

Obwohl bisher eine Vielzahl an Gestaltungsansätzen für Lernfabriken veröffentlicht und angewendet wurde, kann gezeigt werden, dass bisher kein Gestaltungsansatz die technische Konfiguration von Lernfabriken fokussiert. Der relevanteste Gestaltungsansatz ist derjenige von ABELE ET AL./TISCH, da dieser am weitesten verbreitet ist. Die Entscheidung zur Auswahl von Fabrikelementen verläuft in den bisherigen Gestaltungsansätzen ausschließlich intuitiv. Durch den Ressourcenbedarf beim Aufbau und Betrieb von Lernfabriken ist dies als kritisch zu werten. Gestaltungsansätze zur Auswahl von Fabrikelementen in industriellen Fabriken eignen sich nur bedingt, da bisher kein ganzheitlicher Ansatz über mehrere Fabrikbereiche hinweg vorhanden ist. Zudem besitzen industrielle Fabriken einen anderen Einsatzzweck mit dem Fokus auf Produktivität und geringe Stückkosten. Es ist festzuhalten, dass noch keine wissenschaftlich fundierte Methodik zur Konfiguration von Lernfabriken für die schlanke Produktion existiert. Aus wissenschaftlicher und praktischer Sicht ist eine Weiterentwicklung der bestehenden Ansätze daher notwendig, um die bestmögliche Auswahl an Fabrikelementen in Lernfabriken zu ermitteln. Zur zukünftigen Forschung, Weiterbildung und Lehre adressiert diese Forschungsarbeit daher eine Forschungslücke von hoher Relevanz.

3 ZIELSETZUNG UND FORSCHUNGSMETHODIK

In diesem Kapitel wird aus dem Stand der Forschung und Praxis in Kapitel 2 und der daraus hergeleiteten Forschungslücke das Ziel dieser Forschungsarbeit aufgezeigt (Abschnitt 3.1). Zur Evaluation dieser Forschungsziele werden inhaltliche und formale Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik gestellt (Abschnitt 3.2). Zudem wird der Untersuchungsbereich abgegrenzt (Abschnitt 3.3) und darauf aufbauend die Forschungskonzeption beschrieben (Abschnitt 3.4).

3.1 Forschungsziele

Zur Konfiguration einer Lernfabrik gibt es nach dem aktuellen Stand keine Methodik, durch welche die bestmögliche Auswahl an Fabrikelementen möglich ist (s. Abschnitt 2.3.3). Bisherige quantitative Ansätze zur Konfiguration industrieller Fabriken fokussieren sich bei der Auswahl von Fabrikelementen lediglich auf einen Fabrikbereich – und nicht auf die gesamte Fabrik. So können übergeordnete Restriktionen, wie z. B. eine verfügbare Fabrikfläche oder ein Budget, nicht ausreichend betrachtet werden. In den bisherigen Ansätzen zur Gestaltung von Lernfabriken findet die Auswahl von Fabrikelementen auf intuitive Weise statt und ist somit als subjektiv und nicht reliabel zu bewerten. Für einen objektiven Ansatz eignet sich ein entsprechendes Optimierungsmodell mit einem dazugehörigen Vorgehen und geeigneter softwarebasierter Unterstützung. Durch die exakte Lösung eines Optimierungsmodells wird die bestmögliche Auswahl an Fabrikelementen projektspezifisch ermittelt. Zusammenfassend wird für diese Forschungsarbeit das folgende Ziel definiert:

Die Entwicklung einer Methodik zur Konfiguration von Lernfabriken für die schlanke Produktion

Dieses Forschungsziel wird in drei Unterziele aufgeteilt:

1. Zur bestmöglichen Auswahl an Fabrikelementen wird ein **Optimierungsmodell zur Konfiguration** von Lernfabriken hergeleitet und zu dessen Lösung werden entsprechende Algorithmen entwickelt (Kapitel 4).
2. Zur Anwendung der Methodik wird ein **Vorgehen** erarbeitet, das auf dem Optimierungsmodell basiert (Kapitel 5).
3. Da Optimierungsmodelle durch deren hohe Komplexität i. d. R. nicht manuell gelöst werden können, wird ein **softwarebasiertes Konfigurationssystem** konzipiert und entwickelt, welches das erarbeitete Vorgehen unterstützt (Kapitel 6).

Die primäre Zielgruppe der Konfiguration von Lernfabriken besteht aus Lernfabrikentwicklerinnen und -entwicklern. Zu diesen zählen vor allem Beschäftigte aus akademischen Einrichtungen sowie aus beratenden Unternehmen. Die

sekundäre Zielgruppe stellt sich aus zukünftig lernfabrikbetreibenden Organisationen zusammen, z. B. industriellen Unternehmen.

3.2 Anforderungen an die Forschungsmethodik

In diesem Abschnitt werden zum einen die inhaltlichen Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik zur Konfiguration von Lernfabriken für die schlanke Produktion beschrieben (Abschnitt 3.2.1). Zum anderen werden formale Anforderungen aus der Forschungspraxis ergänzt (Abschnitt 3.2.2). Eine Zusammenfassung der aufgestellten Anforderungen findet sich in Tabelle 3.1.

3.2.1 Inhaltliche Anforderungen

Die in dieser Forschungsarbeit zu entwickelnde Methodik sollte basierend auf den Forschungszielen (Abschnitt 3.1) die folgenden inhaltlichen Anforderungen erfüllen:

Optimalität: Das Ergebnis der Methodik soll eine bestmögliche Auswahl an Fabrikelementen beinhalten. Im Gegensatz zu den bisherigen Ansätzen (s. Abschnitt 2.3.3) soll die Entscheidungsfindung nicht intuitiv ablaufen. Hierzu ist ein quantitativer Ansatz notwendig, der die Realität hinreichend genau abbildet.

Zielorientierung: Die Methodik sollte zielorientiert sein und die Primärziele von Lernfabriken adressieren: Weiterbildung, Forschung und Lehre. Die Arbeit basiert daher auf abgeleiteten Lern- und Forschungszielen [Ab15b].

Individualität: Die bisher entwickelten Lernfabriken unterscheiden sich individuell in ihrer Gestaltung [AMT19]. Dies wird auch in der Morphologie für Lernfabriken deutlich, durch die eine Vielzahl an Lernfabrikkonzepten abgebildet werden kann [Ti15c]. Daher soll die Methodik auf eine breite Anzahl an individuellen Lernfabrikkonzepten übertragbar sein.

Strukturierter Ablauf: Der Ablauf der Methodik soll strukturiert, systematisch und nachvollziehbar sein. Die einzelnen Vorgehensschritte sind hinreichend genau für die praktische Anwendung zu beschreiben.

Geeignete Unterstützung: Die Anwendbarkeit der Methodik soll durch geeignete Hilfsmittel unterstützt werden. Zur Lösung von Optimierungsproblemen eignet sich insbesondere ein softwarebasiertes System. Dieses sollte je nach Anwendungsfall modifizierbar sein und sich am strukturierten Ablauf orientieren. Die entwickelten Algorithmen zur Lösung des Optimierungsmodells sind durch eine geeignete Programmiersprache umzusetzen.

3.2.2 Formale Anforderungen

Zusätzlich zu den inhaltlichen Anforderungen werden formale Anforderungen an die zu entwickelnde Methode gestellt:

Objektivität: Die Auswahl an Fabrikelementen soll nicht von subjektiven Entscheidungen der anwendenden Personen abhängen. Unterschiedliche Personen kommen bei der Anwendung zum gleichen Ergebnis. Deshalb ist die Datenerhebung und -auswertung zu standardisieren [AI09].

Reliabilität: Führt die Anwendung der Methodik – gegeben gleicher Ausgangslage – bei mehrmaliger Anwendung zum gleichen Ergebnis, liegt Reliabilität vor [GRW08]. Die Auswahl an Fabrikelementen sollte daher wiederholt die gleiche sein, sofern sich die projektspezifischen Rahmenbedingungen nicht verändern.

Validität: Unter der Validität ist die Genauigkeit zu verstehen, mit der das geforderte Ergebnis erreicht wird. Die *interne Validität* (auch logische Validität genannt) betrachtet die Zusammenhänge zwischen den betrachteten Variablen der Methodik, welche theoretisch fundiert sein sollen. Die *Konstruktvalidität* gibt an, inwiefern das zugrundeliegende Konstrukt operationalisiert ist. Um dies zu erreichen, wird eine klare Argumentationskette basierend auf bestehenden Theorien gefordert. Das betrachtete Konstrukt der vorliegenden Forschungsarbeit ist die Konfiguration einer Lernfabrik. Darüber hinaus fordert die *externe Validität* die Generalisierbarkeit der Forschungsergebnisse [We15]. Die Methodik sollte also auf eine hinreichend große Grundgesamtheit an Lernfabriken übertragbar sein. Bezüglich des Forschungsziels sollte sichergestellt werden, dass die ermittelte Auswahl an Fabrikelementen tatsächlich die bestmögliche ist. Das Optimierungsmodell und das dazugehörige Vorgehen sollen theoretisch fundiert, die Anwendungsfälle repräsentativ sein.

Anpassungsfähigkeit: Lässt sich die Methodik adaptiv durch neue Informationen erweitern und verändern, ist die Anpassungsfähigkeit gegeben [Li70]. Im Fall von veränderten Rahmenbedingungen sollen die Eingangsgrößen für das Optimierungsmodell adaptiv veränderbar sein.

Robustheit: Die Ergebnisse der Methodik sollen sich gegenüber Unsicherheiten der Eingangsgrößen bei gleichen Rahmenbedingungen stabil verhalten [Sc01]. Daher sollte bei der Konfiguration die Möglichkeit bestehen, unsichere Eingangsgrößen zu untersuchen.

Interaktionsfähigkeit: Durch die Interaktionsfähigkeit können Eingangsgrößen auf einfache Weise verändert werden, um Ergebnisse zeitnah zu erhalten [Li70]. Dies wird vor allem durch die Nutzung von softwarebasierten Systemen ermöglicht.

Simplexität: Die Methodik sollte einen geeigneten Komplexitätsgrad aufweisen. Auf der einen Seite sollen wesentliche Elemente berücksichtigt werden, um die Realität detailliert genug abzubilden. Auf der anderen Seite soll keine zu hohe Komplexität mit unwesentlichen Elementen bzw. unwesentlichen Beziehungen zwischen diesen Elementen vorliegen [Li70].

Kontrollierbarkeit: Bei der Nutzung der Methodik sollen die Ergebnisse in Bezug auf die Eingangsgrößen nachvollziehbar und nachprüfbar sein.

Die aufgestellten inhaltlichen und formalen Anforderungen werden in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Anforderungen an die Methodik, eigene Darstellung

Inhaltliche Anforderungen	Formale Anforderungen	
Optimalität	Reliabilität	
Zielorientierung	Validität	Interne Validität
		Konstruktvalidität
		Externe Validität
Individualität	Anpassungsfähigkeit	
Strukturierter Ablauf	Robustheit	
	Interaktionsfähigkeit	
Geeignete Unterstützung	Simplizität	
	Kontrollierbarkeit	

3.3 Abgrenzung des Untersuchungsbereichs

Die folgenden Einschränkungen werden vorgenommen, um den Untersuchungsbereich für die zu entwickelnde Methodik abzugrenzen:

Hinsichtlich der Phase der Fabrikplanung: Die Methodik ist bei der Betrachtung des Fabrikplanungsvorgehens der VDI 5200 [Ve11] der Detailplanung einzuordnen (s. Abschnitt 2.1.3). Der Fokus liegt in der bestmöglichen Auswahl an Fabrikelementen für Lernfabriken. Hier wird bereits ein erstes Layout als vorläufiger Entwurf betrachtet, um die Zulässigkeit der Auswahl zu gewährleisten. Die Detaillierung des Layouts wird demgegenüber nicht fokussiert.²⁸

Hinsichtlich der Fertigungsverfahren: Der Fokus der Forschungsarbeit liegt in der spannenden Fertigung und Montage, da die meisten Lernfabriken auf diesen Produktionsprozessen aufbauen [AMT19]. Des Weiteren sollen jedoch in den Anwendungsfällen weitere Prozesse durch die Methodik berücksichtigt werden, um die externe Validität zu überprüfen.

Hinsichtlich der abzubildenden Lernziele: Der inhaltliche Fokus der Lernziele entspricht der schlanken Produktion mit den entsprechenden Gestaltungsprin-

²⁸ Zur Detaillierung des Fabriklayouts kann der Ansatz nach KREß ET AL. (2021) verwendet werden [Kr21a].

zipien (s. Abschnitt 2.2). Allerdings soll die Methodik so gestaltet werden, dass weitere Lern- und Forschungsziele beachtet werden können.

Hinsichtlich der Gestaltungsebene: Der Untersuchungsbereich beschränkt sich auf die technische Konfiguration von Lernfabriken auf der Makro-Ebene, d. h., dass sich die auszuarbeitende Methodik nicht mit der Gestaltung von Lernmodulen (Meso-Ebene) oder einzelnen Lehr-Lern-Situationen (Mikro-Ebene) beschäftigt (s. Abschnitt 2.3.3). [Ti15b]

Hinsichtlich der didaktischen Transformationen: Die Herleitung möglicher Lernziele bzw. die erste didaktische Transformation wird nicht betrachtet. Hierzu bietet der Gestaltungsansatz nach ABELE ET AL. bereits die notwendigen Grundlagen (s. Abschnitt 2.3.3) [Ti18], [AMT19]. Diese Forschungsarbeit fokussiert sich auf die Gestaltung der sozio-technischen Infrastruktur einer Lernfabrik in der zweiten didaktischen Transformation – insbesondere auf die darin enthaltenen Fabrikelemente (s. Abbildung 2.14).

3.4 Forschungskonzeption

Die Forschungskonzeption stellt das Fundament für neue Erkenntnisse dar und gibt einen Überblick zu den eingesetzten Methoden. Das Forschungsvorgehen dieser Arbeit baut auf dem Ansatz der Design Research Methodology (DRM) auf [BC09]. Dieser Ansatz fokussiert sich auf die Beforschung von Gestaltungsprozessen und eignet sich deshalb für die Entwicklung einer Methodik zur Konfiguration von Lernfabriken. Im DRM werden vier verschiedene Phasen im Forschungsvorgehen aufgeführt, die im Folgenden beschrieben und auf diese Forschungsarbeit übertragen werden.

In der ersten Phase des DRM werden die **Forschungsziele** auf Basis einer Sichtung der zugrundeliegenden Literatur festgelegt [BC09]. Das Forschungsziel dieser Arbeit umfasst die Entwicklung einer Methodik zur Konfiguration von Lernfabriken (s. Abschnitt 3.1)

In der zweiten Phase des DRM findet die **Untersuchung des Stands der Forschung und Praxis** in einer ersten deskriptiven Studie statt, um ein grundlegendes Verständnis aufzubauen und die Forschungslücke zu konkretisieren [BC09]. Hierzu werden die bisherigen Ansätze nach möglichen Potenzialen analysiert. Die bestehenden Ansätze zur Gestaltung von Lernfabriken fokussieren, wie bereits gezeigt, nicht deren technische Konfiguration. Außerdem findet die Auswahl von Fabrikelementen vorläufig intuitiv statt, wobei keine Optimalität gewährleistet wird. Auch in der klassischen Fabrikplanung besteht kein Ansatz, mit dem dies unter Beachtung von übergeordneten Restriktionen auf Fabrikebene, wie z. B. einem Budget oder den Fabrikabmessungen, möglich ist (s. Kapitel 2).

In der dritten Phase des DRM wird eine präskriptive Studie zur **Entwicklung der Methodik** durchgeführt, mit deren Hilfe die Gestaltung eines Konstrukts

verbessert werden soll [BC09]. Dieses Konstrukt stellt in dieser Arbeit die technische Konfiguration einer Lernfabrik dar. Aufbauend auf den drei Teilzielen dieser Forschungsarbeit (s. Abschnitt 3.1) ergibt sich die folgende Aufteilung dieser Phase:

- *Optimierungsmodell* (Kapitel 4): Zunächst wird ein mathematisches Optimierungsmodell zur Konfiguration aus den Charakteristika von Lernfabriken, insbesondere den Gestaltungsdimensionen (s. Abschnitt 2.3.2), und der Fabrikplanung hergeleitet. Durch dieses wird die bestmögliche Auswahl an Fabrikelementen ermöglicht. Bei einem Optimierungsmodell handelt es sich um das Abbild eines Konstrukts aus der Realität, das durch eine Zielfunktion, einer Menge an Entscheidungsalternativen sowie Restriktionen charakterisiert ist [Do15c]. Diese Elemente sind entsprechend für die Konfiguration von Lernfabriken herzuweisen. Optimierungsmodelle werden durch Algorithmen gelöst. Ein Algorithmus stellt eine präzise Handlungsvorschriften dar, um konkrete Probleminstanzen eines Optimierungsmodells zu lösen [Br19a]. Zur exakten Lösung werden im Rahmen dieser Forschungsarbeit entsprechende Algorithmen entwickelt.
- *Vorgehen zur Konfiguration* (Kapitel 5): Zur projektspezifischen Anwendung von Optimierungsmodellen sind Daten als Entscheidungsgrundlage zu beschaffen und strukturieren [Do15c]. Ein strukturiertes Vorgehen erleichtert zudem die praktische Anwendung des Optimierungsmodells. Dazu sind zielorientiert aus den Lern- und Forschungszielen zunächst Anforderungen an die Konfiguration zu ermitteln. Aus diesen Anforderungen werden anschließend mögliche Fabrikelemente bestimmt und bewertet. Abschließend werden die Algorithmen zur Optimierung angewendet. Hier sollten auch unsichere Eingangsgrößen analysiert werden können, um die Robustheit zu überprüfen. Das Vorgehen sollte dabei in Anlehnung an das Systems Engineering in verschiedene Schritte mit zunehmendem Detaillierungsgrad eingeteilt werden [Ha19].
- *Softwarebasiertes Konfigurationssystem* (Kapitel 6): Die Lösung des hergeleiteten Optimierungsmodells ist aufgrund der hohen Komplexität nicht manuell möglich. Deshalb wird aufbauend auf dem Vorgehen zur Konfiguration ein softwarebasiertes Konfigurationssystem konzipiert und entwickelt. In diesem sind die entwickelten Algorithmen mit zusätzlichen Funktionen umgesetzt, die das Vorgehen geeignet unterstützen.

In der vierten Phase des DRM findet abschließend die zweite deskriptive Studie statt, welche die **Anwendung und empirische Evaluation** beinhaltet (Kapitel 7) [BC09]. Die Anwendbarkeit der Methodik wird in verschiedenen praktischen Fallstudien überprüft. Zur Evaluation werden die aufgestellten inhaltlichen und formalen Anforderungen (s. Abschnitt 3.2) in ein Evaluationskonzept überführt.

Eine Zusammenfassung der Forschungskonzeption – insbesondere der Zuteilung zu den Phasen des DRM – findet sich in Abbildung 3.1.

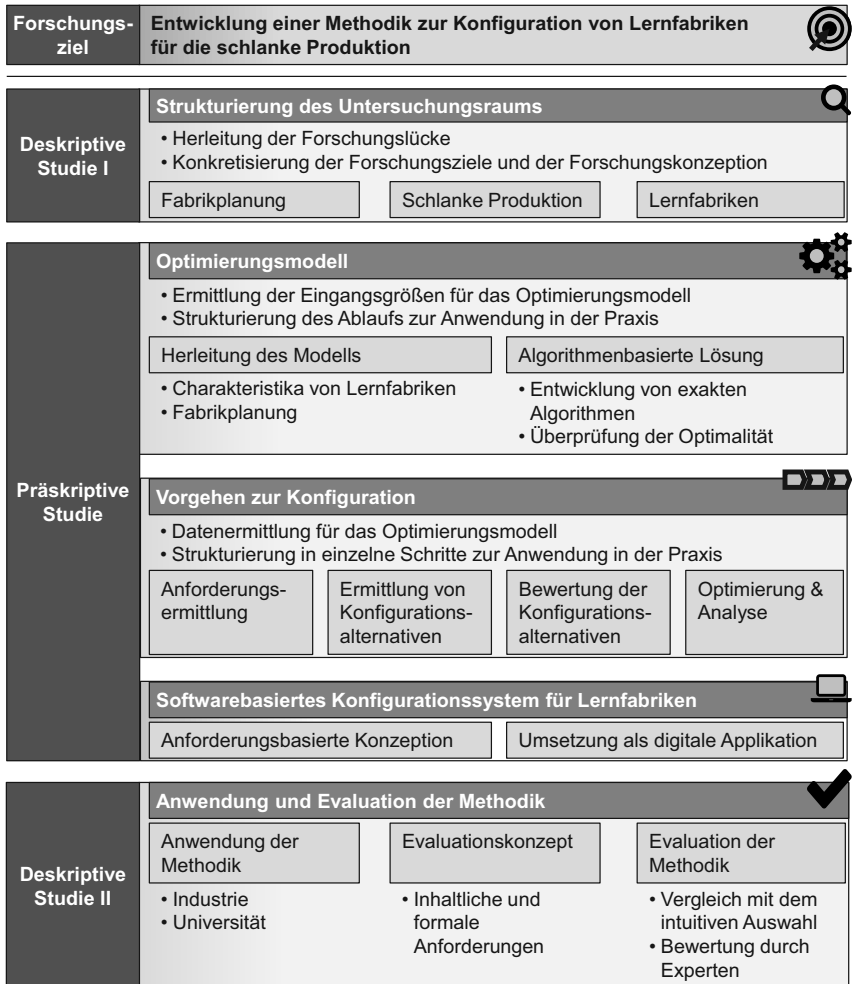


Abbildung 3.1: Forschungskonzeption der vorliegenden Forschungsarbeit, eigene Darstellung

4 OPTIMIERUNGSMODELL ZUR KONFIGURATION VON LERNFABRIKEN

Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur objektiven Ermittlung der bestmöglichen Konfiguration von Lernfabriken. Hierfür eignen sich quantitative Ansätze in Form von Optimierungsmodellen [MN21]. Deshalb wird zunächst ein entsprechendes Optimierungsmodell zur Konfiguration hergeleitet (Abschnitt 4.1). Zur mathematischen Optimierung werden Algorithmen verwendet. Vom Autor dieser Forschungsarbeit werden deshalb Algorithmen entwickelt, welche in der Lage sind, das aufgestellte Optimierungsproblem exakt zu lösen (Abschnitt 4.2).

4.1 Herleitung des Optimierungsmodells

Im Folgenden wird das Optimierungsmodell zur Konfiguration von Lernfabriken hergeleitet. Um Optimierungsmodelle herzuleiten, werden drei Elemente benötigt: Entscheidungsvariablen (Abschnitt 4.1.1), eine Zielfunktion (Abschnitt 4.1.2) und Restriktionen (Abschnitt 4.1.3) [SC17].

4.1.1 Entscheidungsvariablen

In Optimierungsmodellen werden Entscheidungen durch Entscheidungsvariablen dargestellt [SC17]. Zur Herleitung der Entscheidungsvariablen wird die zu konfigurierende Lernfabrik zunächst modularisiert: Das technische System einer Lernfabrik besteht analog zu herkömmlichen Fabriken aus unterschiedlichen Bereichen, die im Folgenden Fabrikbereiche genannt werden [Wi98]. Beispiele für Fabrikbereiche sind Sägen, Fräsen und Montage. Fabrikbereiche leiten sich zum einen aus den technisch notwendigen Prozessen zur Produktherstellung ab und werden zum anderen durch indirekte Funktionen erweitert, wie z. B. einen Bereich für Logistik oder Shopfloor Management. Die jeweiligen Fabrikbereiche unterscheiden sich je nachdem, welches Produkt k für die Lernfabrik ausgewählt wird. Zur Unterscheidung der Fabrikbereiche wird in dieser Forschungsarbeit die Laufvariable i verwendet. Insgesamt werden I unterschiedliche Fabrikbereiche und K unterschiedliche Produkte betrachtet.

In jedem Fabrikbereich existiert eine unterschiedliche Anzahl an Konfigurationsalternativen, die in Betracht gezogen werden können: Bspw. ist es möglich, dass Sägemaschinen unterschiedlicher Hersteller oder verschiedene Modelle verwendet werden können. Zur Konfiguration einer Lernfabrik ist jeweils eine Entscheidung in jedem Fabrikbereich notwendig. In dieser Forschungsarbeit werden die möglichen Alternativen für Fabrikbereiche als „Konfigurationsalternativen“ bezeichnet und mit der Laufvariable j unterschieden. Insgesamt werden im i -ten Fabrikbereich J Konfigurationsalternativen betrachtet.

4.1.2 Zielfunktion

Mit der Zielfunktion wird der mathematische Zusammenhang zwischen den Entscheidungsvariablen und der zu maximierenden oder minimierenden Größe modelliert [Ka12]. Zur Bestimmung der Zielfunktion bei der Konfiguration von Lernfabriken werden die Konfigurationsalternativen betrachtet: Jede Konfigurationsalternative ij besitzt verschiedene Eigenschaften, die sich entsprechend unterschiedlich für die Zielsetzung einer Lernfabrik eignen.²⁹ Dies kann durch einen Nutzwert n_{ij} quantifiziert dargestellt werden. Zur Berechnung des Nutzwerts aus den Eigenschaften der Konfigurationsalternativen ist eine Methode zur Bewertung notwendig, auf die in Abschnitt 5.4 als Teil des Vorgehens eingegangen wird. Sofern sich die Eigenschaften der Konfigurationsalternativen nicht gegenseitig bedingen, können die Nutzwerte n_{ij} unterschiedlicher Fabrikbereiche miteinander addiert werden. Die Zielfunktion N für die Konfiguration einer Lernfabrik bildet sich so aus dem Summenprodukt der Entscheidungsvariablen x_{ij} und dem Nutzwert der ausgewählten Konfigurationsalternativen n_{ij} und ist in Formel (2) dargestellt:

$$N = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J n_{ij} x_{ij} \rightarrow \max \quad (2)$$

Das Ziel bei der Konfiguration einer Lernfabrik besteht darin, die bestmögliche Auswahl so zu ermitteln, dass der Gesamtnutzen N der ausgewählten Lernfabrik-Konfiguration am höchsten ist. Es handelt sich deshalb um ein Maximierungsproblem. Der Gesamtnutzen N ist lediglich abhängig von den Entscheidungsvariablen x_{ij} – die einzelnen Nutzwerte n_{ij} hängen hingegen nicht direkt von der Auswahl ab.

Sofern keine Restriktionen vorliegen, ist jede Kombination der Konfigurationsalternativen zulässig. Die bestmögliche Auswahl wird dann durch die Konfigurationsalternativen erreicht, die den höchsten Nutzwert im jeweiligen Fabrikbereich aufweisen. Allerdings existieren in der Praxis unterschiedliche Restriktionen, auf welche im Folgenden eingegangen wird.

4.1.3 Restriktionen

Restriktionen beschränken in Optimierungsmodellen den zulässigen Lösungsraum und werden durch Gleichungen oder Ungleichungen beschrieben [SC17]. Bei der Konfiguration von Lernfabriken sind verschiedene Nebenbedingungen einzuhalten:

²⁹ Beispiele für diese Eigenschaften sind die Interaktionsfähigkeit auf Basis der intendierten Kompetenzen oder die Umsetzung der Gestaltungsprinzipien (s. Abschnitt 5.4.2).

Zum einen ist jeweils nur eine Konfigurationsalternative pro Fabrikbereich auszuwählen. Die Konfigurationsalternativen sind so mit Fabrikelementen auszustatten, dass grundsätzlich jede Alternative eine vollständige Lösung für den Fabrikbereich darstellt und ausgewählt werden kann; es können nicht mehrere Konfigurationsalternativen aus dem gleichen Fabrikbereich gleichzeitig ausgewählt werden. Falls innerhalb eines Fabrikbereichs eine Kombination an Konfigurationsalternativen in Betracht gezogen werden soll, ist eine entsprechende neue Alternative zu bilden. Daher kann, entsprechend Formel (3), pro Fabrikbereich i nur jeweils eine Binärvariable x_{ij} den Wert 1 annehmen – alle anderen Binärvariablen im Fabrikbereich i weisen den Wert 0 auf:

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} = 1 \quad (3)$$

Zum anderen sind bestimmte Kapazitätsgrenzen einzuhalten, die typischerweise bei der Konfiguration von Lernfabriken zu beachten sind und die im Folgenden beschrieben werden:

- Bei der Beschaffung von Fabrikelementen fallen für die lernfabrikbetreibende Organisation **Kosten** an. Jedes Fabrikelement erzeugt als Investitionsgut Anschaffungskosten [Be96].³⁰ Da jede Konfigurationsalternative eine unterschiedlich hohe Anzahl an unterschiedlichen Fabrikelementen enthält, setzen sich die gesamten Kosten, entsprechend Formel (4), der Konfigurationsalternative $w_{ij, \text{Kosten Alternative}}$ aus der Summe der einzelnen Kosten der Fabrikelemente $w_{o_{ij}, \text{Kosten Fabrikelement}}$ und der entsprechenden Anzahl an gleichen Fabrikelementen $q_{o_{ij}}$ zusammen. Zusätzlich kann ein Kostenzusatzfaktor Z_{ij} berücksichtigt werden, der Kosten für die Montage und Lieferung sowie für Kostenschwankungen enthält:

$$w_{ij, \text{Kosten Alternative}} = Z_{ij} \cdot \sum_{o_{ij}=1}^{o_{ij}} q_{o_{ij}} \cdot w_{o_{ij}, \text{Kosten Fabrikelement}} \quad (4)$$

Dabei darf die Summe der entstandenen Kosten aller ausgewählten Konfigurationsalternativen ein bestimmtes Budget für die Konfiguration nicht überschreiten.

- Jeder Fabrikbereich bzw. jede Konfigurationsalternative beansprucht eine gewisse **Fläche**. Beim Gebäudebau wird in der Phase der Antragserstellung die maximal beanspruchbare Fläche für das Gebäude und die Innenausstattung

³⁰ Anschaffungskosten bestehen aus dem Kaufpreis und den Anschaffungsnebenkosten abzüglich der Anschaffungsminderungen (z. B. Skonti).

festgelegt [WNR14]. Die Summe der Flächen aller ausgewählten Konfigurationsalternativen in den Fabrikbereichen darf diesen Wert nicht überschreiten.³¹

Zur Modellierung der Kapazitätsgrenzen wird für jede Kapazität ein maximal möglicher Wert C_r definiert, wobei der Index r eine Laufvariable für die zu beachtenden Ressourcen darstellt. Außerdem ist für jede Konfigurationsalternative der jeweilige Ressourcenverbrauch $w_{ij,r}$ zu ermitteln. Dabei muss entsprechend Formel (5) die Summe der Ressourcenverbräuche aller Konfigurationsalternativen $w_{ij,r}$ kleiner (oder gleich) der maximal möglichen Kapazitätsgrenze C_r zu jeder Ressource r sein:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J w_{ij,r} x_{ij} \leq C_r \quad (5)$$

Im zu entwickelnden Vorgehen sollten daher alle notwendigen Ressourcenverbräuche $w_{ij,r}$ und Kapazitätsgrenzen C_r ermittelt werden.

Beim hergeleiteten mathematischen Problem handelt es sich um ein mehrdimensionales Multiple-Choice Rucksackproblem (englisch: multidimensional multiple-choice knapsack problem, kurz: MMKP) [KPP04]. Das MMKP stellt im Vergleich zum ursprünglichen Rucksackproblem (englisch: knapsack problem, kurz: KP) eine zweifache Verallgemeinerung dar:

1. Beim KP kann lediglich unterschieden werden, ob ein Item ausgewählt wird oder nicht. Das MMKP lässt jedoch pro Klasse eine bestimmte Anzahl an Alternativen zu, von denen jeweils eine auszuwählen ist. Jede Klasse kann dabei so vereinfacht werden, dass zwei Alternativen vorliegen: auswählen oder nicht auswählen. Dies entspricht der Problemformulierung im KP. Wird das KP nur um diese Eigenschaft verallgemeinert, liegt das Multiple-Choice Rucksackproblem (englisch: multiple-choice knapsack problem, kurz: MCKP) vor [SZ79].
2. Beim KP kann lediglich eine Kapazitätsgrenze berücksichtigt werden. Das MMKP lässt eine bestimmte Anzahl an Kapazitätsgrenzen zu. Wird das KP nur um diese Eigenschaft erweitert, liegt das mehrdimensionale Rucksackproblem (englisch: multidimensional knapsack problem, kurz: MDKP) vor [KPP04].

Erweiterung durch die Beachtung von Abmessungen

Bei der bisherigen Modellierung der Restriktionen in Formel (5) wird lediglich geprüft, ob die Summe der Flächen aller ausgewählten Konfigurationsalternativen kleiner als eine maximal beanspruchbare Fläche ist. Dies kann in der Praxis jedoch zu unzulässigen Konfigurationen führen, wie in Abbildung 4.2 zu erkennen ist: Die beiden Fabrikelemente können nicht in die Lernfabrik gesetzt werden, obwohl die Summe der Flächen kleiner ist als die Fläche der Lernfabrik –

³¹ Darüber hinaus können weitere Kapazitätsgrenzen betrachtet werden, z. B. laufende Kosten.

unabhängig davon welche Positionen und Drehungen für die Fabrikelemente angenommen werden.

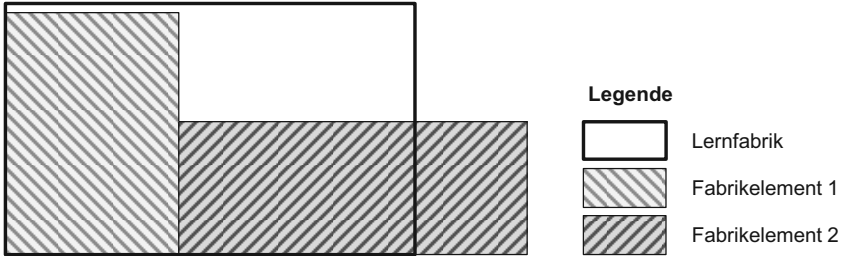


Abbildung 4.2: Relevanz des Packproblems, eigene Darstellung

Um ausschließlich zulässige Konfigurationen zu erhalten, sind **weitere Nebenbedingungen** zu beachten, welche die Abmessungen der Fabrikelemente und der Lernfabrik berücksichtigen. In der Literatur wird dieser Ausschnitt des Optimierungsmodells als zweidimensionales „Packproblem“ (englisch: bin packing problem, kurz: BPP) bezeichnet [KV12]. Bei Packproblemen wird generell die Problemstellung betrachtet, kleinere Elemente in größere Elemente zu packen [LMM02]. Dabei existieren in der Praxis unterschiedliche Zielsetzungen: Für die Distributionslogistik ist es bspw. wichtig, dass die nicht genutzten Flächen bzw. Volumina minimal sind [EE09]. Die Zielstellung bei der Konfiguration einer Lernfabrik ändert sich durch die Beachtung der Abmessungen nicht und so bleibt die Zielfunktion zur Konfiguration unverändert. In dieser Forschungsarbeit werden vor allem die erweiterten Nebenbedingungen zur Beachtung der Abmessungen benötigt, die im Folgenden betrachtet werden.

Die Abmessungszulässigkeit kann erst überprüft werden, nachdem ein erstes Layout generiert wurde. Zu dieser Überprüfung wird die Position der linken oberen Ecke der ausgewählten Fabrikelemente m betrachtet (p_{xm}, p_{ym}). Fabrikelemente können i. d. R. innerhalb der Lernfabrik gedreht werden, was durch die Binärvariable t_m ausgedrückt wird, die den Wert 1 annimmt, wenn das Fabrikelement um 90° gedreht wurde.³² Abbildung 4.3 verdeutlicht die eingesetzten Größen zur Prüfung der Abmessungszulässigkeit.

³² Dies kann für einzelne Fabrikelemente jedoch auch ausgeschlossen werden, indem als Bedingung $t_m = 0$ gesetzt wird.

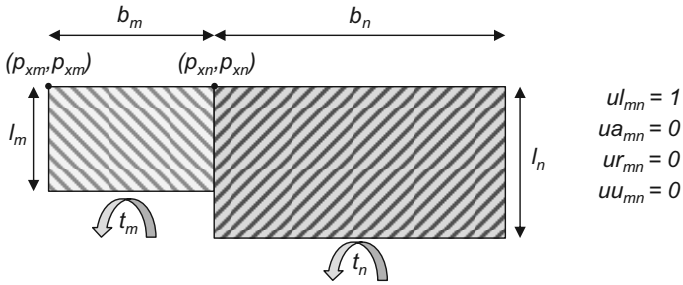


Abbildung 4.3: Größen zur Prüfung der Abmessungszulässigkeit, eigene Darstellung

Die folgenden Nebenbedingungen sind zur Überprüfung der Abmessungszulässigkeit zu beachten:³³

- Zunächst ist sicherzustellen, dass die Fabrikelemente innerhalb der Lernfabrik platziert werden, d. h., dass zusätzlich zur Position des Fabrikelements (p_{xm}, p_{ym}) dessen Breite b_m und Länge l_m addiert wird (in Abhängigkeit der Drehung t_m) und dieser Wert kleiner oder gleich den Abmessungen der Lernfabrik ist (s. Formeln (6) und (7)). Außerdem sollten die Positionen der Fabrikelemente größer als 0 sein (s. Formeln (8) und (9)):

$$p_{xm} + t_m b_m + (1 - t_m) l_m \leq B \quad (6)$$

$$p_{ym} + t_m l_m + (1 - t_m) b_m \leq L \quad (7)$$

$$p_{xm} \geq 0 \quad (8)$$

$$p_{ym} \geq 0 \quad (9)$$

- Die Fabrikelemente sind so zu positionieren, dass sie mindestens ein benachbartes Fabrikelement besitzen. Durch Binärvariablen können diese Beziehungen angegeben werden. Liegt das Fabrikelement m links von Fabrikelement n , ist $ul_{mn} = 1$ und $ur_{mn} = 0$, sonst $ul_{mn} = 0$ und $ur_{mn} = 1$. Liegt das Fabrikelement m oberhalb von Fabrikelement n , ist $ua_{mn} = 1$ und $uu_{mn} = 0$, sonst $ua_{mn} = 0$ und $uu_{mn} = 1$. Mit Formel (10) kann diese Beziehung modelliert werden:

$$ul_{mn} + ua_{mn} + ur_{mn} + uu_{mn} \geq 1 \quad (10)$$

- Außerdem ist sicherzustellen, dass sich die Flächen der einzelnen Fabrikelemente nicht überschneiden. Dazu werden die Fabrikelemente m und n betrachtet. Die Position der rechten Kante des linksliegenden Fabrikelements sollte kleiner sein als die Position der linken Kante des rechtsliegenden Fabrikelements. Dies geschieht in den Formeln (11) und (12) in Abhängigkeit

³³ Diese Nebenbedingungen wurden vom Autor dieser Forschungsarbeit erarbeitet.

der beiden Drehungen t_m und t_n sowie der ermittelten Positionierung ($ul_{mn}, ua_{mn}, ur_{mn}, uu_{mn}$) der beiden Fabrikelemente:

$$p_{xm} + t_m b_m + (1 - t_m) l_m \leq p_{xn} + B \cdot (1 - ul_{mn}) \quad (11)$$

$$p_{xn} + t_n b_n + (1 - t_n) l_n \leq p_{xm} + B \cdot (1 - ur_{mn}) \quad (12)$$

- Genauso verhält es sich in vertikaler Richtung: Die untere Kante des oberliegenden Fabrikelements sollte oberhalb der oberen Kante des untenliegenden Fabrikelements liegen (s. Formeln (13) und (14)):

$$p_{ym} + t_m l_m + (1 - t_m) b_m \leq p_{yn} + L \cdot (1 - uu_{mn}) \quad (13)$$

$$p_{yn} + t_n b_n + (1 - t_n) l_n \leq p_{ym} + L \cdot (1 - ua_{mn}) \quad (14)$$

- Zusätzlich kann es sein, dass bestimmte Fabrikelemente aufgrund weiterer Restriktionen nicht überall innerhalb der Lernfabrik positioniert werden dürfen: Bspw. kann es sein, dass bei schweren Maschinen die maximale Bodenlast überschritten wird [BS21]. Hierzu sind die zulässigen Positionsbereiche ($p_{ym,zulässig,min}, p_{ym,zulässig,max}$) bzw. ($p_{xm,zulässig,min}, p_{xm,zulässig,max}$) in den Formeln (15) und (16) zu beachten:

$$p_{ym,zulässig,min} \leq p_{ym} \leq p_{ym,zulässig,max} \quad (15)$$

$$p_{xm,zulässig,min} \leq p_{xm} \leq p_{xm,zulässig,max} \quad (16)$$

Zu den eben eingeführten Abmessungen (b_m, l_m) reicht es nicht aus, dass lediglich die Abmessungen der Fabrikelemente betrachtet werden. Zu den einzelnen Abmessungen sind zusätzliche Weglängen zu berücksichtigen:

- Gangbreite b_{Gang}

Die Gangbreite um das Fabrikelement dient der Begehrbarkeit der Fabrik. Die minimale Gangbreite richtet sich nach den technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR A2.3) und ist abhängig von der Anzahl der Personen in der Fabrik [Me18a]: Bei bis zu 20 Personen gilt eine minimale Gangbreite von 1,00 m und darüber hinaus bis 200 Personen 1,20 m. Zudem sollten größere Gangbreiten beim Einsatz von Flurfahrzeugen beachtet werden [Me18a]. Allerdings kann die Gangbreite auch anwendungsfallspezifisch erhöht werden, um bspw. größere Schulungsgruppen zu ermöglichen.

- Wartungsbreite $b_{Wartung}$

Die Wartungsbreite dient der Inspektion und Wartung des Fabrikelements. Nach der ASR A1.8 gilt eine minimale Wartungsbreite von 0,50 m [Ze19].

- Bedienbreite $b_{Bedienung}$

Die Bedienbreite dient der Nutzung des entsprechenden Fabrikelements. In den bestehenden Richtlinien existieren hierzu keine genauen Vorgaben [Ze19].

- Bereitstellungsweite $b_{\text{Bereitstellung}}$

Die Bereitstellungsfläche ermöglicht die Ablage der (Halbfertig-)Teile des vorausgehenden Prozesses. Auch hier existieren keine genauen Vorgaben [Ze19].

In Abbildung 4.4 wird die Flächenmodellierung der Fabrikelemente veranschaulicht. Dabei ist zu erkennen, dass die Hälfte der Gangbreite an jeweils jeder Seite addiert wird. Befindet sich ein weiteres Fabrikelement neben dem dargestellten, ist ersichtlich, dass die gesamte Gangbreite genutzt wird. Zu jedem Fabrikelement ist dabei anzugeben, auf welchen Seiten die zusätzlichen Flächen für Wartung, Bedienung und Bereitstellung zu berücksichtigen sind.

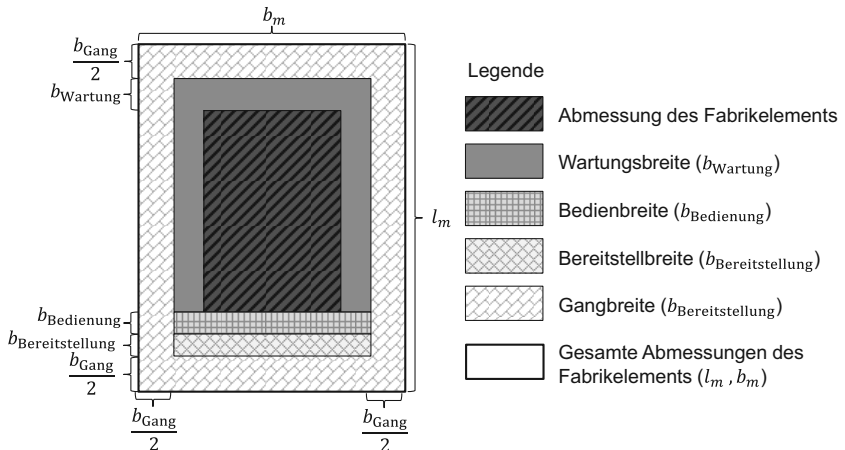


Abbildung 4.4: Flächenmodellierung eines Fabrikelements, eigene Darstellung

Die Kombination des BPP mit dem MMKP wurde in bisherigen Forschungsarbeiten nicht betrachtet. Daher existieren aktuell noch keine Algorithmen und Vorgehen zur Lösung. Aus diesem Grund wird das zusammengesetzte Optimierungsmodell in dieser Forschungsarbeit als „Facility Configuration Problem“ (kurz: FCP) bezeichnet, um dieses eindeutig abzugrenzen.

Erweiterung zur Rekonfiguration bestehender Lernfabriken

Neben der Konfiguration von neuen Lernfabriken, ergibt sich in der Praxis oftmals die Fragestellung, auf welche Weise bestehende Lernfabriken rekonfiguriert werden können. Bei der Rekonfiguration von bestehenden Lernfabriken werden entweder einzelne Fabrikelemente ersetzt oder neue Fabrikbereiche mit neuen Fabrikelementen hinzugefügt. Auch hier eignen sich die bestehenden intuitiven Ansätze (s. Abschnitt 2.3.3) nicht, um die bestmögliche Konfiguration zu ermitteln. Das hergeleitete Optimierungsmodell lässt sich jedoch so adaptieren, dass es für die Rekonfiguration bestehender Lernfabriken verwendet werden kann:

- **Auswählbare Konfigurationsalternativen ij**
Um bestehende Konfigurationen zu überprüfen, sollten die aktuell eingesetzten Konfigurationsalternativen betrachtet werden, da diese bereits vorhanden sind. Zusätzlich sind neue Konfigurationsalternativen einzubeziehen.
- **Nutzwerte n_{ij}**
Der Nutzwert der Konfigurationsalternativen hängt nicht davon ab, ob eine Konfigurationsalternative bereits in der Lernfabrik verwendet wird. Das Optimierungsmodell muss in dieser Hinsicht nicht angepasst werden.
- **Abmessungen L und B**
Die Abmessungen der Lernfabrik und der potenziellen Fabrikelemente sollten auch den aktuell vorliegenden entsprechen – außer, wenn eine neue Fabrikhalle genutzt werden soll. Auch hier ist keine Anpassung des Optimierungsmodells notwendig.
- **Kosten c_{ij}**
Eine Besonderheit stellt das verwendete Budget zur Rekonfiguration dar. Die aktuell verwendeten Konfigurationsalternativen sollten in diesem Fall mit keinen Kosten in das Optimierungsmodell einfließen. Dies lässt sich dadurch realisieren, dass die Kostenfunktion um eine Variable v_{ij} erweitert wird, welche angibt, ob es sich um eine aktuell verwendete Konfigurationsalternative handelt: Wird die Konfigurationsalternative aktuell verwendet, ist in Formel (17) v_{ij} gleich 1, sonst 0:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J w_{ij, \text{Kosten Alternative}} x_{ij} (1 - v_{ij}) \leq C_{\text{Budget}} \quad (17)$$

4.2 Lösung des Optimierungsmodells

In diesem Abschnitt wird gezeigt, wie das hergeleitete Optimierungsproblem zur Konfiguration von Lernfabriken (s. Abschnitt 4.1) gelöst werden kann. Die Lösung erfolgt dabei in zwei Schritten: Zunächst wird ein im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelter exakter Algorithmus MMKP vorgestellt (Abschnitt 4.2.1). Anschließend wird ein weiterer vom Autor entwickelter Algorithmus zur Lösung des FCP eingeführt (Abschnitt 4.2.2).

4.2.1 Lösung des MMKP

Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, handelt es sich bei dem hergeleiteten Optimierungsmodell zur Konfiguration von Lernfabriken um ein MMKP mit zusätzlichen Bedingungen des BPP. Die meisten bisher entwickelten Algorithmen zur Lösung des MMKP sind Heuristiken, die jedoch keine exakte Lösung garantieren. Die Optimalität stellt allerdings eine inhaltliche Anforderung dieser Forschungsarbeit dar (s. Abschnitt 3.2.1). Zur exakten Lösung des MMKP existieren bisher sechs

exakte Algorithmen.³⁴ Vom Autor dieser Arbeit wurde ein weiterer exakter Algorithmus für das MMKP entwickelt: der *Utility-Sorted Branch-and-Bound Algorithmus* (kurz: USBB-Algorithmus) [KKM21].

Die **Vorgehensweise des entwickelten USBB-Algorithmus** ist durch ein Flow-Chart in Abbildung 4.5 dargestellt und im Folgenden beschrieben. Der entwickelte Algorithmus sortiert zunächst alle Alternativen (Konfigurationsalternativen) in den Klassen (Fabrikbereichen) absteigend nach ihrem Nutzwert (USBB1). Dadurch kann eine Rangfolge in jeder Klasse erstellt werden (USBB2): Das Element mit dem höchsten Nutzwert in einer Klasse erhält den Rang 1, das Element mit dem zweithöchsten Nutzwert den Rang 2 usw. Weisen zwei Elemente in einer Klasse den gleichen Nutzen auf, erhält das Element mit dem kleineren relativen Ressourcenanteil den priorisierten Rang. Der relative Ressourcenanteil ist in Formel (18) beschrieben und bildet sich aus der Summe aller relativen Ressourcenverbräuche (Anteil des Ressourcenverbrauchs $w_{ij,r}$ zur Kapazitätsgrenze C_r) über alle Ressourcen R .

$$\eta_{ij} = \sum_{r=1}^R \frac{w_{ij,r}}{C_r} \quad (18)$$

Die Startlösung besteht aus den Alternativen, die den Rang 1 besitzen und somit den höchsten Nutzwert in jeder Klasse aufweisen (USBB3). Jede mögliche Lösung wird als Knoten bezeichnet. Für den weiteren Verlauf des Algorithmus wird eine Liste mit offenen Knoten geführt, in der jede Kombination enthalten ist, die zwar gebildet, jedoch bisher nicht auf Optimalität untersucht wurde. Die Startlösung wird in diese Liste gesetzt. Im nächsten Schritt beginnt eine Schleife und es wird zunächst geprüft, ob die Liste der offenen Knoten leer ist (USBB4). Falls dies nicht der Fall ist, wird der erste offene Knoten dieser Liste als nächstes betrachtet (USBB5) und dessen Gesamtnutzen anhand Formel (2) berechnet (USBB6). Danach wird überprüft, ob der Gesamtnutzen dieses Knotens höher ist als die beste bisher gefundene Lösung (USBB7). Falls der Gesamtnutzen kleiner ist, kann es sich nicht um die optimale Lösung handeln und der Knoten wird aus der Liste der offenen Knoten gelöscht (USBB11). Ist der Gesamtnutzen größer als die bisher beste gefundene Lösung wird geprüft, ob die Nebenbedingungen eingehalten werden und der betrachtete Knoten somit zulässig ist (USBB8). Falls dies der Fall ist, handelt es sich um die neue bisher beste Lösung und der Knoten wird entsprechend gespeichert (USBB9) [KKM21].

³⁴ Siehe dazu [Kh98], [Sb07], [GR11], [GHH18], [HW12], [MZ20].

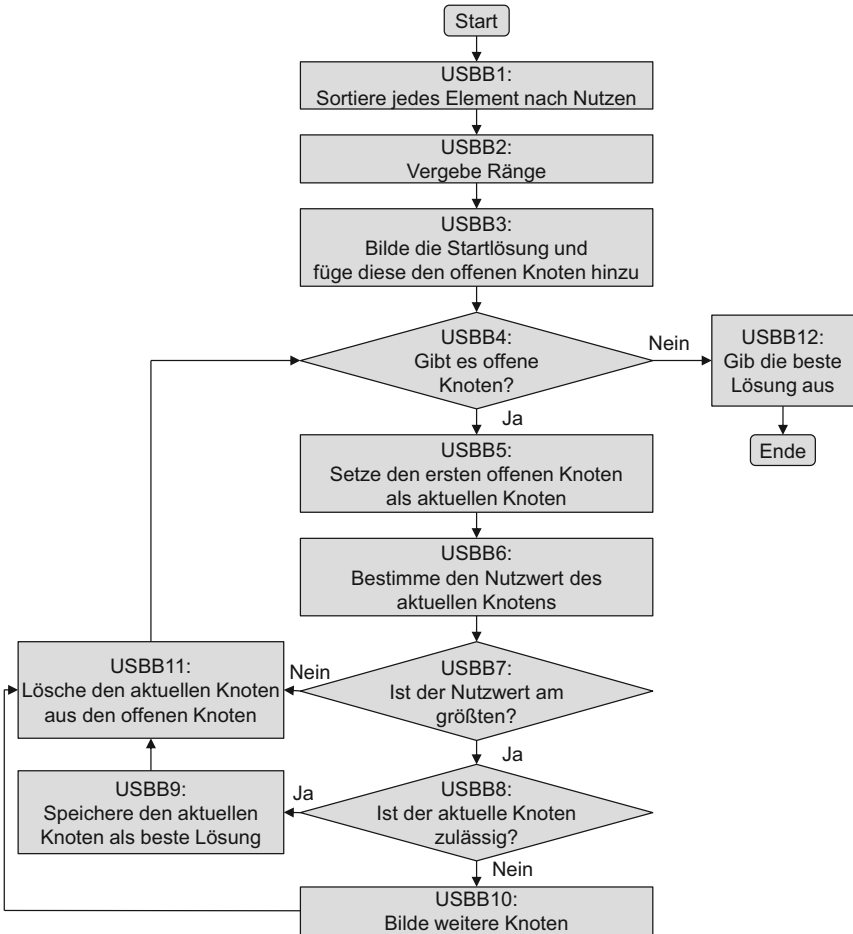


Abbildung 4.5: Flow-Chart des entwickelten USBB-Algorithmus zur Lösung des MMKP, eigene Darstellung in Anlehnung an [KKM21]

Ist der Knoten hingegen unzulässig, ist es möglich, dass sich die optimale Lösung aus diesem Knoten ableitet, indem in einer Klasse das Element mit dem nächstgrößeren Rang betrachtet wird. Ein neuer Knoten wird hingegen nicht gebildet, wenn dieser bereits in der Liste der offenen Knoten enthalten ist oder bereits untersucht wurde. Die so erhaltene Kombination kann einen höheren Gesamtnutzen aufweisen als die bisher gefundene Lösung und zulässig sein. Daher werden diese weiteren Kombinationen gebildet (s. Abbildung 4.6) [KKM21].

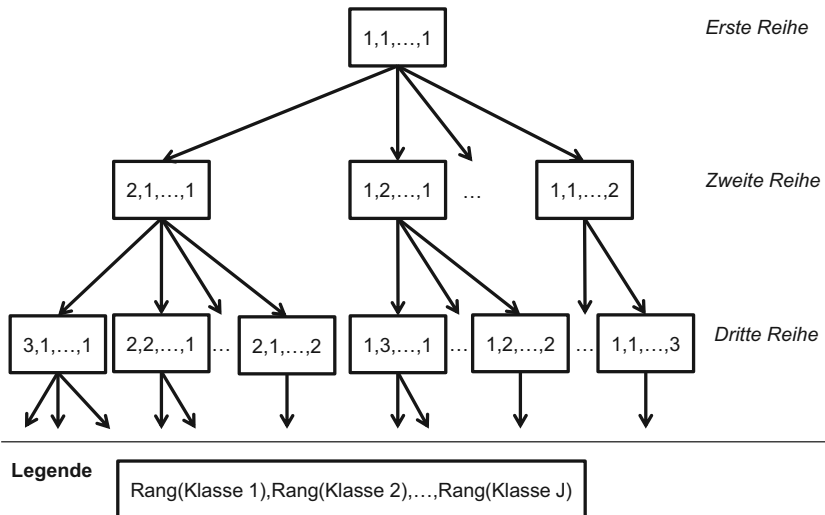


Abbildung 4.6: Entscheidungsbaum des entwickelten Algorithmus, eigene Darstellung

Der in dieser Schleife betrachtete Knoten wird aus der Liste der offenen Knoten gelöscht (USBB11). Die Schleife wiederholt sich so lange, bis keine offenen Knoten enthalten sind und gibt zum Schluss die beste Lösung aus (USBB12) [KKM21].

Bei dem entwickelten Algorithmus zur Lösung des MMKP handelt es sich um einen exakten Algorithmus. Durch die Vorgehensweise kann die optimale Lösung nicht übersprungen oder übersehen werden, da die nutzenbasierten Ränge so lange systematisch variiert werden, bis die Restriktionen eingehalten werden. Die Variation des Ranges eines Elements mit dem nächstkleineren Nutzen (in Abbildung 4.6) führt dazu, dass die Knoten der nächsten Reihen keinen höheren Nutzen aufweisen können als die entsprechenden ursprünglichen Knoten. Weitere Knoten werden lediglich dann nicht gebildet, wenn sie nicht optimal sein können, d. h.,

- dass entweder ihr Gesamtnutzen kleiner ist als die bisher beste Lösung (Regel 1) oder,
- dass wenn sie die Ressourcenrestriktionen einhalten und einen kleineren Gesamtnutzen aufweisen, eine weitere Variation des Ranges nicht zur optimalen Lösung führt, da der Gesamtnutzen des so gebildeten Knotens nicht größer sein kann als der ursprüngliche Knoten (Regel 2).

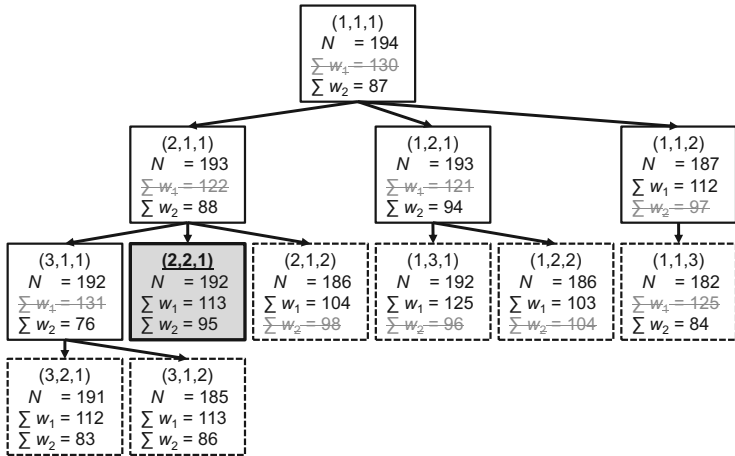
Auf diese Weise müssen nicht alle möglichen Knoten des Optimierungsproblems untersucht werden. Der USBB-Algorithmus schließt weite Teile des möglichen Lösungsraums aus, die aus den genannten logischen Beziehungen nicht optimal sein können. [KKM21]

Beispiel

Die Anwendung des Algorithmus wird an einem vereinfachten Beispiel erläutert. Es soll eine Lernfabrik konfiguriert werden, in der drei Fabrikbereiche betrachtet werden (z. B. Sägen, Fräsen und Montage). Zu jedem Fabrikbereich stehen je drei unterschiedliche Konfigurationsalternativen zur Auswahl. Abbildung 4.7 zeigt die Nutzwerte und Ressourcenverbräuche der Konfigurationsalternativen. In Abbildung 4.8 wird der Entscheidungsbaum des USBB-Algorithmus zur Lösung des Beispiels dargestellt.

Fabrikbereich 1	Fabrikbereich 2	Fabrikbereich 3	Lernfabrik
$n_{11} = 67$ $w_{11,1} = 39$ $w_{11,2} = 40$	$n_{21} = 53$ $w_{21,1} = 39$ $w_{11,2} = 15$	$n_{31} = 74$ $w_{31,1} = 52$ $w_{31,2} = 32$	Maximale Ressourcenverbräuche: $C_1 = 120$ $C_2 = 95$
$n_{12} = 66$ $w_{12,1} = 31$ $w_{12,2} = 41$	$n_{22} = 52$ $w_{22,1} = 30$ $w_{22,2} = 22$	$n_{32} = 67$ $w_{32,1} = 34$ $w_{32,2} = 42$	
$n_{13} = 65$ $w_{13,1} = 40$ $w_{13,2} = 29$	$n_{23} = 51$ $w_{23,1} = 34$ $w_{23,2} = 24$	$n_{33} = 62$ $w_{33,1} = 45$ $w_{33,2} = 29$	

Abbildung 4.7: Beispiel zur Anwendung des USBB-Algorithmus, eigene Darstellung



Legende

Rang(Klasse 1), Rang(Klasse 2), ..., Rang(Klasse J) N: Gesamtnutzen $\sum w_r$: Gesamter Ressourcenverbrauch der Ressource r (hellgrau durchgestrichen: unzulässig)	Optimale Lösung	Gebildeter, jedoch nicht untersuchter Knoten
---	------------------------	--

Abbildung 4.8: Lösung des Beispiels zum USBB-Algorithmus, eigene Darstellung

Der Algorithmus beginnt mit dem Knoten, der die höchsten Nutzwerte enthält (1,1,1). Da dieser nicht zulässig ist, werden die Knoten (2,1,1), (1,2,1) und (1,1,2) betrachtet, welche ebenfalls nicht zulässig sind. Dies führt zur Bildung

neuer Knoten. Der Knoten (2,2,1) ist der erste zulässige Knoten bei einem Gesamtnutzen von 192. Da alle bisher gebildeten Knoten, insbesondere (3,2,1) und (3,1,2), entweder einen kleineren Gesamtnutzen aufweisen oder nicht zulässig sind, handelt es sich um die optimale Lösung des MMKP.

4.2.2 Lösung des FCP

Für die Konfiguration von Lernfabriken wird nicht nur ein MMKP betrachtet, sondern zusätzlich die Nebenbedingungen des BPP, da die tatsächlichen Abmessungen berücksichtigt werden müssen (s. Abschnitt 4.1.3). Der entwickelte exakte Lösungsalgorithmus für das MMKP (aus Abschnitt 4.2.1) reicht deshalb nicht aus, um dieses kombinierte Optimierungsproblem (FCP) zu lösen. Da das Optimierungsproblem bisher nicht bekannt ist, existiert bislang kein Algorithmus zur Lösung des FCP.

Daher wurde im Zuge dieser Forschungsarbeit ein **erster exakter Algorithmus zur Lösung des FCP** entwickelt. Eine betrachtete einzuhaltende Ressource im MMKP zur Konfiguration stellt die Fläche dar. Diese Restriktionen garantiert jedoch nicht, dass die gefundene Lösung den weiteren Nebenbedingungen des Packproblems entspricht. Die gefundenen Lösungen des MMKP müssen deshalb zunächst durch weitere räumliche Nebenbedingungen untersucht werden (Formeln (6) bis (14)). Sofern diese erfüllt sind, handelt es sich um die Lösung des FCP. Falls sie nicht erfüllt sind, sollten weitere Konfigurationen im Entscheidungsbaum betrachtet werden. Dazu sind allerdings Angaben zu den Positionen der einzelnen Fabrikelemente, die in den Konfigurationsalternativen enthalten sind, notwendig. Hierfür ist bereits ein erstes Fabriklayout zu ermitteln. Zur Implementierung der Nebenbedingungen (6) bis (14) existieren zwei mögliche Ansätze:

1. Die Nebenbedingungen (6) bis (14) werden für jeden Knoten im USBB-Algorithmus überprüft. Deshalb wird zu jedem Knoten ein Layout generiert, damit die Positionen überprüft werden können.
2. Die Nebenbedingungen (6) bis (14) werden lediglich für die optimale Lösung des MMKP überprüft. Die Erstellung eines Layouts ist so nur für diese Lösung notwendig. Können nicht alle Fabrikelemente im Layout platziert werden, sollten im MMKP weitere Knoten gebildet werden, um die optimale Lösung des FCP zu untersuchen.

Der entwickelte FCP-Algorithmus verfolgt den zweiten Ansatz, da die Erstellung von Layouts für jeden Knoten – also auch den ohnehin unzulässigen – ineffizient ist. Mit beiden Ansätzen kann die optimale Lösung ermittelt werden, allerdings kann der erste Ansatz keine geringere Rechenzeit aufweisen als der zweite.

Zur Umsetzung des zweiten Ansatzes wird die Kapazitätsgrenze für die Fläche $C_{\text{Fläche}}$ im MMKP durch einen zusätzlichen Flächenzulässigkeitsfaktor F

verkleinert, um Konfigurationen mit kleinerer Fläche zu ermitteln. Der Flächenzulässigkeitsfaktor F hat einen Wertebereich von 0 bis 1. Durch den Flächenzulässigkeitsfaktor F verkleinert sich die Kapazitätsgrenze für die Fläche der Lernfabrik (s. Formel (19)), die sich ursprünglich aus dem Produkt aus Breite und Länge der Lernfabrik zusammensetzt.

$$C_{\text{Fläche}} = F \cdot B \cdot L \quad (19)$$

In Abbildung 4.9 wird die Vorgehensweise des entwickelten Algorithmus zur Lösung des FCP anhand eines Flow-Charts dargestellt. Der Algorithmus startet, indem der Flächenzulässigkeitsfaktor F zunächst auf 1 gesetzt wird (FCP1). Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die optimale Lösung auch dann gefunden wird, wenn die Kapazitätsgrenze der Fläche $C_{\text{Fläche}}$ im MMKP nicht verkleinert wird. Im Anschluss wird der USBB-Algorithmus zur Lösung des MMKP eingesetzt und die optimale Lösung des MMKP ausgegeben (s. Abschnitt 4.2.1).

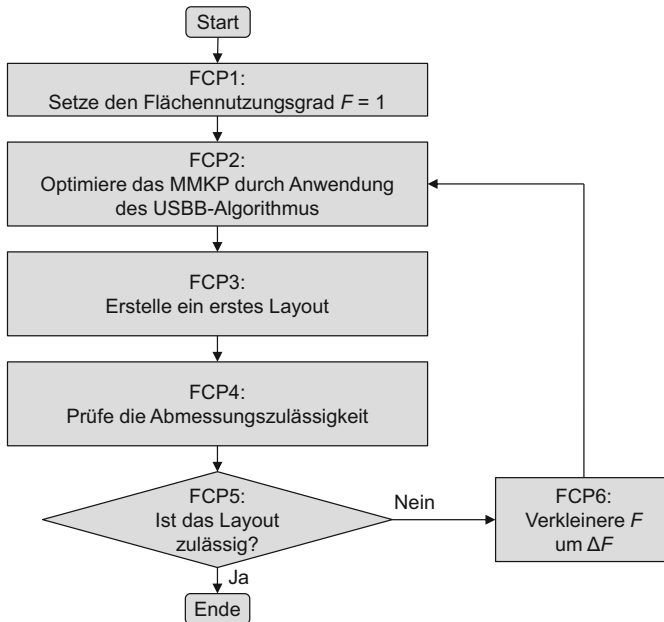


Abbildung 4.9: Flow-Chart des entwickelten Algorithmus zur Lösung des FCP, eigene Darstellung

Im nächsten Schritt ist ein erstes Layout zu erstellen, um die Nebenbedingungen (6) bis (14) für die ermittelte Lösung des MMKP zu überprüfen (FCP3). Ein erstes Layout kann mit den folgenden drei Algorithmen erstellt werden:

- **Best-Fit-Algorithmus**

Bei der Best-Fit-Strategie werden die Fabrikelemente entsprechend ihrer Fläche iterativ in das Layout gesetzt. Dazu sind die einzusetzenden Fabrikele-

mente zunächst nach ihrer Fläche absteigend zu sortieren. Empirisch konnte bereits gezeigt werden, dass auf diese Weise eine hohe Flächenauslastung möglich ist, was den Vorteil hat, dass die Abmessungszulässigkeit leichter zu erfüllen ist. [Y10]

- *Next-Fit-Algorithmus*

Bei der Next-Fit-Strategie erfolgt das iterative Einsetzen ohne vorherige Sortierung nach Fläche. Die Fabrikelemente können entsprechend ihrer Materialflussbeziehungen in der Reihenfolge des zugrundeliegenden Wertstroms eingesetzt werden. Dies hat den Vorteil, dass Wertströme abgebildet werden können. Allerdings sind lediglich einfache Materialflussbeziehungen möglich, wie sie in Lernfabriken üblich sind. [BW87]

- *Optimierung durch genetische Algorithmen*

Optional kann das Facility Layout Problem (FLP, s. Abschnitt 2.1.5) betrachtet und das Layout – entsprechend den zugrundeliegenden Materialflussbeziehungen – optimiert werden. Dies hat den Vorteil, dass selbst komplexe Materialflussbeziehungen bestmöglich umgesetzt werden können. Jedoch können die Rechenzeiten zur Lösung des FLP mehrere Stunden bis Tage beanspruchen [Kr21a]. Bei der Betrachtung bisheriger Lernfabrikkonzepte [AMT19] zeigt sich, dass die Materialflüsse in Lernfabriken i. d. R. nicht derart komplex sind, dass sich die Modellierung und Lösung des FLP lohnt.

Zur Überprüfung der Abmessungszulässigkeit (FCP4 und FCP5) wird auf die Nebenbedingungen (6) bis (14) aus Abschnitt 4.1.3 verwiesen. Nach der Erstellung des Layouts im vorherigen Schritt sollte eine zulässige Lösung des FCP jede Nebenbedingung einhalten.

Werden die Bedingungen zur Prüfung der Abmessungszulässigkeit nicht erfüllt, so ist der Flächenzulässigkeitsfaktor F systematisch zu verkleinern, um flächenmäßig kleinere Konfigurationen zu erzeugen (FCP6). Bei diesem Schritt ist es wichtig, dass das entsprechende Anpassungsintervall ΔF nicht zu groß gewählt wird. Ist das Intervall zu groß, könnte die optimale Lösung übersprungen werden, da flächenmäßig zu kleine Lösungen erzeugt werden. Dabei ist es ausreichend, wenn das Anpassungsintervall ΔF eine sehr kleine Zahl größer 0 ist, z. B. 10^{-1000} .

Der neue Flächenzulässigkeitsfaktor F_{neu} ergibt sich in Formel (20) aus der Differenz des aktuellen Flächenzulässigkeitsfaktor F_{aktuell} und dem berechneten Intervall ΔF :

$$F_{\text{neu}} = F_{\text{aktuell}} - \Delta F \quad (20)$$

Der Algorithmus läuft so lange, bis eine Lösung gefunden wurde, welche den Abmessungen nach zulässig ist. Da keine Lösung übersprungen werden kann, gibt es auch keine Lösung mit einem höheren Zielfunktionswert. Die gefundene Lösung stellt demnach die optimale Lösung des FCP dar und es handelt sich somit um einen exakten Algorithmus.

4.3 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde ein Optimierungsmodell zur Konfiguration von Lernfabriken hergeleitet. Dabei sollte der summierte Nutzwert N aller eingesetzten Fabrikelemente als Zielfunktion maximiert werden. Die Grundstruktur des Modells lehnt sich an das multidimensionale Multiple-Choice Rucksackproblem (MMKP) an. Für jeden zu planenden Fabrikbereich wird eine Konfigurationsalternative ij ausgewählt. Dabei müssen verschiedene Ressourcenrestriktionen C_r , wie das verfügbare Budget oder die Fläche der Lernfabrik, eingehalten werden. Die Grundstruktur kann durch die folgende mathematische Modellierung zusammengefasst werden:

$$\begin{aligned}
 N &= \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J n_{ij} x_{ij} \rightarrow \max \\
 \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J w_{ij,r} x_{ij} &\leq C_r \\
 \sum_{j=1}^J x_{ij} &= 1 \\
 x_{ij} &\in \{0; 1\}
 \end{aligned}$$

Zusätzlich sind die tatsächlichen Abmessungen zu berücksichtigen, welche im Bin Packing Problem (BPP) betrachtet werden. Die mathematische Problemstellung kann somit durch ein in bisherigen Forschungsarbeiten nicht untersuchten Optimierungsproblem, dem Facility Configuration Problem (FCP), beschrieben werden. Diejenige zulässige Kombination an Konfigurationsalternativen mit dem größtmöglichen Nutzen stellt die optimale Lösung und somit die bestmögliche Konfiguration dar.

Für das hergeleitete Optimierungsmodell wurden Algorithmen entwickelt, die das mathematische Problem lösen können. Zur exakten Lösung des MMKP wurde der Utility-Sorted-Branch-and-Bound-Algorithmus im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelt, welcher durch logische Regeln weite Teile des Lösungsraums ausschließt. Darauf aufbauend löst der ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit entwickelte FCP-Algorithmus die kombinierte Problemstellung des FCP durch die systematische Variation eines Flächenzulässigkeitsfaktors. Im Algorithmus wurden verschiedene Optionen zur Berechnung eines ersten Fabriklayouts implementiert. Da die optimale Lösung nicht übersprungen werden kann, stellt der entwickelte FCP-Algorithmus den ersten Ansatz zur exakten Lösung des FCP dar.

5 VORGEHEN ZUR KONFIGURATION VON LERNFABRIKEN

In diesem Kapitel wird das Vorgehen zur Konfiguration von Lernfabriken konzipiert und beschrieben. Dabei baut das Vorgehen auf dem entwickelten Optimierungsmodell aus Kapitel 4 auf. Zunächst werden das Ziel und die Struktur des Vorgehens erläutert (Abschnitt 5.1). Anschließend werden die einzelnen Vorgehensschritte beschrieben (Abschnitte 5.2 bis 5.5). Das Kapitel schließt mit einem Zwischenfazit (Abschnitt 5.6).

5.1 Ziel und Struktur des Vorgehens

Das Ziel des Vorgehens zur Lernfabrik-Konfiguration besteht in der strukturierten Anwendung des hergeleiteten Optimierungsmodells. Um das Optimierungsmodell anwenden zu können, müssen alle benötigten Daten der Konfigurationsalternativen im Vorgehen ermittelt werden. Dazu müssen zum einen Konfigurationsalternativen systematisch ermittelt und zum anderen quantitativ bewertet werden. In Tabelle 5.1 werden die benötigten Daten für das Optimierungsmodell dargestellt. Zu jedem der in Betracht kommenden Produkte H existieren I Fabrikbereiche, zu denen wiederum J unterschiedliche Konfigurationsalternativen gehören. Für jede Konfigurationsalternative sind der Nutzwert n_{ij} , die Kosten $w_{ij, \text{Kosten Alternative}}$ und die Abmessungen l_{ij} und b_{ij} zu bestimmen. Außerdem werden das zur Verfügung stehende Budget zur Konfiguration C_{Budget} sowie die Abmessungen der zu konfigurierenden Lernfabrik L und B benötigt.

Tabelle 5.1: Benötigte Daten für das Optimierungsmodell, eigene Darstellung

Lernfabrik				Kapazitäten		
				Budget	Länge	Breite
				C_{Budget}	L	B
Produkt	Fabrikbereich	Konfigurationsalternative	Nutzwert	Restriktionen		
				Kosten	Länge	Breite
Produkt 1	Fabrikbereich 1.1	Alternative 1.1.1	n_{11}	$c_{11, \text{Kosten}}$	l_{11}	b_{11}
		Alternative 1.1.2	n_{12}	$c_{12, \text{Kosten}}$	l_{12}	b_{12}
	Fabrikbereich 1.2	Alternative 1.2.1	n_{21}	$c_{21, \text{Kosten}}$	l_{21}	b_{21}
		Alternative 1.2.2	n_{22}	$c_{22, \text{Kosten}}$	l_{22}	b_{22}
...

Zur systematischen Ermittlung der benötigten Daten ist ein strukturiertes Vorgehen notwendig. Um bewertete Konfigurationsalternativen auswählen zu können, sind zunächst die zugrundeliegenden Anforderungen an die Lernfabrik zu ermitteln (Vorgehensschritt I, Abschnitt 5.2). Im Anschluss werden auf Basis der Anforderungen mögliche Produkte, Fabrikbereiche und Konfigurationsalternativen

hergeleitet (Vorgehensschritt II, Abschnitt 5.3). Der Nutzwert der ermittelten Konfigurationsalternativen wird danach durch eine Bewertungssystematik ermittelt (Vorgehensschritt III, Abschnitt 5.4). Durch die Anwendung der Algorithmen kann schließlich die bestmögliche Konfiguration ermittelt und analysiert werden (Vorgehensschritt IV, Abschnitt 5.5). In Abbildung 5.1 ist die Struktur des Vorgehens schematisch dargestellt. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Vorgehensschritte detailliert beschrieben.³⁵

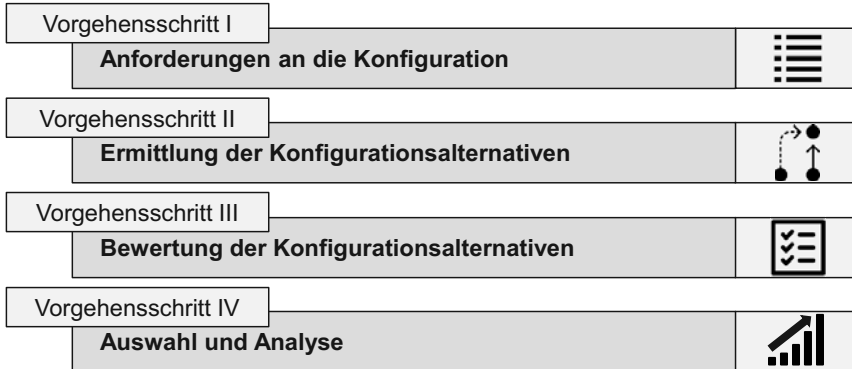


Abbildung 5.1: Vorgehen zur Konfiguration von Lernfabriken, eigene Darstellung

5.2 Vorgehensschritt I: Ermittlung von Anforderungen an die Konfiguration

In diesem Abschnitt wird gezeigt, welche Anforderungen an die Konfiguration einer Lernfabrik zu ermitteln sind (Abschnitt 5.2.1). Zur Verwendung der Anforderungen in den nachfolgenden Vorgehensschritten findet eine Strukturierung statt (Abschnitt 5.2.2).

5.2.1 Ermittlung der Anforderungen

Zunächst sind Anforderung an die Konfiguration der betrachteten Lernfabrik zu ermitteln. Anforderungen beschreiben generell die gewünschte zukünftige Beschaffenheit, die Funktion und/oder das Verhalten von Systemen [Vo15]. Für die Konfiguration einer Lernfabrik ergeben sich Anforderungen zum einen aus deren Zielen und Rahmenbedingungen. Zum anderen ergeben sich durch die Anwendung eines Optimierungsmodells weitere Anforderungen.

³⁵ Das Vorgehen wurde in KREß UND METTERNICH [KM22a] im Rahmen der Conference on Learning Factories (CLF) veröffentlicht.

Anforderungen aus der Zielsetzung der Lernfabrik

Wie in Abschnitt 2.3 gezeigt, existieren drei Primärziele von Lernfabriken: Forschung, Weiterbildung und Lehre [Ab15b]. Aus diesen Primärziele lassen sich zielorientierte Anforderungen an die Konfiguration ableiten:

- *Forschung*: Beim Primärziel Forschung besteht das Ziel der Lernfabrik in der Umsetzung von Forschungsprojekten und der Generierung von Wissen (bspw. in [VMG19]). In den meisten Fällen werden hierzu Lernfabriken als realistische Produktionsumgebungen zur Erprobung und Validierung genutzt. Aus den zu adressierenden Forschungsinhalten werden Anforderungen an die Konfiguration abgeleitet. Beispiel: Wird der Einsatz von industriellen 3D-Druckern in einem schlanken Produktionssystem untersucht, ergibt sich als Anforderung die Integration von 3D-Druckern (als Fabrikbereich bzw. als Fabrikelement) in die Konfiguration der Lernfabrik inkl. weiterer spezifischer Anforderungen zur Größe und zum angesetzten Material.
- *Weiterbildung*: Beim Primärziel Weiterbildung wird die Lernfabrik zur Schulung von industriellen Beschäftigten genutzt. Dazu sind intendierte Kompetenzen zu formulieren, die sich in die Aspekte Wissen und Handlung aufteilen [GM20]. Während die Wissens Elemente in den Theorieteil vermittelt werden und keinen direkten Einfluss auf die Konfiguration haben, sollte die Konfiguration einer Lernfabrik die hergeleiteten Handlungen ermöglichen. Beispiel: Soll die Methode SMED (Single Minute Exchange of Dies) geschult werden, ergibt sich als Anforderung die Integration eines veränderbaren Rüstprozesses.
- *Lehre*: Beim Primärziel Lehre werden als Zielgruppe Studierende angesprochen. Grundsätzlich werden (wie beim Primärziel Weiterbildung) intendierte Kompetenzen formuliert, die aus Handlungselementen bestehen und somit in Anforderungen resultieren. Im folgenden Verlauf dieser Forschungsarbeit werden die beiden Primärziele Weiterbildung und Lehre zusammenfassend betrachtet.

Anforderungen aus dem Optimierungsmodell zur Konfiguration

Zur Anwendung des Optimierungsmodells werden unterschiedliche Daten benötigt (s. Abschnitt 4.1).

- *Abmessungen*: Der Wertebereich, in dem die Abmessungen der Lernfabrik liegen, sollte idealerweise bereits bekannt sein. So können die Konfigurationsalternativen im nächsten Schritt darauf abgestimmt werden. Ist die spätere Anzahl der Schulungsteilnehmenden bekannt, kann so die Mindestgangbreite ermittelt werden sowie darüber hinaus die Wartungs-, Bedien- und Bereitstellungsbreite (s. Abschnitt 4.1.3).
- *Budget*: Auch der Wertebereich, in welchem das Budget für die Konfiguration liegt, ist idealerweise für den nächsten Schritt bekannt. Konfigurationsalternativen, die grundsätzlich zu teuer sind, können so ausgeschlossen werden. Ist

das Budget noch nicht bekannt, lassen sich im späteren Verlauf Konfigurationen mit unterschiedlichen Budgetwerten ermitteln.

Die Anforderungen sind in Projektteams zu bestimmen, die sich aus der betreibenden Organisation der zu konfigurierenden Lernfabrik (inklusive Trainingspersonal) sowie Expertinnen und Experten im Bereich Lernfabrikgestaltung zusammensetzen. Der Gestaltungsansatz von ABELE ET AL./TISCH dient als Grundlage dieser Forschungsarbeit, insbesondere die Definition der Rahmenbedingungen und Lernziele (s. Abbildung 2.14). Zur Konfiguration werden die folgenden Informationen benötigt, die im Ansatz von TISCH beschrieben werden sind (s. Abschnitt 2.3.3): [Ti18]

- Ausgefüllte Morphologie für die zu konfigurierende Lernfabrik (s. Anhang 1.1),
- Definierte intendierte Kompetenzen in Form von Kompetenzmatrizen (s. Anhang 1.2),
- Vertikaler und horizontaler Abbildungsumfang (s. Anhang 1.3) sowie
- Weitere projektspezifische Rahmenbedingungen.

5.2.2 Strukturierung der Anforderungen

Zur Ermittlung der bestmöglichen Auswahl an Konfigurationsalternativen ist es notwendig, dass potenzielle Konfigurationsalternativen ermittelt werden (s. Abschnitt 4.1). Jede auswählbare Konfigurationsalternative muss daher für den entsprechenden Fabrikbereich prinzipiell geeignet sein. Aus diesem Grund sind für die auswählbaren Konfigurationsalternativen Anforderungen zu ermitteln. Diese Anforderungen teilen sich in **Muss- und Kann-Anforderungen** auf.³⁶ Jede Konfigurationsalternative muss die definierten Muss-Anforderungen erfüllen. Diese sind somit zwingend bei der Ermittlung der potenziellen Konfigurationsalternativen zu berücksichtigen (s. Abschnitt 5.3). Die Erfüllung von Kann-Anforderungen ist nicht verpflichtend – aus diesen lassen sich allerdings Bewertungskriterien bilden, die den Nutzwert der Konfigurationsalternative erhöhen und bei der Bewertung berücksichtigt werden (s. Abschnitt 5.4).

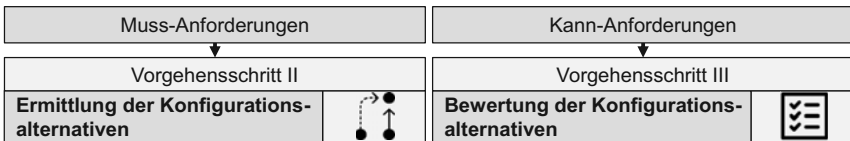


Abbildung 5.2: Einfluss der Anforderungen auf die nächsten Vorgehensschritte, eigene Darstellung

Des Weiteren sind die ermittelten Anforderungen nach den zugrundeliegenden **Konfigurationsebenen** einzuordnen. Diese unterteilen sich analog zur Struktur

³⁶ Alternativ können die Anforderungen in Fest-, Bereichs-, Mindest- und Maximalanforderung eingeteilt werden [EM13]. Diese detaillierte Einteilung ist jedoch zur Umsetzung der Methodik nicht notwendig.

des Optimierungsmodells in die Lernfabrik-, Produkt-, Fabrikbereichs- und Fabrikelement-Ebene. Eine Anforderung kann eine oder auch mehrere Konfigurationsebenen betreffen (s. Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2: Anforderungsstruktur zur Konfiguration, eigene Darstellung

#	Anforderung	Art der Anforderung		Betrachtete Konfigurationsebene			
		Muss	Kann	Lernfabrik	Produkt	Fabrikbereich	Fabrikelement
1	[Beschreibung]						
2	[Beschreibung]						
...	...						

In Anhang 2.1 finden sich beispielhafte Anforderungen. Als Ergebnis des ersten Vorgehensschritts stehen die Anforderungen an die Konfigurationsebenen fest.

5.3 Vorgehensschritt II: Ermittlung von Konfigurationsalternativen

Dieser Abschnitt zeigt, wie mögliche Konfigurationsalternativen einer Lernfabrik bestimmt werden können. Zunächst sind dazu mögliche Produkt der zu konfigurierenden Lernfabrik auszuwählen (Abschnitt 5.3.1). Nach der Vorauswahl möglicher Produkte können Fabrikbereiche aus den für die Produktherstellung abzubildenden Prozessen und Funktionen abgeleitet werden (Abschnitt 5.3.2). Jeder Fabrikbereich kann durch unterschiedliche Fabrikelemente zusammengesetzt werden, die im Anschluss ermittelt werden können. Mehrere Fabrikelemente bilden dabei Konfigurationsalternativen für Fabrikbereiche (Abschnitt 5.3.3).

5.3.1 Produkte und Dienstleistungen

In Lernfabriken i. e. S. werden physische Produkte hergestellt. Aus diesem Grund ist es notwendig, dass ein oder mehrere physische Produkte bei der Konfiguration ausgewählt werden. Alternativ können in Lernfabriken i. w. S. statt physischen Produkten auch Dienstleistungen abgebildet werden, wie z. B. die Instandhaltung von Maschinen [Ab15b]. Die vorausgewählten Produkte und Dienstleistungen müssen die aufgestellten Muss-Anforderungen für Produkte (s. Abschnitt 5.2) erfüllen. Außerdem ist es möglich, dass mehrere Produkte und/oder Dienstleistungen gleichzeitig in einer Lernfabrik genutzt und deshalb zu einem Konfigurationsszenario zusammengefasst werden.

Zur **Recherche möglicher Produkte und Dienstleistungen** in der zu konfigurierenden Lernfabrik sind die Rahmenbedingungen der betreibenden Organisation zu beachten:

- Handelt es sich bei der betreibenden Organisation um ein *Unternehmen*, sollen mögliche Produkte im eigenen Produktionssystem herangezogen werden. Werden die Primärziele Weiterbildung und/oder Lehre verfolgt, fällt der Transfer des Gelernten auf weitere Produkte im eigenen Produktionssystem leichter. Auch für das Primärziel Forschung trifft dies zu, da neues Wissen leichter im eigenen Produktionssystem umgesetzt werden kann.
- Handelt es sich bei der betreibenden Organisation um ein *Forschungsinstitut*, ist die Vorauswahl möglicher Produkte nicht an ein bestehendes Produktionssystem geknüpft. In diesem Fall kann sich die Recherche zum einen an bestehenden Produkten in anderen Lernfabriken orientieren und zum anderen um kreative Vorschläge ergänzt werden. Beispiele zu eingesetzten Produkten in Lernfabriken finden sich in ABELE ET AL. [AMT19].

Neben Produkten und Dienstleistungen, die in realen Produktionssystemen vorzufinden sind, gibt es die Möglichkeit, modifizierte Produkte und Dienstleistungen einzusetzen, wie z. B. Miniaturversionen [Ti15c]. Dies kann bspw. sinnvoll sein, wenn kein reales Produkt und keine reale Dienstleistung die aufgestellten Muss-Anforderungen erfüllt (z. B. zur Handhabbarkeit des Produkts). Die modifizierten Produkte und Dienstleistungen sollten grundlegend zur Erfüllung der Primärziele geeignet sein. Für die Primärziele Weiterbildung und Lehre sollte geprüft werden, ob die intendierten Kompetenzen mithilfe der Produkte in Trainingsszenarien adressiert werden können. Außerdem sollte die Frage beantwortet werden, wie hoch die Anzahl der verschiedenen Produkte und Dienstleistungen, die Anzahl möglicher Varianten und die Anzahl der kundenindividuellen Merkmale sind.

Im nächsten Schritt sollte eine **Bewertung der vorausgewählten Produkte und Dienstleistungen**, welche die Muss-Anforderungen erfüllen, stattfinden. Aus den produktbezogenen Kann-Anforderungen werden Bewertungskriterien abgeleitet, mit denen die potenziellen Produkte bewertet werden (s. Tabelle 5.2). Zur Gewichtung der Bewertungskriterien wird ein Paarvergleich genutzt [BT52]. Die Ermittlung des Nutzwerts des potenziellen Produkts erfolgt durch eine Nutzwertanalyse [ZW83]. Zur Nutzung beider Methoden wird auf Abschnitt 5.4.1 sowie zu möglichen Bewertungskriterien auf Abschnitt 5.4.2 verwiesen. Die Berechnung des produktbezogenen Nutzwerts N_{Produkt} ist in Formel (21) dargestellt und ergibt sich aus dem Summenprodukt der Gewichtung $g_{k_{\text{Produkt}}}$ und der Bewertung $e_{\text{Produkt},k_{\text{Produkt}}}$ der produktbezogenen Bewertungskriterien K_{Produkt} [Kr22]:

$$N_{\text{Produkt}} = \sum_{k_{\text{Produkt}}=1}^{K_{\text{Produkt}}} g_{k_{\text{Produkt}}} \cdot e_{\text{Produkt},k_{\text{Produkt}}} \quad (21)$$

Für die weitere Vorgehensweise hinsichtlich der Entscheidung, welches Produkt ausgewählt werden soll, existieren zwei Möglichkeiten [Kr22]:³⁷

1. Iterativer Entscheidungsprozess

Das Produkt oder die Dienstleistung, die bei der Bewertung am besten abgeschnitten hat, wird ausgewählt und weiterverfolgt. Demnach findet zunächst die Auswahl des Produkts oder der Dienstleistung statt und im nächsten Schritt die Auswahl von Konfigurationsalternativen.

2. Synchroner Entscheidungsprozess

Eine Teilmenge der vorausgewählten und bewerteten Produkte und Dienstleistungen wird weiterverfolgt. Die Entscheidung, welche Produkte und Dienstleistungen ausgewählt werden, erfolgt durch die Anwendung des Optimierungsmodells. Hierzu wird das Optimierungsmodell für jedes Produkt bzw. jede Dienstleistung aufgestellt. Um eine Entscheidung zu treffen, wird der Gesamtnutzen $N_{\text{Konfiguration 1}}$ der jeweiligen Konfigurationen betrachtet. Dieser sollte jedoch über die verschiedenen Produkt- und Dienstleistungsszenarien hinweg vergleichbar sein. Daher erfolgt eine Anpassung des Gesamtnutzens durch zwei Faktoren:

- dem relativen Nutzwert der Produkte und Dienstleistungen zueinander: $\frac{N_{\text{Produkt 1}}}{N_{\text{Produkt 2}}}$. Ist der direkte Nutzwert eines Produkts im Vergleich zu einem anderen Produkt höher, sorgt dieser Faktor für einen höheren Gesamtnutzen bei der Konfiguration mit Produkt 1.
- der Anzahl der eingesetzten Fabrikbereiche: $\frac{I_{\text{Produkt 2}}}{I_{\text{Produkt 1}}}$

Die Anzahl der eingesetzten Fabrikbereiche erhöht den maximal möglichen Gesamtnutzen einer Konfiguration. Besitzt das betrachtete Produkt mehr oder weniger Fabrikbereiche als das Vergleichsprodukt, sorgt dieser korrigierende Faktor für die Vergleichbarkeit. Besitzt Produkt 1 z. B. mehr Fabrikbereiche, verkleinert sich der Nutzen der Konfiguration.

Beim synchronen Entscheidungsprozess ist ein Vergleichsprodukt (hier Produkt 2) auszuwählen. Die Auswahl des Vergleichsprodukts verändert das Ergebnis hinsichtlich der Rangfolge der auszuwählenden Produkte nicht. Der angepasste Nutzwert der Konfiguration berechnet sich aus Formel (22):

$$N_{\text{Konfiguration 1,angepasst}} = N_{\text{Konfiguration 1}} \cdot \frac{N_{\text{Produkt 1}}}{N_{\text{Produkt 2}}} \cdot \frac{I_{\text{Produkt 2}}}{I_{\text{Produkt 1}}} \quad (22)$$

Der iterative Entscheidungsprozess ist mit weniger Aufwand verbunden, da in den nächsten Vorgehensschritten nur für ein Konfigurationsszenario Fabrikbereiche und Konfigurationsalternativen abzuleiten und zu bewerten sind. Allerdings ist es möglich, dass durch die anderen vorausgewählten Produkte und Dienstleistungen Konfigurationen entstehen, die einen wesentlich höhere

³⁷ Dies gilt analog zu betrachteten Dienstleistungen.

Gesamtnutzen erzielen. Deshalb sollte an dieser Stelle eine Abwägung stattfinden, ob der iterative oder der synchrone Entscheidungsprozess gewählt wird. Die nachfolgenden Abschnitte beziehen sich auf den iterativen Entscheidungsprozess, d. h., dass ein Produkt ausgewählt wurde. Die weiteren Schritte können jedoch entsprechend der Anzahl der betrachteten Produkte und Dienstleistungen mehrfach angewendet werden, sofern der synchrone Entscheidungsprozess gewählt wird [Kr22].

5.3.2 Fabrikbereiche

Ein Fabrikbereich stellt einen flächenbezogenen Bereich in der Lernfabrik dar, der Fabrikelemente enthält. Dabei kann zwischen direkten und indirekten Fabrikbereichen unterschieden werden:

- **Direkte Fabrikbereiche:** Als Ausgangspunkt dient der Wertstrom zur Herstellung des ausgewählten Produkts (in Abschnitt 5.3.1). Ausgehend von den Stücklisten der ausgewählten Produkte wird die Eignung möglicher Herstellungsverfahren betrachtet [WW10]. Als Grundlage bietet die DIN 8580 mögliche Verfahren, die in die Gruppen Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten und Stoffeigenschaften ändern eingeteilt werden [De03].
- **Indirekte Fabrikbereiche:** Neben direkten Bereichen für die Wertschöpfung der ausgewählten Produkte und Dienstleistungen beinhaltet eine Lernfabrik zudem indirekte Fabrikbereiche, welche hinsichtlich der Primärziele notwendig, jedoch nicht direkt wertschöpfend sind [Bu09]. Als Beispiele können Bereiche für Steuerung und Planung, Logistik, Produktentwicklung, Shopfloor Management und Gruppenarbeit bei Schulungen genannt werden.

Für die einzelnen Fabrikbereiche sollte vorgegeben werden, ob diese in der Lernfabrik enthalten sein müssen oder ob es sich um optionale Fabrikbereiche handelt. In diesem Fall wird das Produkt der Lernfabrik um Einkaufsteile oder Dienstleistungen ergänzt. Bei optionalen Fabrikbereichen existiert eine Konfigurationsalternative, die keine Fabrikelemente enthält und somit keinen Nutzwert besitzt, jedoch auch keine Ressourcen verbraucht. Werden in der Lernfabrik auf der einen Seite zu wenige Fabrikbereiche dargestellt, ist dies wenig realistisch; werden auf der anderen Seite viele Fabrikbereiche dargestellt, ist ein hohes Budget und ein entsprechend hoher Flächenbedarf für die Konfiguration erforderlich. Die Entscheidung, ob ein Fabrikbereich tatsächlich dargestellt wird, wird durch die Algorithmen unterstützt.

Im Anschluss können mögliche Wertströme der zu konfigurierenden Lernfabrik aufgezeigt werden. Optionale Prozesse sollten dabei gesondert gekennzeichnet werden. Dieser Schritt bietet einen Überblick und vereinfacht die konkrete Ausgestaltung der Konfigurationsalternativen im nächsten Abschnitt, insbesondere für den indirekten Fabrikbereich „Intralogistik“.

5.3.3 Konfigurationsalternativen und Fabrikelemente

Konfigurationsalternativen stellen konkrete Ausgestaltungsformen von Fabrikbereichen dar (s. Abschnitt 4.1.1). In der Regel existieren mehrere Konfigurationsalternativen pro Fabrikbereich und bei der Entwicklung von Lernfabriken müssen entsprechende Entscheidungen getroffen werden, welche Konfigurationsalternative gewählt werden. Konfigurationsalternativen bestehen aus einem oder mehreren Fabrikelementen: Bspw. kann es für den Fabrikbereich „Fräsen“ sinnvoll sein, mehrere Fräsmaschinen in einer Konfigurationsalternative zusammenzufassen, welche verschiedene Anforderungen erfüllen. Zur Erfassung von Fabrikelementen ist zunächst eine Marktrecherche durchzuführen und im Anschluss sind Hersteller zu kontaktieren, um fehlende Daten und Angaben ergänzen zu können (entsprechend den gesetzten Anforderungen). Darüber hinaus können in diesem Schritt auch kreative Alternativen ergänzt werden, auch wenn diese nicht direkt am Markt angeboten werden und erst zu entwickeln sind.

Die auf diese Weise recherchierten Fabrikelementen werden zu Konfigurationsalternativen zusammengefasst. Für jede Konfigurationsalternative sind die gestellten Muss-Anforderungen kontinuierlich zu überprüfen (s. Abschnitt 5.2). Für die Primärziele Weiterbildung und Lehre ist zu prüfen, ob die intendierten Kompetenzen durch jede Konfigurationsalternative erreicht werden können. In Bezug auf das Primärziel Forschung erfolgt diese Prüfung anhand der gesetzten Forschungsziele.

In Abhängigkeit von den Primärzielen kann es sinnvoll sein, dass die Lernfabrik in verschiedenen Zuständen betrieben wird, bspw. in einem verschwendungsreichen, einem verschwendungsarmen oder einem digitalisierten Zustand. Für die Primärziele Weiterbildung und Lehre ergibt sich der Vorteil, dass die Lernenden die Unterschiede zwischen den Zuständen erkennen bzw. selbst implementieren können. In Bezug auf das Primärziel Forschung können die Auswirkungen der unterschiedlichen Zustände verglichen und untersucht werden. Bei der Zusammenstellung der Fabrikelemente zu Konfigurationsalternativen sollte geprüft werden, ob verschiedene Zustände in der Lernfabrik abgebildet werden sollen.

Sollte der synchrone Entscheidungsprozess für die Produktauswahl zugrunde liegen (s. Abschnitt 5.3.1), kann es sein, dass lediglich bestimmte Konfigurationsalternativen für eine Teilmenge der Produkte in Frage kommen. Der Grund hierfür ist, dass die Muss-Anforderungen vom gewählten Produkt abhängen, wie z. B. aufgrund des geforderten Bauraums des Produkts oder dessen Material. Deshalb sollten Konfigurationsalternativen, die nicht alle produktabhängigen Muss-Anforderungen erfüllen, entsprechend ausgeschlossen werden. Dazu wird für alle Konfigurationsalternativen A die Nebenbedingung aus Formel (23) ergänzt:

$$x_A = 0 \quad (23)$$

Außerdem sind Beziehungen zwischen den Konfigurationsalternativen zu beachten. Dadurch ist es möglich, dass die Wahl einer Konfigurationsalternative die Wahl einer anderen Konfigurationsalternative beeinflusst.

- Zum einen kann es sein, dass sich Konfigurationsalternativen (A und B) gegenseitig ausschließen (s. Formel (24)). Dies ist z. B. der Fall, wenn im Fabrikbereich „Fräsen“ ein Fräs- und Drehzentrum gewählt wird, welches eine Drehmaschine enthält.

$$x_A + x_B \leq 1 \quad (24)$$

- Zum anderen kann es sein, dass sich Konfigurationsalternativen (A und B) gegenseitig bedingen (s. Formel (25)). Dies ist bspw. der Fall, wenn die Muss-Anforderungen vorliegt, dass der dargestellte Wertstrom der Lernfabrik nicht unterbrochen werden soll und eine Konfigurationsalternative aus einem vorherigen Prozess gewählt wurde.

$$x_A - x_B = 0 \quad (25)$$

In Bezug auf die Kann-Anforderungen ist es vorteilhaft, für jeden Fabrikbereich eine möglichst heterogene Auswahl an Konfigurationsalternativen vorzusehen. D. h., dass die Konfigurationsalternativen die Kann-Anforderungen unterschiedlich erfüllen, unterschiedlich teuer sind und/oder einen unterschiedlich hohen Flächenbedarf aufweisen. Auf diese Weise kann ein breites Spektrum an möglichen Konfigurationen abgedeckt werden. Die sinnvolle Anzahl der Konfigurationsalternativen pro Fabrikbereich hängt vor allem davon ab, wie viele unterschiedliche Lösungen auf dem Markt bestehen oder selbst entwickelt werden. Allerdings ist auch zu beachten, dass jede Konfigurationsalternative im nächsten Schritt zu bewerten ist. Als Richtwert dient die Empfehlung, bis zu fünf Konfigurationsalternativen pro Fabrikbereich vorzusehen, eine allgemein gültige Aussage kann jedoch nicht getroffen werden.

Für jede Konfigurationsalternative sind die benötigten Daten zu erheben. Während die Abmessungen für Fabrikelemente in den jeweiligen Datenblättern zu finden sind, ist zur Ermittlung der Kosten eine Angebotsanfrage an die Hersteller notwendig. Bei der Herstellernachfrage sollten die gestellten Muss- und Kann-Anforderungen berücksichtigt werden. Das Ergebnis lässt sich üblicherweise in Form von Identifikationskarten (s. Abbildung 5.3) darstellen [WNR14]. Auf der Identifikationskarte sollte der Name der Konfigurationsalternative, der entsprechende Fabrikbereich, die enthaltenen Fabrikelemente, Abmessungen, Kosten, verwendbare Produkte, Angaben zu den Muss- und Kann-Anforderungen sowie Beziehungen zu anderen Konfigurationsalternativen angegeben werden. Die Erstellung von Identifikationskarten bietet zusätzlichen Überblick, ist jedoch mit Mehraufwand verbunden und daher optional.


<i>Fabrikbereich:</i> <i>i</i>		
<i>Konfigurationsalternative:</i> <i>j</i>		
<i>Enthaltene Fabrikelemente:</i> ...		
	<i>Abmessung:</i>	1,70 m x 1,65 m x 1,10 m
	<i>Kosten:</i>	86.000 €
		<i>Verwendbare Produkte:</i>
		- Produkt 1
		- Produkt 3
<i>Angaben zu Kann-Anforderungen:</i>	<i>Beziehungen zu weiteren Konfigurationsalternativen:</i>	
1. ...	• Keine	

Abbildung 5.3: Identifikationskarte zur Dokumentation von Konfigurationsalternativen, eigene Darstellung in Anlehnung an [WNR14]

Als Ergebnis des zweiten Vorgehensschritts stehen die eingesetzten Produkte bzw. das eingesetzte Produkt mit den dazugehörigen Fabrikbereichen und Konfigurationsalternativen fest. Außerdem liegen die benötigten Daten der Ressourcenverbräuche $w_{ij,r}$ für das Optimierungsmodell zur Konfiguration von Lernfabriken vor.

5.4 Vorgehensschritt III: Bewertung der Konfigurationsalternativen

In diesem Abschnitt wird gezeigt, wie die ermittelten Konfigurationsalternativen bewertet werden. Auf diese Weise lassen sich die Nutzwerte der Konfigurationsalternativen berechnen, die für das aufgestellte Optimierungsmodell (s. Kapitel 4) benötigt werden. Zunächst wird die Bewertungsmethode strukturell beschrieben (Abschnitt 5.4.1) und im Anschluss werden die Bewertungskriterien inhaltlich erläutert (Abschnitt 5.4.2).

5.4.1 Bewertungsmethode

Die Bewertung der ermittelten potenziellen Fabrikelemente folgt dem Vorgehen zur Bewertung technischer Systeme [BK97]. Das Ziel der Bewertung besteht darin, für die Konfigurationsalternativen vergleichbare quantitative Nutzwerte n_{ij} zu ermitteln, die für das Optimierungsmodell (Kapitel 4) benötigt werden. Dazu ist es notwendig, dass die Konfigurationsalternativen ij für die gesamte Lernfabrik einheitlich bewertet werden, damit die Nutzwerte vergleichbar sind. Weder für herkömmliche Fabriken noch für Lernfabriken existiert ein solches ganzheitliches Bewertungsverfahren (s. Abschnitte 2.1.4 und 2.3.3).

Die Konfigurationsalternativen werden mithilfe einer Nutzwertanalyse bewertet [Za14]. Die Auswahl der Methode beruht auf ihrer einfachen Anwendbarkeit, da in der gesamten Lernfabrik eine Vielzahl an Konfigurationsalternativen zu bewerten ist. Zudem wird die Nutzwertanalyse häufig in Fabrikplanungsprojekten eingesetzt [WNR14].

Insgesamt sind für jede Lernfabrik I Fabrikbereiche mit jeweils bis zu J Konfigurationsalternativen zu bewerten. Um einen Nutzwert n_{ij} für die Zielfunktion N zu

berechnen, werden K verschiedene Bewertungskriterien berücksichtigt. Dabei sind zwei Schritte notwendig:

- i. die Gewichtung der Bewertungskriterien (g_k) und
- ii. die Bewertung der Fabrikelemente für jedes Kriterium (e_{ijk}).

Die **Gewichtung der Kriterien** (Schritt i) kann durch einen Paarvergleich erfolgen, bei dem jedes Kriterium miteinander verglichen wird und Aussagen darüber getroffen werden, ob das erste Kriterium wichtiger (angegeben mit 2), gleich wichtig (angegeben mit 1) oder weniger wichtig (angegeben mit 0) ist [BT52]. Tabelle 5.3 zeigt eine beispielhafte Anwendung des Paarvergleichs. Durch Summation und Skalierung ergibt sich eine differenzierte Gewichtung.

Tabelle 5.3: Gewichtung der Bewertungskriterien, eigene Darstellung in Anlehnung an [Da63]

	Bewertungs- kriterium 1	Bewertungs- kriterium 2	...	Bewertungs- kriterium k	Σ	Gewichtung
Bewertungskriterium 1		0	...	2	2	28,57 %
Bewertungskriterium 2	2		...	2	4	57,14 %
...
Bewertungskriterium k	0	0	...		1	14,29 %
				Σ	7	100,00 %

Neben dem Paarvergleich ist es möglich, die Gewichtung durch die Methode des Direct Rankings zu bestimmen. Dabei werden die Gewichtungen direkt beeinflusst, indem jedem Bewertungskriterium k Zahlen von 1 (sehr unwichtig) bis 10 (sehr wichtig) zugeordnet werden. Diese können im Anschluss ebenfalls skaliert werden³⁸.

Anschließend erfolgt die **Bewertung der vorausgewählten Konfigurationsalternativen** (Schritt ii) zu den Bewertungskriterien, welche in Abschnitt 5.4.2 detailliert beschrieben werden. Jedes Bewertungskriterium k kann durch die Klassifizierung in „keine“, „schwach“, „moderat“ und „stark“ ausgedrückt werden. Diese Klassifizierung wird durch die Operationalisierung der Bewertungskriterien ermöglicht, indem den Bewertungskriterien spezifische Variablen zugeordnet werden. Die Informationen für die Bewertung der Konfigurationsalternativen können entweder aus Produktkatalogen oder durch Herstelleranfragen entnommen werden. Um den gewichteten Nutzwert n_{ij} zu berechnen, werden quantitative

³⁸ Die gewählte Skalierung bietet zwar einen zusätzlichen Überblick, hat jedoch auf das Ergebnis keinen Einfluss.

Werte für die Klassifizierungen (von „keine“ bis „stark“) definiert. Für die Verteilung der quantitativen Werte gibt es zwei Möglichkeiten:

- Im ersten Fall sind die quantitativen Bewertungswerte e_{ijk} gleichverteilt (z. B. 0 für „keine“, 3 für „schwach“, 6 für „moderat“, 9 für „stark“). Der erste Fall sollte ausgewählt werden, wenn die Konfigurationsalternativen die Ausprägungen ausgeglichen erfüllen sollen.
- Im zweiten Fall sind die quantitativen Bewertungswerte e_{ijk} exponentiell verteilt (z. B. 0 für „keine“, 1 für „schwach“, 3 für „moderat“, 9 für „stark“). Dabei werden im Vergleich zum ersten Fall die höchsten Ausprägungen vergleichsweise höher bewertet. Der zweite Fall sollte ausgewählt werden, wenn es wichtig ist, dass in der Lernfabrik einzelne Konfigurationsalternativen eingesetzt werden, welche die besten Ausprägungen aufweisen sollen.

Für jede Konfigurationsalternative j des Fabrikbereichs i ergibt sich ein Nutzwert n_{ij} aus dem Summenprodukt der Gewichtung für das Kriterium g_k und der Bewertung für jedes Kriterium e_{ijk} nach der Formel (26). Die Bewertung hängt von der definierten Variablen a_{ijk} für das Bewertungskriterium k ab. Die Nutzwerte werden zur Berechnung der Zielfunktion N in Formel (2) verwendet, in der die binäre Variable x_{ij} angibt, ob eine Konfigurationsalternative für die Lernfabrik ausgewählt wird.

$$n_{ij} = \sum_{k=1}^K g_k \cdot e_{ijk}(a_{ijk}) \quad (26)$$

$$N = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J n_{ij} x_{ij} \quad (2)$$

Tabelle 5.4 zeigt die Struktur der Bewertungsmethode für die Konfigurationsalternativen. Dabei wird Formel (26) in der Spalte „Nutzwert“ angewendet.

Tabelle 5.4: Bewertungsmethode für Konfigurationsalternativen, eigene Darstellung

		Bewertungskriterien			Nutzwert
		Bewertungs-kriterium 1	Bewertungs-kriterium 2	...	
Fabrikbereich	Gewichtung →	g_1	g_2	...	
	Konfigurationsalternative				
Fabrikbereich 1	Alternative 1.1	e_{111}	e_{112}	...	n_{11}
	Alternative 1.2	e_{121}	e_{122}	...	n_{21}

Fabrikbereich 2	Alternative 2.1	e_{211}	e_{212}	...	n_{21}
	Alternative 2.2	e_{221}	e_{222}	...	n_{22}

...

Um die Konfigurationsalternativen bewerten zu können, wird jedes Bewertungskriterium operationalisiert [He14], [Ab16]. Dazu werden zu den entsprechenden Variablen, welche die Bewertungskriterien abbilden, vier Intervalle von „keine“ bis „stark“ definiert. Auf diese Weise findet die Bewertung der Konfigurationsalternativen durch die Einordnung in die festgelegten Bewertungsintervalle statt. In Tabelle 5.5 werden die gleichverteilten Bewertungsintervalle für die Ausprägungen der Bewertungskriterien a_{ijk} dargestellt.

Tabelle 5.5: Bewertungsintervalle in Abhängigkeit von der Ausprägung, eigene Darstellung

Bewertung e_{ijk}	Bewertungsintervall
Stark	$a_{k,\min} + \frac{3}{4}\Delta a_k < a_{ijk} \leq a_{k,\max}$
Moderat	$a_{k,\min} + \frac{1}{2}\Delta a_k < a_{ijk} \leq a_{k,\min} + \frac{3}{4}\Delta a_k$
Schwach	$a_{k,\min} + \frac{1}{4}\Delta a_k < a_{ijk} \leq a_{k,\min} + \frac{1}{2}\Delta a_k$
Keine	$a_{k,\min} \leq a_{ijk} \leq a_{k,\min} + \frac{1}{4}\Delta a_k$

Die darin verwendete Spannweite der Ausprägung für das Bewertungskriterium k berechnet sich nach Formel (27) aus der Differenz zwischen den maximalen Wert der Ausprägung $a_{k,\max}$ und dem minimalen Wert $a_{k,\min}$ aller Konfigurationsalternativen des jeweiligen Anwendungsfalls.

$$\Delta a_k = a_{k,\max} - a_{k,\min} \tag{27}$$

5.4.2 Bewertungskriterien

Während die Muss-Anforderungen in der Vorauswahl der Konfigurationsalternativen berücksichtigt werden, sind die Konfigurationsalternativen zu bevorzugen, welche die aufgestellten Kann-Anforderungen bestmöglich erfüllen (s. Abschnitt 5.2). Aus diesem Grund sollten die Bewertungskriterien zur Ermittlung der Nutzwerte für die Konfigurationsalternativen aus den Kann-Anforderungen hergeleitet werden. Die Operationalisierung der Bewertungskriterien sollte dabei möglichst objektiv auf quantitativen Werten aufbauen.

Zur Unterstützung bei der Konfiguration von Lernfabriken wurden in dieser Forschungsarbeit Bewertungskriterien, die in bisherigen Lernfabrik-Projekten berücksichtigt wurden, aus der Literatur hergeleitet und operationalisiert. Zur Herleitung dieser Bewertungskriterien wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Dazu wurden die Datenbanken ScienceDirect und Google Scholar nach Literatur durchsucht, die mögliche Bewertungskriterien für Konfigurationsalternativen und Fabrikelemente in Lernfabriken enthalten [KM21]. Für Lernfabriken mit den Primärzielen Weiterbildung und Lehre sollten die intendierten Kompetenzen aus den Kompetenzmatrizen berücksichtigt werden. Die Bewertungskriterien dieser Forschungsarbeit fokussieren sich auf Lernfabriken für die schlanke Produktion, in denen fachlich-methodische Kompetenzen für die schlanke Produktion entwickelt werden sollen. Allerdings können die ermittelten Bewertungskriterien auf weitere Kompetenzbereiche adaptiert werden.

Interaktionsfähigkeit

Die Entwicklung von Kompetenzen steht bei Lernfabriken mit den Primärzielen Weiterbildung und Lehre im Vordergrund [Ab15b]. Fachlich-methodische Kompetenzen betrachten dabei die Anwendung von Methoden als Lerninhalt [Te20]. Die Methoden der schlanken Produktion werden durch die vorgestellten Gestaltungsprinzipien der VDI 2870 strukturiert (s. Abschnitt 2.2) [Ve12]. Auf diesen Methoden bauen die intendierten fachlich-methodischen Kompetenzen, die in einer Lernfabrik geschult werden, auf.

Aktives Lernen stellt einen wichtigen Teil der Aktivitäten in Lernfabriken dar und wird durch die Interaktion mit der Produktionsumgebung bzw. den Fabrikelementen ermöglicht [La08]. Demnach sollten Konfigurationsalternativen für Lernfabriken möglichst interaktiv sein. Die zu betrachtenden Interaktionen können aus den Lernzielen und intendierten Kompetenzen ermittelt werden. Dazu sollte eine Liste an kompetenzbasierten Interaktionen erstellt werden. Je mehr kompetenzbasierte Interaktionsmöglichkeiten eine Konfigurationsalternative bereitstellen kann, desto höher ist der Nutzwert der Konfigurationsalternative. In Anhang 2.2 findet sich eine Liste an Interaktionen, die betrachtet werden sollten. Beispiele für Interaktionen sind:

- das Umstellen eines Arbeitsplatzes zur Verbesserung des Fabriklayouts,
- die Organisation von Werkzeugen auf dem Arbeitsplatz zur Umsetzung der Methode 5S,
- das Messen von Zykluszeiten zur Abtaktung von Arbeitsplätzen,
- das Sammeln von Prozessdaten für eine Wertstromanalyse.

Auf dieser Basis kann die Bewertung der Interaktionsfähigkeit in zwei Schritten vorgenommen werden. Im ersten Schritt sollte die Relevanz der Interaktionen ermittelt werden. Diese ergibt sich aus der relativen Häufigkeit der Interaktionen aus den Methoden der schlanken Produktion. Diese Beziehung kann in einer Matrix dargestellt werden (s. Tabelle 5.6 oberer Bereich). Wenn eine bestimmte Interaktion notwendig ist, um eine Kompetenz für eine Methode der schlanken Produktion zu entwickeln, wird die Interaktion gezählt. Für diese Auswertung sollten die Interaktionen detailliert beschrieben werden.³⁹ Im zweiten Schritt wird ermittelt, ob die Interaktionen mithilfe der in Vorgehensschritt II ermittelten Konfigurationsalternativen durchgeführt werden können. Aus dem Summenprodukt der relativen Häufigkeit und der Durchführbarkeit der Interaktion ergibt sich die Bewertung der Interaktionsfähigkeit, welche in die Klassifizierung „keine“ bis „stark“ zuzuordnen sind (s. Tabelle 5.6, unterer Bereich).

³⁹ Dabei ist zu überprüfen, ob Interaktionen, die sehr relevant sind, als Muss-Anforderung aufgenommen werden sollten.

Tabelle 5.6: Bewertung der Interaktionsfähigkeit, eigene Darstellung

1. Relevanz der Interaktionen ermitteln									
Gestaltungsprinzip	Methode	Interaktionsfähigkeit							
		Werkzeug aussortieren	Werkzeug systematisieren	Prozess standardisieren	Prozessdaten sammeln	Zykluszeiten messen	Arbeitsplatz umstellen	...	
Standardisierung	5S								
	Prozessstandardisierung								
...	...								
	Relevanz der Interaktionen	3 %	3 %	7 %	8 %	6 %	4 %	...	

2. Interaktionsfähigkeit der Konfigurationsalternativen bewerten									
Fabrikbereich	Konfigurationsalternative	Interaktionsfähigkeit							Bewertung Interaktionsfähigkeit
		Werkzeug aussortieren	Werkzeug systematisieren	Prozess standardisieren	Prozessdaten sammeln	Zykluszeiten messen	Arbeitsplatz umstellen	...	
Fabrikbereich 1	Konfigurationsalternative 1.1								stark
	Konfigurationsalternative 1.2								moderat

...

Umsetzung der Gestaltungsprinzipien

Die Gestaltungsprinzipien der schlanken Produktion (VDI 2870) sollten in Lernfabriken für die schlanke Produktion umgesetzt werden oder umsetzbar sein. So kann die Lernfabrik als Best-Practice-Beispiel dienen und motiviert so die Schungsteilnehmenden, diese im eigenen Unternehmen umzusetzen [Ru98]. Dieses Bewertungskriterium ist für alle Primärziele einer Lernfabrik relevant. In der vorliegenden Forschungsarbeit werden die Gestaltungsprinzipien der schlanken Produktion aus der VDI 2870 zugrunde gelegt (s. auch Abschnitt 2.2.2 und 2.2.3) [Ve12]. Dazu gehört die Vermeidung von Verschwendung, Standardisierung, kontinuierliche Verbesserung, Null-Fehler-Prinzip, Fließprinzip, Pull-Prinzip, Beschäftigtenorientierung und -führung sowie das visuelle Management. Konfigurationsalternativen mit einer höheren Anzahl an umgesetzten Gestaltungsprinzipien sind höher zu bewerten. Dabei ist für jedes Gestaltungsprinzip festzulegen, auf welche Weise dieses in der Lernfabrik umsetzen ist. Die Zuordnung in „keine“ bis „stark“ kann dabei so vorgenommen, dass ausgehend von der maximalen Anzahl an Gestaltungsprinzipien gleich große Intervalle zur Bewertung gebildet werden.

Integrierbarkeit von Fehlern und Verschwendung

Der didaktische Ansatz des problembasierten Lernens geht davon aus, dass Lernprozesse durch das Lösen von Problemen gefördert werden [HJL08]. Somit stellt dies ein wichtiges didaktisches Prinzip für Lernfabriken mit den Primärzielen Weiterbildung und Lehre dar [ABN19]. Problembasiertes Lernen wird durch die Integration von Fehlern und Verschwendung in den Produktionsprozessen bzw. in den Konfigurationsalternativen möglich [BF99]. Die betrachteten Fehler und Verschwendungsarten können ebenfalls aus den intendierten Kompetenzen ermittelt werden: Bspw. eignet sich als Ausgangssituation für die fachlich-methodische Kompetenz zur Methode der systematischen Reduzierung der Rüstzeit (SMED) eine zu hohe Rüstzeit. Schulungsteilnehmende können auf diese Weise lernen, Verschwendung zu erkennen und mithilfe der erlernten Methode zu vermeiden. Mit zunehmender Anzahl an integrierbaren Fehlern und Verschwendungen steigt somit auch der Nutzwert der Konfigurationsalternative. Die Integrierbarkeit von Fehlern und Verschwendung ist vor allem für die Primärziele Weiterbildung und Lehre relevant. Allerdings ist dieses Bewertungskriterium auch für das Primärziel Forschung wichtig: Neue Methoden und Technologien zielen darauf ab, in der Praxis vorkommende Fehler und Verschwendung noch besser zu erkennen und zu vermeiden. Auch für dieses Bewertungskriterium sind die Bewertungen von „keine“ bis „stark“ anhand der Anzahl der Fehler und Verschwendungen in gleich große Intervalle einzuteilen.

Realitätsnähe

Der Transfer der intendierten Kompetenzen in die Praxis wird von der Realitätsnähe der Lernfabrik beeinflusst [PTL20]. Auch zur Validierung von Forschungsergebnissen sollten Lernfabriken möglichst realistisch gestaltet sein. Bereits in der Definition für Lernfabriken wird die Realitätsnähe als elementarer Aspekt angesehen (s. Abschnitt 2.3.2) [Ab15b]. Daher ist die Realitätsnähe für alle Primärziele einer Lernfabrik relevant. Konfigurationsalternativen bilden die industrielle Realität umso besser ab, je häufiger sie in tatsächlichen Produktionsumgebungen eingesetzt werden. Für Lernfabriken in Unternehmen sollten dabei die eigenen Produktionsumgebungen betrachtet werden. Wird die zu konfigurierende Lernfabrik von einer Universität betrieben, können dazu die Hersteller der Fabrikelemente nach einer Einschätzung oder vergleichenden Verkaufszahlen befragt werden. Für die Bewertungen „keine“ bis „stark“ sollten auch hier die Intervallgrenzen so festgelegt werden, dass sich gleich große Intervalle bilden.

Einsatz digitaler Technologien

Immer mehr Lernfabriken nutzen digitale Technologien, um deren Einsatz in der Produktion zu erforschen, neue Inhalte zu schulen oder die Lernprozesse selbst zu verbessern [Li19], [KM22b]. Die Möglichkeiten für betreibende Organisationen

von Lernfabriken steigen mit der Anzahl der in den Konfigurationsalternativen eingesetzten Technologien [Ba17]. Zu diesem Zweck sollte eine Liste relevanter Technologien erstellt werden, die für die zu konfigurierenden Lernfabrik in Betracht gezogen werden. Als Grundlage können dazu die Gestaltungsprinzipien des Industrie 4.0-Ansatzes aus Abschnitt 2.2.3 dienen. Eine beispielhafte Liste an Technologien, die in Lernfabriken betrachtet werden, findet sich in Anhang 2.3. Der Einsatz jeder neuen Technologie sollte zielorientiert erfolgen. Die betrachteten Technologien sollten sich für Lernfabriken mit den Primärzielen Weiterbildung und Lehre aus den intendierten Kompetenzen oder den eingesetzten Lernmedien ergeben: Mit Virtual Reality können bspw. Lernprozesse auf einzelne Schulungsteilnehmende personalisiert werden [Ri20b], [Kr21b]. Für Lernfabriken mit dem Primärziel Forschung sind die betrachteten Technologien aus den Forschungszielen abzuleiten. Technologien, die sich nicht aus den Primärzielen ergeben, erhöhen den Nutzwert der zu konfigurierenden Lernfabrik nicht und sollten deshalb nicht betrachtet werden. Es werden gleich große Intervalle zur Anzahl der betrachteten Technologien festgelegt, um die Bewertung anhand der Klassifizierung von „keine“ bis „stark“ vorzunehmen. Auch hier ist vorab zu überprüfen, ob bestimmte Technologien als Muss-Anforderung aufgenommen werden sollten.

Aktualität

Um den aktuellen Stand der Technik abzubilden, sollten möglichst aktuelle Konfigurationsalternativen ausgewählt werden [U19]. Die betrachtete Variable für das Bewertungskriterium Aktualität ist das Jahr der Markteinführung. Dieses kann i. d. R. beim Hersteller erfragt werden. Besteht die Konfigurationsalternative aus mehreren Fabrikelementen sollte entsprechend deren Mittelwert herangezogen werden. Die Aktualität ist vor allem für Lernfabriken mit dem Primärziel Forschung relevant. Es ist zu beachten, dass dieses Bewertungskriterium im Konflikt mit dem Bewertungskriterium Realitätsnähe stehen kann, da sehr aktuelle Konfigurationsalternativen meist noch nicht weit verbreitet sind. Die Jahre der Markteinführung sollten auch hier in gleich große Intervalle eingeteilt werden, um die Konfigurationsalternativen in die Klassifizierung einzuordnen.

Wandlungsfähigkeit

Sich ändernde Umweltfaktoren beeinflussen den Betrieb von Lernfabriken, die deshalb möglichst wandelbar sein sollten [Wa14]. Nach WIENDAHL ET AL. werden fünf Wandlungsbefähiger unterschieden: Universalität, Modularität, Mobilität, Kompatibilität und Skalierbarkeit (s. Abschnitt 2.1.2) [WNR14]. Diese werden in der Bewertungssystematik jeweils als einzelne Bewertungskriterien bewertet [WNR14]:

- Die *Universalität* steigt mit der Anzahl unterschiedlicher Anforderungen zur Anpassungsfähigkeit.
- Die *Modularität* steigt mit der Anzahl standardisierter und unabhängiger Komponenten.
- Die *Mobilität* steigt mit dem abnehmenden Bewegungsaufwand.
- Die *Kompatibilität* steigt mit der Anzahl der Vernetzungs- und Anschlussmöglichkeiten.
- Die *Skalierbarkeit* steigt mit der Anzahl der Möglichkeiten zur Erweiter- und Reproduzierbarkeit.

Für die einzelnen Bewertungskriterien sind jeweils zur Klassifizierung gleich große Intervalle zu bilden.

Nachhaltigkeit

Nachhaltigkeit spielt für produzierende Unternehmen und Lernfabriken eine wachsende Rolle [He14], [Kr14], [We21]. Konfigurationsalternativen mit geringen Ressourcenverbräuchen (wie z. B. elektrischer Energie oder Pneumatik) erhalten eine höhere Bewertung. Für die Bewertung muss ein Vergleich zwischen allen potenziellen Konfigurationsalternativen berücksichtigt werden. Die benötigten Daten zu den Ressourcenverbräuchen können bei den Herstellern angefragt werden.

Vorbereitungsaufwand

Auch der Vorbereitungsaufwand für den Betrieb der Lernfabrik sowie für Schulungen sollte möglichst gering sein. Durch einen geringen Vorbereitungsaufwand können die Primärziele einer Lernfabrik besser adressiert werden. Konfigurationsalternativen, deren Aufwand gering ist (z. B. durch einen geringen oder vereinfachten Wartungsaufwand) schneiden bei diesem Bewertungskriterium entsprechend besser ab. In Tabelle 5.7 werden die Bewertungskriterien für Konfigurationsalternativen sowie die definierten Variablen dargestellt. Das detaillierte Bewertungsschema ist in Anhang 2.4 zu finden.

In Tabelle 5.7 zeigt zusammenfassend die Zuordnung der verwendeten Variablen zu den Bewertungskriterien. Eine vom Autor dieser Forschungsarbeit erarbeitete Gewichtung hinsichtlich der Primärziele Weiterbildung/Lehre und Forschung befindet sich in Anhang 2.5.

Tabelle 5.7: Bewertungskriterien zur Auswahl von Konfigurationsalternativen, eigene Darstellung

#	Bewertungskriterium k	Verwendete Variable a_{ijk}
1	Interaktionsfähigkeit	Anzahl der kompetenzbasierten Interaktionen mit der Konfigurationsalternative (gewichtet nach Relevanz)
2	Implementierung von Gestaltungsprinzipien	Anzahl der implementierten Gestaltungsprinzipien schlanker Produktionssysteme in der Konfigurationsalternative
3	Integrierbarkeit von Fehlern und Verschwendung	Anzahl der integrierbaren Fehler und Verschwendungsarten in der Konfigurationsalternative
4	Realitätsnähe	Häufigkeit des Einsatzes der Konfigurationsalternative in der betrieblichen Praxis
5	Einsatz digitaler Technologien	Anzahl der eingesetzten digitalen Technologien in der Konfigurationsalternative
6	Aktualität	Durchschnittliches Jahr der Markteinführung der in der Konfigurationsalternative enthaltenen Fabrikelemente
7	Universalität	Anpassungsfähigkeit im Hinblick auf unterschiedliche Anforderungen, die in der Konfigurationsalternative berücksichtigt werden
8	Modularität	Anzahl der standardisierten und funktionalen Elemente in der Konfigurationsalternative
9	Mobilität	Grad der Mobilität der in der Konfigurationsalternative enthaltenen Fabrikelemente
10	Kompatibilität	Anzahl der Anschluss- und Vernetzungsmöglichkeiten der in der Konfigurationsalternative enthaltenen Fabrikelemente
11	Skalierbarkeit	Anzahl der Möglichkeiten zur Erweiter- und Reproduzierbarkeit der in der Konfigurationsalternative enthaltenen Fabrikelemente
12	Nachhaltigkeit	Durchschnittlicher Verbrauch verschiedener Ressourcen der Konfigurationsalternative
13	Vorbereitungsaufwand	Geschätzter Zeitaufwand für die Vorbereitung und Wartung der Konfigurationsalternative

Zusätzlich zu den genannten Bewertungskriterien können projektspezifisch weitere Kriterien relevant sein, die für die Anwendung der Methodik entsprechend zu operationalisieren sind. Diese sollten, wie erwähnt, aus den Kann-Anforderungen (in Vorgehensschritt I) abgeleitet werden. Um die Konfigurationsalternativen zu bewerten, werden die Ausprägungen a_{ijk} entsprechend Tabelle 5.5 zugeordnet. Als Ergebnis liegen die Nutzwerte n_{ij} aller Konfigurationsalternativen und damit alle benötigten Daten für das aufgestellte Optimierungsmodell zur Konfiguration von Lernfabriken vor.

5.5 Vorgehensschritt IV: Auswahl und Analyse

Im letzten Vorgehensschritt wird auf Basis der ermittelten Daten der Vorgehensschritte I bis III eine Auswahl zur Konfiguration der Lernfabrik getroffen, d. h. für jeden Fabrikbereich wird jeweils eine Konfigurationsalternative ausgewählt

(Abschnitt 5.5.1). Außerdem kann die ermittelte Konfiguration weiter analysiert werden (Abschnitt 5.5.2).

5.5.1 Auswahl der Konfigurationsalternativen

Zur Auswahl der Konfigurationsalternativen werden die in Abschnitt 4.2.2 entwickelten Optimierungsalgorithmen angewendet, um die exakte Lösung zu ermitteln. Dabei sollte festgelegt werden, welche Algorithmen zur Lösung des Optimierungsmodells herangezogen werden:

- Zur Lösung des MMKP wird der vom Autor dieser Forschungsarbeit entwickelte *USBB-Algorithmus* empfohlen, da dieser das MMKP optimal löst (s. Abschnitt 4.2.1). Handelt es sich allerdings um eine zu große Problem Instanz, könnte die Rechenzeit zur optimalen Lösung zu hoch werden. In diesem Fall kann beispielhaft eine Heuristik herangezogen werden [KKM21].
- Zur Lösung des FCP (welches die Abmessungen berücksichtigt) existiert bisher ausschließlich der im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelte *FCP-Algorithmus* (s. Abschnitt 4.2.2), der deshalb entsprechend anzuwenden ist.
- Für die im FCP benötigte Implementierung eines ersten Layouts eignet sich bei einfachen Wertströmen der *Next-Fit-Algorithmus* (s. Abschnitt 4.2.2). Mit dem *Best-Fit-Algorithmus* kann eine höhere Flächenauslastung ermöglicht werden, sofern die Flächenvorgabe sehr restriktiv ist. Beide Algorithmen zeichnen sich durch kurze Rechenzeiten aus. Ist bei komplexen Wertströmen die Optimierung des Layouts nach Materialflussbeziehungen gefordert, können *genetische Algorithmen auf das Facility Layout Problem (FLP)* angewendet werden – mit dem Nachteil von langen Rechenzeiten [Kr21a].

Nach dieser Festlegung werden die Konfigurationsalternativen entsprechend algorithmenbasiert ausgewählt.

5.5.2 Analyse der ermittelten Konfiguration

Zur Unterstützung der Entscheidungsfindung können die ermittelten Konfigurationen weiter analysiert werden, um die Entscheidungsfindung zu vereinfachen:

- *Budget (C_{Budget})*: Durch die Variation des Budgets kann ermittelt werden, um welchen Betrag das Budget erhöht werden muss, um die nächstbessere Konfiguration zu erhalten. Dazu werden minimale und maximale Werte für das Budget definiert und die jeweiligen optimalen Konfigurationen ermittelt. Anhand einer Nutzen-Budget-Kurve kann so entschieden werden, ob es sich lohnt, das Budget anzupassen. Dies kann z. B. der Fall sein, wenn sich in der Nutzen-Budget-Kurve zeigt, dass mit einer geringen Budgeterhöhung eine hohe Nutzenerhöhung möglich ist.
- *Abmessungen der Lernfabrik (B und L)*: Je nach Planungsphase stehen die finalen Abmessungen der Lernfabrik noch nicht fest. Die Lösung des

Optimierungsmodell kann dazu genutzt werden, verschiedene Szenarien zur Abmessung der Lernfabrik zu berechnen. Dazu sollten diese Szenarien zur Abmessung festgelegt werden. Eine Standortwahl kann auf Basis dieser Überlegungen einfacher getroffen werden, da ersichtlich ist, wie hoch der Nutzen der einzelnen Abmessungsszenarien ist. Die Analyse verschiedener Abmessungsszenarien kann mit der Budgetanalyse kombiniert werden, indem zu jedem Abmessungsszenario eine Nutzen-Budget-Kurve ermittelt wird.

- *Abgebildetes Produkt (oder Dienstleistung)*: Sofern der synchrone Entscheidungsprozess zur Auswahl des Produkts oder der dargestellten Dienstleistung ausgewählt wurde, können die Nutzwerte der Produkte bzw. Dienstleistungen verglichen werden. Während beim iterativen Entscheidungsprozess die Auswahl des Produkts bzw. der Dienstleistung in Vorgehensschritt III zu treffen ist, erfolgt die Auswahl beim synchronen Entscheidungsprozess erst in diesem Vorgehensschritt (IV).
- *Kriterien-Gewichtung g_k* : Die Gewichtungswerte der Kriterien sind anwendungsfallbezogen. Durch die Variation der Gewichtungswerte kann ermittelt werden, wie robust die ermittelte Konfiguration gegenüber Veränderung der Gewichtungen ist. Dies trifft sowohl auf die Gewichtung der Konfigurationsalternativen als auch auf die Gewichtung der eingesetzten Produkte bzw. dargestellten Dienstleistungen zu. Dazu werden die einzelnen Gewichtungen sukzessive in positiver sowie negativer Richtung variiert, bis sich die Konfiguration erstmalig verändert.
- *Sensitivitätsanalyse bei weiteren Unsicherheiten*: Bei der Anwendung der Vorgehensschritte I bis III können Unsicherheiten zu den recherchierten Daten vorliegen, wie z. B. zu den Kosten einzelner Konfigurationsalternativen oder zu den Ausprägungen einzelner Variablen zur Bewertung der Konfigurationsalternativen und Produkte. Durch eine Sensitivitätsanalyse werden diese Daten in einem vorgegebenen Intervall sukzessive variiert, bis sich die Konfiguration erstmalig ändert. Auf diese Weise können zugrunde liegende Unsicherheiten bewertet und deren Einfluss auf die Konfiguration eingeschätzt werden. Dies stellt ein gängiges Verfahren bei der Analyse von Optimierungsmodellen dar [RSW08].

Die Ergebnisse der Analysen sollten dem zuständigen Projektteam zur Konfiguration der Lernfabrik vorgestellt werden, welches sich im Anschluss anhand der Resultate auf die tatsächliche Konfiguration der zukünftigen Lernfabriken einigt. Dabei sollte überprüft werden, ob mit der ermittelten Konfiguration die gesetzten Lern- und Forschungsziele umsetzbar sind. Wenn dies nicht der Fall ist, sollten entsprechende Anpassungen erfolgen. Als Ergebnis liegt die bestmögliche Auswahl der Konfigurationsalternativen für jeden Fabrikbereich vor sowie ein erstes Layout, das jedoch noch angepasst werden kann. Schließlich werden die

entsprechenden Fabrikelemente der ausgewählten Konfigurationsalternativen beschafft, womit das Vorgehen zur Konfiguration abgeschlossen ist.

5.6 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde ein Vorgehen vorgestellt, mit dessen Hilfe das Optimierungsmodell zur Konfiguration von Lernfabriken (Kapitel 4) angewendet werden kann (s. Abbildung 5.4). Zunächst wurde die grundsätzliche Struktur und die Zielsetzung des Vorgehens erläutert (s. Abschnitt 5.1), die zum einen auf der Ermittlung der notwendigen Daten für das Optimierungsmodell und zum anderen auf der strukturierten Anwendung basiert.

In *Vorgehensschritt I* werden Anforderungen an die zu konfigurierende Lernfabrik ermittelt (s. Abschnitt 5.2). Dabei wird einerseits zwischen Muss- und Kann-Anforderungen und andererseits hinsichtlich der Konfigurationsebenen (in Lernfabrik, Produkt bzw. Dienstleistung, Fabrikbereich und Fabrikelement) unterschieden. Zur Anwendung des Vorgehens werden Vorarbeiten benötigt, wie z. B. die ausgefüllte Morphologie für Lernfabriken sowie Kompetenzmatrizen.

In *Vorgehensschritt II* (s. Abschnitt 5.3) werden zunächst Produkte und Dienstleistungen ermittelt und bewertet. Daraus werden mögliche Prozesse abgeleitet, welche auf den ermittelten Anforderungen aufbauen. Aus den direkten und indirekten Prozessen ergeben sich Fabrikbereiche für die Lernfabrik. Für jeden Fabrikbereich werden potenzielle Konfigurationsalternativen ermittelt, welche aus einem oder mehreren Fabrikelementen bestehen. Dabei repräsentiert eine Konfigurationsalternative die mögliche Gestaltung eines Fabrikbereichs vollständig. Jedes potenzielle Produkt und jede potenzielle Konfigurationsalternative erfüllt die ermittelten Muss-Anforderungen. Außerdem sind die Ressourcenverbräuche, wie z. B. Kosten oder Abmessungen der einzelnen Konfigurationsalternativen, in diesem Vorgehensschritt zu ermitteln.

Jede Konfigurationsalternative wird in *Vorgehensschritt III* (s. Abschnitt 5.4) anhand einer Bewertungsmethode bewertet. Strukturell setzt sich die Bewertungsmethode aus dem Paarvergleich zur Gewichtung der Kriterien sowie der Nutzwertanalyse zur Quantifizierung des Nutzwerts zusammen. Inhaltlich werden aus den aufgestellten Kann-Anforderungen Bewertungskriterien abgeleitet. In dieser Forschungsarbeit werden außerdem 13 vorausgewählte Bewertungskriterien dargestellt, die durch entsprechende Variablen operationalisiert sind:

- Aus den intendierten Kompetenzen werden z. B. konkrete Interaktionen mit den Fabrikelementen abgeleitet, welche im Bewertungskriterium Interaktionsfähigkeit betrachtet werden.
- Des Weiteren sollten in Lernfabriken für die schlanke Produktion die Gestaltungsprinzipien der schlanken Produktion umgesetzt sowie zusätzlich Fehler und Verschwendungsarten integriert sein.

- Weitere Bewertungskriterien betrachten bspw. die Wandlungsfähigkeit, die Realitätsnähe und den Einsatz digitaler Technologien.

Nach der Bewertung liegen alle benötigten Daten vor und das Optimierungsmodell kann durch ausgewählte Algorithmen in *Vorgehensschritt IV* gelöst werden (s. Abschnitt 5.5). Des Weiteren kann die ausgewählte Konfiguration mithilfe des Optimierungsmodells weiter analysiert werden, indem bspw. Nutzen-Budget-Kurven ermittelt oder Unsicherheiten hinsichtlich der vorliegenden Daten miteinbezogen werden. Da es sich um ein komplexes Optimierungsmodell handelt, das NP-schwer ist, ist ein softwarebasiertes Konfigurationssystem notwendig, welches das entwickelte Vorgehen zur Konfiguration von Lernfabriken vereinfacht. Dieses wird in Kapitel 6 vorgestellt.

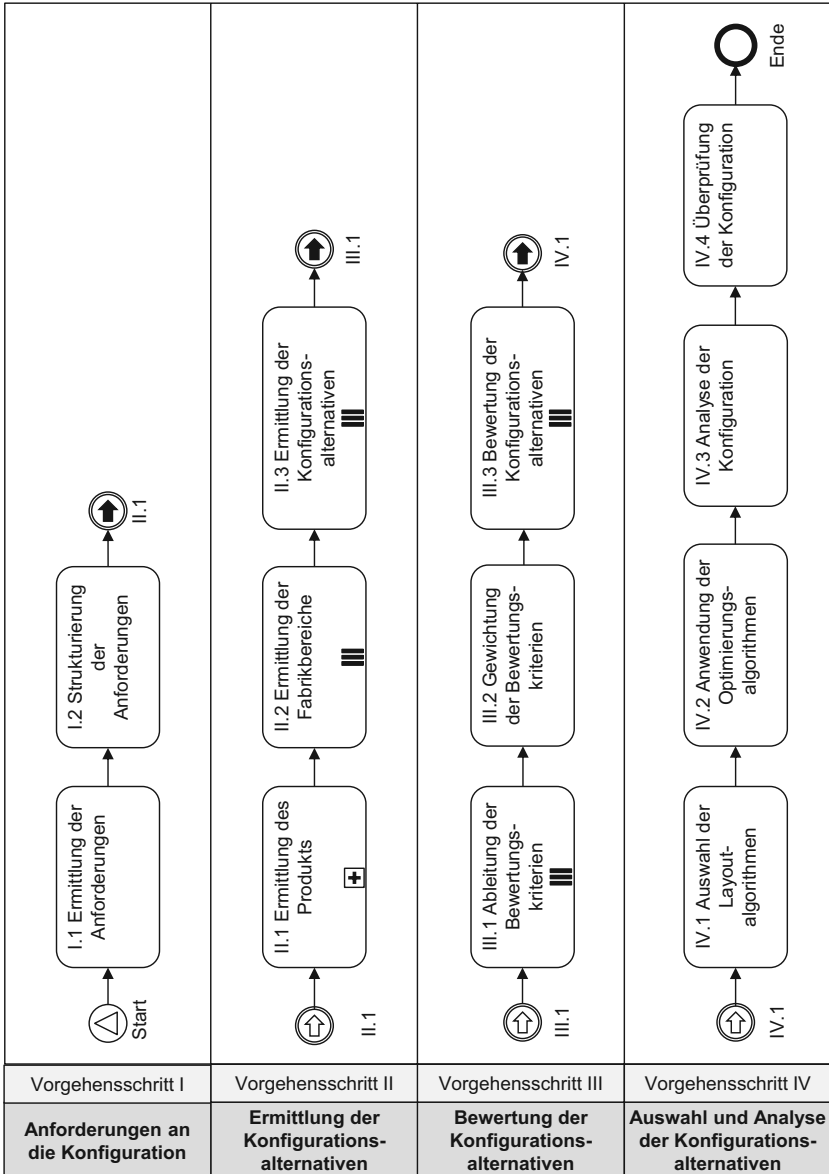


Abbildung 5.4: Vorgehen zur Konfiguration von Lernfabriken, eigene Darstellung

6 SOFTWAREBASIERTES KONFIGURATIONSSYSTEM FÜR LERNFABRIKEN

Dieses Kapitel beschreibt zum einen die Konzeption (Abschnitt 6.1) und zum anderen die Umsetzung (Abschnitt 6.2) eines softwarebasierten Konfigurationssystems für Lernfabriken. Dies ist notwendig, da die Lösung eines NP-schweren Optimierungsproblems in Vorgehensschritt IV ohne die Unterstützung computerbasierter Systeme nicht möglich ist, eine lange Zeit in Anspruch nimmt und zu fehleranfällig ist. Außerdem vereinfacht das softwarebasierte Konfigurationssystem die Anwendung des vorgestellten Vorgehens, insbesondere der Vorgehenschritte I bis III (s. Kapitel 5).

6.1 Konzeption

Die Konzeption des softwarebasierten Konfigurationssystems für Lernfabriken basiert einerseits auf dem hergeleiteten Optimierungsmodell (s. Kapitel 4) und andererseits auf dem Vorgehen zur Konfiguration von Lernfabriken (s. Kapitel 5). Bei der Konzeption von digitalen Systemen wird zwischen funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen unterschieden [Mi14]: Während sich funktionale Anforderungen auf die Zielsetzung einer Software fokussieren und entsprechend durch Funktionen ausgedrückt werden, beziehen sich nicht-funktionale Anforderungen auf die Qualität und Performance der Software. Mit anderen Worten: Funktionale Anforderungen beschreiben die *Effektivität* eines Systems; nicht-funktionale Anforderungen dessen *Effizienz*.

Funktionale Anforderungen

Die funktionalen Anforderungen des softwarebasierten Konfigurationssystems für Lernfabriken werden im Folgenden anhand der einzelnen Vorgehenschritte zur Konfiguration von Lernfabriken (aus Kapitel 5) hergeleitet:

Vorgehensschritt I: Ermittlung von Anforderungen an die Konfiguration

Zur softwarebasierten Unterstützung des ersten Vorgehenschritts eignet sich eine strukturierte Darstellung der ermittelten Anforderungen an die Konfiguration (FA-I.1). Zur Orientierung wird dazu auf Anhang 2.1 verwiesen, in dem eine strukturierte Liste an beispielhaften Anforderungen enthalten ist und welche für die Konfiguration zukünftiger Lernfabriken verwendet werden kann. Des Weiteren sollen Anforderungen an die Abmessungen der Lernfabrik sowie das Budget zur Konfiguration direkt im Konfigurationssystem eingetragen und leicht verändert werden können (FA-I.2).

Vorgehensschritt II: Ermittlung von Konfigurationsalternativen

Der zweite Vorgehensschritt kann durch eine strukturierte Zuordnung der potenziellen Produkte zu den Fabrikbereichen sowie der Fabrikbereiche zu den potenziellen Konfigurationsalternativen und Fabrikelementen unterstützt werden

(FA-II.1). Darauf aufbauend eignet sich eine entsprechende Datenbank für potenzielle Konfigurationsalternativen (FA-II.2). Bisher ermittelte Produkte, Fabrikbereiche und Konfigurationsalternativen können so für zukünftige Lernfabrik-Projekte genutzt werden. Außerdem soll die Datenbank die Berechnung der Kosten und des Flächenbedarfs der Konfigurationsalternativen vereinfachen. Durch eine Export- und Import-Funktion können die bisher ermittelten Daten gespeichert und in das Konfigurationssystem eingefügt werden (FA-II.3).

Vorgehensschritt III: Bewertung der Konfigurationsalternativen

Für den dritten Vorgehensschritt, die Bewertung der Konfigurationsalternativen, sollte ein Paarvergleich zur Gewichtung der Bewertungskriterien implementiert werden (FA-III.1). Zusätzlich sollte die Gewichtung über das Direct Ranking beeinflussbar sein, um den Einfluss geänderter Gewichtungen bestimmen zu können. Zur Speicherung bisheriger Gewichtungen soll auch hier eine Export- und Import-Funktion vorhanden sein (FA-III.2). Die eigentliche Bewertung sollte über eine Funktion zur Nutzwertanalyse in der Datenbank für Konfigurationsalternativen abgebildet werden, damit die Nutzwerte der Konfigurationsalternativen automatisch berechnet werden (FA-III.3). Die in dieser Forschungsarbeit ermittelten Bewertungskriterien stellen eine wichtige Grundlage für spätere Lernfabrik-Projekte dar und sollten im Konfigurationssystem hinterlegt werden (FA-III.4). Jedoch sollte es auch möglich sein, weitere Bewertungskriterien anzulegen, da diese anhand der meist projektspezifischen Kann-Anforderungen abgeleitet werden (FA-III.5). Außerdem sollte sowohl die gleichverteilte als auch die exponentielle Bewertung abgebildet werden (FA-III.6).

Vorgehensschritt IV: Auswahl und Analyse der Konfigurationsalternativen

Als wichtigste Funktion des Konfigurationssystems sollten im vierten Vorgehensschritt zur Auswahl und Analyse der Konfigurationsalternativen die Optimierungsalgorithmen implementiert werden (FA-IV.1). Zur Lösung des MMKP werden der im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelte USBB-Algorithmus sowie eine Greedy-Heuristik programmiert. Die Greedy-Heuristik soll dann zum Einsatz kommen, wenn die Laufzeit des exakten USBB-Algorithmus zu hoch ist. Daher sollte es auch möglich sein, den USBB-Algorithmus vorzeitig beenden zu können mit der Möglichkeit die bisher beste Lösung auszugeben. Auch der FCP-Algorithmus soll im System programmiert werden. Die dazu notwendigen Layout-Algorithmus sollten ebenfalls programmiert werden. Zur Nutzung des Konfigurationssystems soll eine Funktion vorhanden sein, um die passenden Algorithmen auszuwählen (FA-IV.2). Hierzu sind die Empfehlungen zur Algorithmen-Auswahl dieser Forschungsarbeit zu beachten (s. Abschnitt 4.2). Neben der Auswahl der Algorithmen soll die ermittelte optimale Konfiguration strukturiert dargestellt werden (FA-IV.3).

In dieser Ergebnisdarstellung soll erkenntlich sein,

- welche Konfigurationsalternativen für die Fabrikbereiche ausgewählt wurden und welche Fabrikelemente in den ausgewählten Konfigurationsalternativen vorhanden sind,
- wie hoch der Nutzwert und der Ressourcenbedarf (durch Kosten und Fläche bzw. den genauen Abmessungen) ist,
- wie hoch der insgesamt erreichte Nutzwert, die gesamten Kosten und der gesamte Flächenbedarf der berechneten Konfiguration sind,
- wie das berechnete Layout aussieht und auf welchen Positionen die einzelnen Fabrikelemente liegen und
- wie hoch der relative Nutzen der einzelnen Bewertungskriterien ist.

Nach der Anwendung der Optimierungsalgorithmen soll die berechnete Konfiguration verändert werden können (FA-IV.4). D. h., dass für die einzelnen Fabrikbereiche bewusst andere Konfigurationsalternativen auswählbar sind. Eine weitere Möglichkeit soll darin bestehen, dass von den Algorithmen ausgewählte Konfigurationsalternativen ausgeschlossen und die Algorithmen erneut angewendet werden können. Der Grund hierfür ist, dass ausgewählte Konfigurationsalternativen sich im Nachhinein als nicht zulässig erweisen können. Berechnete Konfigurationen sollen zudem mithilfe von Export- und Import-Funktionen gespeichert werden können (FA-IV.5).

Neben der Auswahl der Konfigurationsalternativen sollen außerdem Funktionen zur Analyse der berechneten Konfiguration implementiert werden (FA-IV.6). Um die (in Abschnitt 5.5) genannten Analysemöglichkeiten abzubilden, eignen sich Darstellungen, mit denen die berechneten Konfigurationen verglichen werden. In diesen Darstellungen sollten die geänderten Eingabewerte ersichtlich sein.

Für die Nutzung des softwarebasierten Konfigurationssystems für Lernfabriken in Verbindung mit der zu implementierenden Datenbank können fünf Fälle unterschieden werden, welche aufeinander aufbauen:

- *Fall 1:* Sofern in der implementierten Datenbank bereits alle benötigten Produkte, Fabrikbereiche und Konfigurationsalternativen enthalten sind, können diese mit der Import-Funktion in das Konfigurationssystem implementiert werden. Im Anschluss wird die bestmögliche Konfiguration ermittelt und ein erstes Fabriklayout erstellt (s. Vorgehensschritt IV).
- *Fall 2:* Sind in der implementierten Datenbank die benötigten Produkte und Fabrikbereiche enthalten, jedoch nicht die passenden Konfigurationsalternativen, sollten diese ergänzt werden. Hierbei sollten die notwendigen Daten zu den Ressourcenverbräuchen sowie zur Bewertung der Konfigurationsalternativen ermittelt werden (s. Vorgehensschritt III). Im Anschluss ist Fall 1 anzuwenden.

- *Fall 3:* Sofern notwendige Fabrikbereiche der zukünftigen Lernfabrik nicht in der Datenbank enthalten sind, sollten diese ergänzt werden (s. Vorgehensschritt II) und daraufhin Fall 2 angewendet werden.
- *Fall 4:* Dies trifft analog auf den Fall zu, wenn neue Produkte verwendet werden sollen (s. ebenfalls Vorgehensschritt II). Dabei ist zu prüfen, ob die bisher ermittelten Fabrikbereiche wiederverwendet werden können, sodass Fall 3 anzuwenden ist.
- *Fall 5:* Sollten sich durch eine Änderung der Kann-Anforderungen (in Vorgehensschritt I) neue Bewertungskriterien ergeben, sollten diese operationalisiert werden (s. Vorgehensschritt III). Die weiteren Fälle können im Anschluss an Fall 5 angewendet werden, jedoch ist zu beachten, dass die Bewertung der Konfigurationsalternativen anzupassen ist.

Der Zusammenhang der aufgezeigten Fälle ist in einem Flow-Chart dargestellt (s. Abbildung 6.1). Dabei ist ersichtlich, dass die Komplexität von Fall 1 ausgehend steigt. Je mehr Konfigurationsalternativen und Bewertungskriterien jedoch in der Datenbank enthalten sind, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass der einfachste Fall (Fall 1) zur Anwendung kommt.

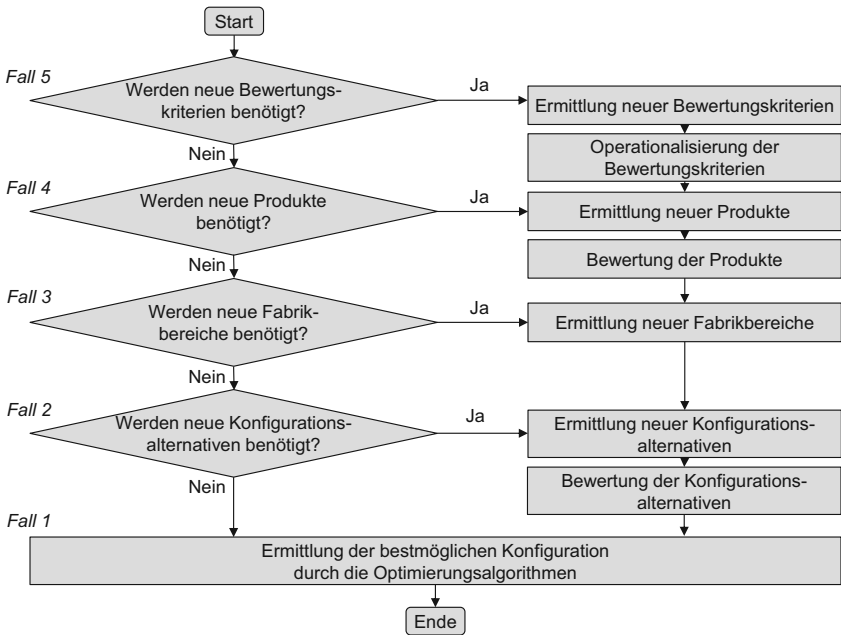


Abbildung 6.1: Flow-Chart zu den Anwendungsfällen des Konfigurationssystems, eigene Darstellung

Nicht-funktionale Anforderungen

Zu den nicht-funktionalen Anforderungen wird die ISO 25010 herangezogen, welche eine internationale Norm für Qualitätsmerkmale von Software, IT-Systemen und Software-Engineering darstellt [Ha17]:

- Die *funktionale Eignung* des Configurationssystems sollte möglichst vollständig, korrekt und angemessen das Vorgehen zur Configuration (s. Kapitel 5) abbilden (NFA-1).
- Das Configurationssystem sollte möglichst eine hohe *Effizienz* aufweisen (NFA-2). Das bedeutet, dass die Laufzeiten der implementierten Algorithmen und die weiteren Funktionalitäten angemessen sein sollten.
- Die *Kompatibilität* zu weiteren Software-Systemen sollte sichergestellt werden (NFA-3).
- Außerdem sollte die *Benutzbarkeit* gegeben sein (NFA-4). Die implementierten Funktionen sollten optisch gut erkennbar sein. Die Benutzung des Configurationssystems sollte leicht erlernbar sein. Hierzu wird ein Bedienungshandbuch verfasst, welches den Umgang vereinfacht. Trotzdem sollten Fehlbedienungen ausgeschlossen sein.
- Das System sollte eine hohe *Zuverlässigkeit* haben, indem es verfügbar und ohne Systemabsturz tolerant gegenüber Fehleingaben ist (NFA-5). Des Weiteren sollten frühere Versionen wiederherstellbar sein.
- Die aktuellen Anforderungen zur *Sicherheit* sollten umgesetzt sein (NFA-6). Hierzu gehört die Einhaltung des Datenschutzes. Durch geschützte Benutzerkonten können die Rechte verwaltet werden, sodass die fehlerhafte Nutzung des Systems weitestgehend vermieden wird.
- Das Configurationssystem sollte eine hohe *Wartbarkeit* aufweisen (NFA-7). Dies wird in der objektorientierten Programmierung durch einen modularen Aufbau, wiederverwendbaren Komponenten sowie Möglichkeiten zum Testen von Programmcode ermöglicht.
- Die *Übertragbarkeit* des Systems sollte berücksichtigt werden (NFA-8): Es sollte auf unterschiedlichen Betriebssystemen installierbar und einfach austauschbar sein.

Zusammenfassend bieten Tabelle 6.1 und Tabelle 6.2 eine Übersicht der funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen an das Configurationssystem.

Tabelle 6.1: Funktionale Anforderungen an das Konfigurationssystem, eigene Darstellung

Funktionale Anforderungen	
<i>Vorgehensschritt I</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>FA-I.1:</i> Strukturierte Darstellung der ermittelten Anforderungen ▪ <i>FA-I.2:</i> Eingabemöglichkeit zum verfügbaren Budget und zur verfügbaren Fläche
<i>Vorgehensschritt II</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>FA-II.1:</i> Strukturierte Zuordnung der Produkte, Fabrikbereiche, Konfigurationsalternativen und Fabrikelemente ▪ <i>FA-II.2:</i> Aufbau einer Datenbank ▪ <i>FA-II.3:</i> Export- und Import-Funktionen der Datenbankeinträge
<i>Vorgehensschritt III</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>FA-III.1:</i> Funktion zur Gewichtung der Bewertungskriterien (Paarvergleich und Direct Ranking) ▪ <i>FA-III.2:</i> Export- und Import-Funktion der Gewichtung ▪ <i>FA-III.3:</i> Funktion zur Nutzwertanalyse (mit Berechnung der Nutzwerte) ▪ <i>FA-III.4:</i> Hinterlegung der ermittelten Bewertungskriterien ▪ <i>FA-III.5:</i> Anlegen neuer Bewertungskriterien ▪ <i>FA-III.6:</i> Ermöglichung der gleichverteilten und exponentiellen Bewertung
<i>Vorgehensschritt IV</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>FA-IV.1:</i> Implementierung der Optimierungsalgorithmen (zum MMKP, BP-MMKP und Layoutgenerierung) ▪ <i>FA-IV.2:</i> Funktion zur Auswahl der Algorithmen ▪ <i>FA-IV.3:</i> Strukturierte Darstellung der ermittelten Konfiguration ▪ <i>FA-IV.4:</i> Möglichkeit zur Veränderung der Konfiguration (mit Ausschluss ermittelter Konfigurationsalternativen) ▪ <i>FA-IV.5:</i> Export- und Import-Funktion der ermittelten Konfiguration ▪ <i>FA-IV.6:</i> Funktion zur Analyse und Vergleich von Konfigurationen

Tabelle 6.2: Nicht-Funktionale Anforderungen an das Konfigurationssystem, eigene Darstellung

Nicht-funktionale Anforderungen	
<i>ISO 25010</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>NFA-1:</i> Funktionale Eignung ▪ <i>NFA-2:</i> Effizienz ▪ <i>NFA-3:</i> Kompatibilität ▪ <i>NFA-4:</i> Benutzbarkeit ▪ <i>NFA-5:</i> Zuverlässigkeit ▪ <i>NFA-6:</i> Sicherheit ▪ <i>NFA-7:</i> Wartbarkeit ▪ <i>NFA-8:</i> Übertragbarkeit

6.2 Umsetzung als digitale Applikation

Die in Abschnitt 6.1 festgelegten Anforderungen zur Konzeption dienen als Grundlage zur Umsetzung des softwarebasierten Konfigurationssystems. Zunächst wird eine Programmiersprache ausgewählt. Die Realisierung des softwarebasierten Konfigurationssystems für Lernfabriken ist grundsätzlich in vielen Programmiersprachen möglich. Die Wahl ist in der vorliegenden Forschungsarbeit auf Microsoft Excel in Kombination mit der Skriptsprache Visual Basics for

Applications (VBA) gefallen. Die Gründe hierfür liegen im breiten Einsatz, insbesondere in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU), in den einfachen Möglichkeiten zur Modifikation bei notwendigen Änderungen sowie in der breiten Verfügbarkeit der Software. Außerdem werden die nicht-funktionalen Anforderungen an das Konfigurationssystem dadurch erfüllt:

- *Funktionale Eignung (NFA-1)*: Grundsätzlich eignet sich Microsoft Excel zur Umsetzung aller benötigten Funktionen, da bereits eine Vielzahl an Grundfunktionen programmiert ist, auf die zurückgegriffen werden kann. Zusätzlich können in VBA vielfältige Funktionen durch eigene Programmierung ergänzt werden.
- *Effizienz (NFA-2)*: In ersten Tests [KKM21] zur Umsetzung des USB-Algorithmus haben sich im Vergleich zur Programmiersprache Java keine Nachteile in Bezug auf die Laufzeit ergeben, welche für die empfohlene Anzahl an Konfigurationsoptionen bei maximal zwei Minuten liegt. Auch größere Problemstellungen können somit effizient gelöst werden.
- *Kompatibilität (NFA-3)*: Um den genetischen Algorithmus des Facility Layout Problems (FLP) anzuwenden, wird auf die Software Matlab verwiesen, die eine Bibliothek mit genetischen Algorithmen bereitstellt. Die aufwendige Umsetzung des FLP, insbesondere des genetischen Algorithmus, in Excel wird als nicht angemessen gesehen. Die Kompatibilität zu Matlab wird durch die Export-Funktion der ermittelten Konfiguration als csv-Datei gewährleistet. Werden die Ergebnisse in weiteren Anwendungen übertragen, bietet Excel vielfältige Funktionen und kann so als kompatibel gesehen werden.
- *Benutzbarkeit (NFA-4)*: Auch zur Benutzbarkeit kann Excel anwendungsfreundlich gestaltet werden. Außerdem wurde ein Bedienungshandbuch verfasst, welches das Erlernen in das programmierte Konfigurationssystem erleichtert.
- *Zuverlässigkeit (NFA-5)*: Des Weiteren ist Excel in den meisten Unternehmen eine Standardanwendung, wodurch es auf den meisten Anwendungsgeräten verfügbar ist. Fehleingaben können durch die Fehlerbehandlung in VBA vermieden werden, wobei gesperrte Zellen eine zusätzliche Sicherheit bieten. Abgestürzte Versionen sind in vielen Fällen leicht wiederherstellbar.
- *Sicherheit (NFA-6)*: Zur Konfiguration von Lernfabriken werden keine personenbezogenen Daten benötigt, so dass datenschutzrechtliche Regelungen nicht relevant sind. Zusätzlich können in VBA Nutzungskonten eingerichtet werden. Aus diesen Gründen bietet Excel einen hohen Sicherheitsstandard.
- *Wartbarkeit (NFA-7)*: Auch die Anforderung zur Wartbarkeit kann als erfüllt angesehen werden, da der Programmcode in VBA modular in Funktionen und Klassen aufgebaut werden kann und verschiedene Funktionen zum Testen des Programmcodes vorhanden sind.

- **Übertragbarkeit (NFA-8):** Nicht zuletzt ist Excel auf allen gängigen Betriebssystemen installierbar, wodurch das Konfigurationssystem als leicht übertragbar angesehen werden kann.

Im Folgenden wird das entwickelte Konfigurationssystem strukturiert nach den Vorgehenschritten vorgestellt. Dabei wird gezeigt, wie die aufgestellten funktionalen Anforderungen umgesetzt wurden.

Vorgehenschritt I: Ermittlung von Anforderungen

Zur strukturierten Darstellung der Anforderung aus diesem Vorgehenschritt (FA-I.1) kann eine Tabelle genutzt werden, deren Struktur an Tabelle 5.2 angelehnt ist. Die Eingabe aller benötigten Inputfaktoren, insbesondere der Abmessungen der Lernfabrik sowie des verfügbaren Budgets (FA-I.2), kann auf einem gesondertem Tabellenblatt erfolgen (s. Abbildung 6.2 auf der linken Seite).

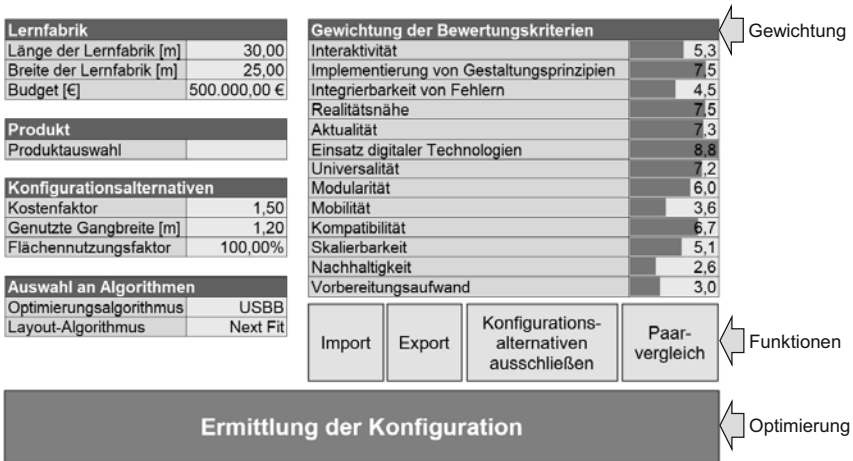


Abbildung 6.2: Eingabe im Konfigurationssystem, eigene Darstellung

Vorgehenschritt II: Ermittlung von Konfigurationsalternativen

Zur strukturierten Zuordnung der ermittelten Konfigurationsalternativen (FA-II.1) wurde ein Entity-Relationship-Modell aufgebaut. Zur Darstellung werden Entity-Relationship-Diagramme (ERD) verwendet (s. Abbildung 6.3). In Entity-Relationship-Modellen werden generell Objekte (Entitäten) sowie deren Beziehungen beschrieben [Ch76]. Dabei werden die Beziehungen in Form von Verben sowie deren Zusammenhang angegeben. Zur inhaltlichen Beschreibung der dargestellten Beziehungen wird auf die Kapitel 4 und 5 verwiesen.

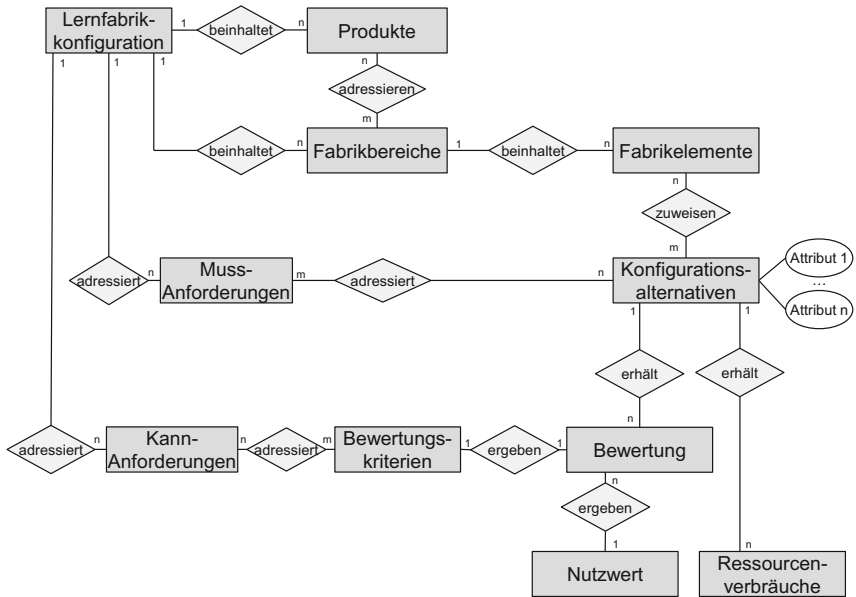


Abbildung 6.3: ERD zur strukturierten Darstellung der Konfigurationsalternativen, eigene Darstellung

Auf Basis des ERD wurde eine entsprechende Datenbank modelliert (FA-II.2), welche die enthaltenen Beziehungen widerspiegelt. In dieser können bereits ermittelte Konfigurationsalternativen durch eine Export- und Import-Funktion in Form von csv-Dateien gespeichert und geladen werden.

Vorgehensschritt III: Bewertung der Konfigurationsalternativen

Zur Gewichtung der Bewertungskriterien wurden der Paarvergleich und das Direct Ranking-Verfahren umgesetzt (FA-III.1). Diese befinden sich auf dem Tabellenblatt zur Eingabe (s. Abbildung 6.2). Zum Speichern und Laden bereits ermittelter Gewichtungen wurden Export- und Import-Funktionen programmiert, welche csv-Dateien generieren. Auch diese befinden sich auf dem Tabellenblatt zur Eingabe. Die Funktion zur Nutzwertanalyse insbesondere der Berechnung der Nutzwerte (FA-III.3) wurde in der relationalen Datenbank umgesetzt. Die in dieser Forschungsarbeit ermittelten Bewertungskriterien (s. Abschnitt 5.4.2) wurden im Konfigurationssystem in der Datenbank hinterlegt (FA-III.4). In der Datenbank können außerdem neue Bewertungskriterien hinterlegt werden (FA-III.5). Zur Ermöglichung der gleichverteilten und exponentiellen Bewertung (FA-III.6) wurde eine Funktion programmiert, durch welche die jeweiligen Bewertungen umgewandelt werden können. Dies erfolgt über eine gesonderte Zuordnung von „keine“ bis „stark“.

Vorgehensschritt IV: Auswahl und Analyse

Die Optimierungsalgorithmen zum MMKP, FCP und zur Layoutgenerierung wurden vollständig in VBA programmiert (FA-IV.1). Die einzelnen Algorithmen sind zur besseren Übersicht modular in einzelne Funktionen unterteilt. Im Eingabeblatt können die entsprechenden Algorithmen ausgewählt werden (FA-IV.2 (s. Abbildung 6.2). Die strukturierte Darstellung der ermittelten Konfiguration (FA-IV.3) erfolgt auf einem gesonderten Tabellenblatt (s. Abbildung 6.4). Hier sind die zusammengefassten Werte, Details zu den gewählten Konfigurationsalternativen sowie das erstellte Layout angegeben. Außerdem wird angezeigt, wie gut die einzelnen Bewertungskriterien im Verhältnis zur jeweils bestmöglichen Lösung abschneiden. Die Konfiguration kann auf ein weiteres Tabellenblatt übertragen werden, in dem die einzelnen Konfigurationsalternativen verändert werden können (FA-IV.4). Der Aufbau dieses zusätzlichen Tabellenblatts ist analog zur Abbildung 6.4. Auf dem Tabellenblatt zur Eingabe können zudem einzelne Konfigurationsalternativen ausgeschlossen werden (s. Abbildung 6.2). Nicht zuletzt wurden auch hier Export- und Import-Funktionen der ermittelten Konfiguration (durch csv-Dateien) programmiert.

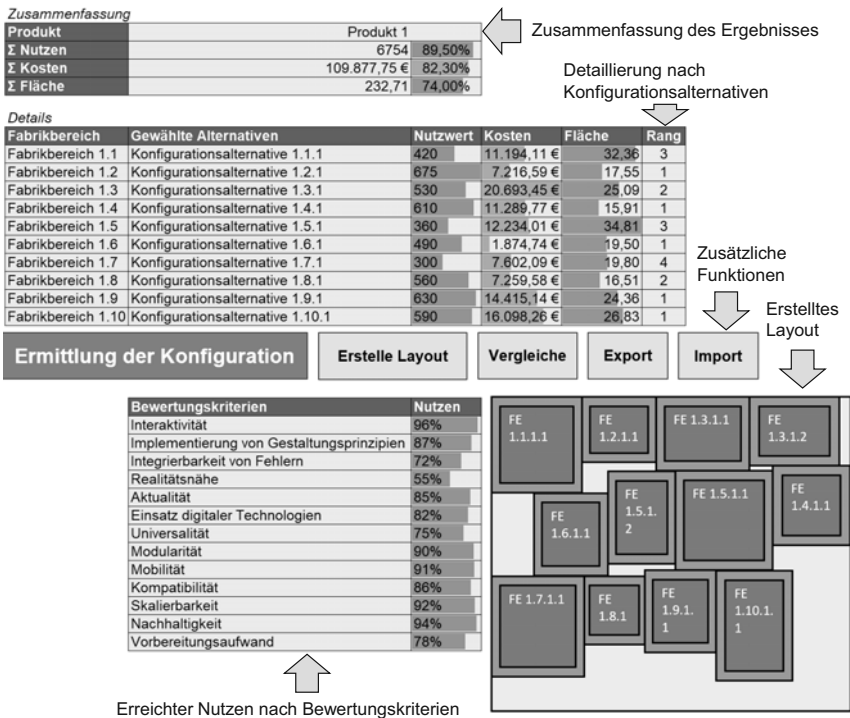


Abbildung 6.4: Ermittelte Konfiguration im Konfigurationssystem, eigene Darstellung

Die Funktion zur Analyse und zum Vergleich von Konfigurationen befindet sich auf einem gesonderten Tabellenblatt (s. Abbildung 6.5). Die mithilfe der Optimierungsalgorithmen können die ermittelten Konfigurationen auf dieses Tabellenblatt übertragen werden (s. Abbildung 6.4 Funktion „Vergleiche“). Außerdem wurde eine weitere Funktion programmiert, mit welcher die Gewichtungen der zu vergleichenden Konfigurationen vereinheitlicht werden. Erst durch einheitliche Gewichtungen ist ein Vergleich der Nutzwerte möglich. Dabei kann ausgewählt werden, welche Gewichtung als Grundlage dienen soll. Auf dieser Basis werden im Anschluss die Nutzwerte neu berechnet. Die Darstellung des Analyse- und Vergleichsfunktion gliedert sich zum einen in eine Zusammenfassung, in der der Gesamtnutzen, die gesamten Kosten und die gesamte beanspruchte Fläche enthalten sind. Zum anderen können weitere Details zu den einzelnen Werten der jeweiligen Konfiguration angezeigt werden, wie z. B. die Kosten oder Fläche.

Einträge löschen

Vereinheitlichte Bewertung

Nummer	1	2
Zusammenfassung		
Produkt	Produkt 1	Produkt 1
Σ Nutzen	6753,6	6329,4
Σ Kosten	109.877,75 €	98.739,25 €
Σ Fläche	232,71	261,47
Details		
<input checked="" type="checkbox"/>	Gewählte Konfigurationsalternativen	
	1 Konfigurationsalternative 1.1.1	Konfigurationsalternative 1.1.1
	2 Konfigurationsalternative 1.2.1	Konfigurationsalternative 1.2.1
	3 Konfigurationsalternative 1.3.1	Konfigurationsalternative 1.3.2
	4 Konfigurationsalternative 1.4.1	Konfigurationsalternative 1.4.1
	5 Konfigurationsalternative 1.5.1	Konfigurationsalternative 1.5.3
	6 Konfigurationsalternative 1.6.1	Konfigurationsalternative 1.6.1
	7 Konfigurationsalternative 1.7.1	Konfigurationsalternative 1.7.2
	8 Konfigurationsalternative 1.8.1	Konfigurationsalternative 1.8.1
	9 Konfigurationsalternative 1.9.1	Konfigurationsalternative 1.9.1
	10 Konfigurationsalternative 1.10.1	Konfigurationsalternative 1.10.2
<input type="checkbox"/>	Nutzen	
<input type="checkbox"/>	Kosten	
<input type="checkbox"/>	Fläche	
<input checked="" type="checkbox"/>	Ursprüngliche Gewichtung	
	1	5,00
	2	7,00
	3	10,00
	4	4,00
	5	7,00
	6	5,00
	7	7,00
	8	7,00
	9	8,00
	10	4,00
	11	7,00
	12	6,00
	13	3,00
	14	2,00
	15	7,00
	16	2,00

Funktionen

Zusammenfassung der Ergebnisse

Gewählte Konfigurationsalternativen

Weitere Details

Abbildung 6.5: Analyse der ermittelten Konfigurationen im Konfigurationssystem, eigene Darstellung

6.3 Zwischenfazit

Zur Anwendung des Vorgehens wurde ein softwarebasiertes Konfigurationssystem entwickelt. Die Konzeption des Systems (s. Abschnitt 6.1) basiert auf funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen. Die funktionalen Anforderungen beschreiben, welche Funktionen das System aufweisen sollte. Diese Funktionen wurden ausgehend vom Vorgehen zur Konfiguration von Lernfabriken abgeleitet (s. Kapitel 5). Die nicht-funktionalen Anforderungen sind nicht systemspezifisch und wurden aus der ISO 25010 hergeleitet.

Die Umsetzung des Systems erfolgte in Microsoft Excel (s. Abschnitt 6.2). Die Optimierungsalgorithmen sowie die notwendigen Funktionen für das entwickelte Vorgehen zur Konfiguration wurden in VBA umgesetzt. Durch die Umsetzung werden die nicht-funktionalen Anforderungen erfüllt. Die jeweiligen Daten der Konfigurationsalternativen, wie z. B. die Nutzwerte und die Ressourcenverbräuche, werden zur erleichterten Anwendung in einer Datenbank archiviert. Mithilfe des softwarebasierten Konfigurationssystems ist es möglich das Vorgehen zur Konfiguration von Lernfabriken in der Praxis anzuwenden. Hierdurch wird es für die anwendungsbasierte Evaluierung zugänglich, die in Kapitel 7 behandelt wird.

7.1.1 Anwendung im Unternehmen

Die erste Fallstudie behandelt die Konfiguration einer neuen Lernfabrik für ein Unternehmen der Eisenbahninfrastruktur. Es handelt sich dabei um ein Großunternehmen mit über 40.000 Beschäftigten. Da das Unternehmen keine industriellen Güter herstellt, wird in der zu planenden Lernfabrik statt einem Produkt eine Dienstleistung betrachtet: die Instandhaltung des Schienensystems. Deshalb handelt es sich bei dieser Fallstudie um eine Lernfabrik im weiteren Sinne. Das Ziel der Lernfabrik stellt die kompetenzbasierte Vermittlung von Lerninhalten an interne Beschäftigte dar, um Instandhaltungsprozesse am Schienensystem zu verbessern. Somit liegt das Primärziel Weiterbildung vor. Dieser Anwendungsfall fand im Rahmen eines Auftragsforschungsprojekts statt, in welchem auch die Methodik dieser Forschungsarbeit entwickelt wurde.⁴⁰

In **Vorgehensschritt I** werden Anforderungen an die Konfiguration identifiziert und strukturiert. Dafür wurden in der Fallstudie 55 intendierte Kompetenzen hergeleitet und in 74 Teilkompetenzen unterteilt. Neben ausgewählten Kompetenzen für die schlanke Produktion werden außerdem weitere fachliche Kompetenzen betrachtet, welche unternehmensspezifisch sind (z. B. die Durchführung gewerkeübergreifender Prozesse zur Instandhaltung des Schienensystems). Aus den intendierten Kompetenzen wurden 85 Anforderungen abgeleitet.

Tabelle 7.2 zeigt einen entsprechenden Auszug der strukturierten Anforderungen an die Konfiguration. So wurden bspw. ein maximales Budget und maximal mögliche Abmessungen für die Lernfabrik definiert. Weiterhin soll der Wechsel einer Zungenvorrichtung⁴¹ als gewerkeübergreifender Prozess dargestellt werden. Während einige Fabrikbereiche obligatorisch implementiert werden sollen, wie z. B. Schienen oder eine Oberleitung, sind andere Fabrikbereiche optional, wie z. B. ein Bahnübergang, bei denen eine leere Konfigurationsalternative ausgewählt werden kann. Die dargestellten Fabrikelemente sollten möglichst realitätsnah und interaktiv sein, außerdem sollten Fehler und Verschwendungen zu Lernzwecken implementierbar sein. Für den Betrieb der Lernfabrik sollten alle Fabrikelemente ein Mindestmaß an Sicherheit aufweisen, woraus eine weitere Muss-Anforderung abgeleitet wurde. Grundsätzlich sollten alle Konfigurationsalternativen nach einer entsprechenden Schulung sicher bedienbar sein; allerdings ergeben sich bei realistischer Darstellung im Umgang mit den Fabrikelementen dennoch Gefahren, die in der Lernfabrik so gering wie möglich sein sollten. Deshalb wurde eine Kann-Anforderung gebildet, welche die Restsicherheit betrachtet.

⁴⁰ Der Anwendungsfall wurde in KREß UND METTERNICH [KM22a] im Rahmen der Conference on Learning Factories (CLF) veröffentlicht.

⁴¹ Zungenvorrichtungen werden in Weichen eingesetzt und ermöglichen eine Richtungsänderung des Schienenfahrzeugs [FF14].

Tabelle 7.2: Anforderungen an die Konfiguration in Fallstudie 1, eigene Darstellung

#	Anforderung	Art der Anforderung		Betrachtete Konfigurationsebene			
		Muss	Kann	Lernfabrik	Dienstleistung	Fabrikbereich	Fabrikelement
1	Maximales Budget zur Konfiguration						
2	Maximale Abmessungen der Lernfabrik						
3	Simulation eines Zungenwechsels						
4	Darstellung von Schwellen, Schienen und Schotter						
5	Darstellung einer Oberleitung						
6	Modellierung des Regellichtraums mithilfe eines Nachbargleises						
7	Möglichkeit zur Videoaufnahme						
8	Darstellung eines Werkzeugwagens						
9	Möglichst hohe Realitätsnähe						
10	Darstellung eines Bahnübergangs						
11	Möglichst interaktive Fabrikelemente						
	...						

In **Vorgehensschritt II** wurden aus den aufgestellten Anforderungen entsprechende Konfigurationsalternativen ermittelt. Wie bereits erwähnt, wird als Dienstleistung der Zungenwechsel betrachtet, da hier möglichst viele Gewerke beteiligt sind. Aus den Anforderungen wurden insgesamt elf Fabrikbereiche ermittelt. Für nahezu alle intendierten Kompetenzen sind eine Weiche, eine Oberleitung sowie ein Signalmast notwendig. Zusätzlich werden Arbeitsplätze verschiedener Funktionen dargestellt, wie z. B. der Fahrdienstleitung. In den einzelnen Fabrikbereichen kann zwischen zwei bis vier Konfigurationsalternativen gewählt werden, die unterschiedlich realistisch sind (z. B. ein Gleis aus Stahl und ein Gleis aus Aluminium) oder weitere optionale Fabrikelemente enthalten (z. B. ein Kamerasystem zur Aufnahme von Lernvideos).

In **Vorgehensschritt III** wurden die ermittelten Konfigurationsalternativen bewertet. Hierzu wurden zunächst aus den Kann-Anforderungen Bewertungskriterien abgeleitet. Zusätzlich zu den in Abschnitt 5.4.2 aufgestellten Kriterien wird lediglich ein weiterer Aspekt behandelt, der sich aus den Kann-Anforderungen (Vorgehensschritt I) ergibt: die Restsicherheit der Konfigurationsalternativen. Zur Gewichtung der Bewertungskriterien wurde im Projektteam ein Paarvergleich durchgeführt. Als Ergebnis weisen die Kriterien Interaktionsfähigkeit, Integrierbarkeit von Fehlern und Verschwendung sowie Aktualität die höchsten Gewichtungswerte auf. Im Projektteam wurden zur Berechnung des Nutzwerts die Gewichtungswerte anhand eines Paarvergleichs bestimmt sowie die ermittelten

Konfigurationsalternativen bewertet. In Anhang 3.1 finden sich weitere Details zur Gewichtung und den bewerteten Konfigurationsalternativen.

In **Vorgehensschritt IV** wurden die Konfigurationsalternativen auf Basis des Optimierungsmodells ausgewählt und die Konfigurationen zur besseren Entscheidungsfindung analysiert. Die Lösung des FCP basiert auf den im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelten Algorithmen, wie z. B. dem USBB-Algorithmus. Ein erstes Layout wurde durch den Best-Fit-Algorithmus ausgewählt, um eine möglichst hohe Flächenauslastung zu erhalten. Zur Betrachtung der Planungsunsicherheit bezüglich des Budgets als auch des Standorts der Lernfabrik wurden jeweils drei verschiedene Konfigurationsszenarien für das Budget sowie für die Abmessungen der Lernfabrik analysiert. Tabelle 7.3 zeigt zu den daraus resultierenden neun Konfigurationsszenarien die relativen Nutzwerte N_{relativ} , die Summe der Kosten $\sum w_{\text{Kosten}}$ [in Geldeinheiten]⁴² sowie die Flächenauslastung $\frac{\sum w_{\text{Fläche}}}{C_{\text{Fläche}}}$, die bei restriktiver Wirkung dunkelgrau hinterlegt sind [KM22a].⁴³

Tabelle 7.3: Konfigurationsszenarien in Fallstudie 1, eigene Darstellung

		Abmessungen der Lernfabrik $C_{\text{Fläche}}$ [m ²]					
		Hoch 50 m x 30 m		Moderat 42 m x 25 m		Gering 30 m x 20 m	
Budget C_{Budget} [Geldeinheiten]	Hoch 1.000.000	N_{relativ}	100,00 %	N_{relativ}	99,61 %	N_{relativ}	89,52 %
		$\sum w_{\text{Kosten}}$	887.608,35	$\sum w_{\text{Kosten}}$	885.583,35	$\sum w_{\text{Kosten}}$	664.520,85
		$\frac{\sum w_{\text{Fläche}}}{C_{\text{Fläche}}}$	0,451	$\frac{\sum w_{\text{Fläche}}}{C_{\text{Fläche}}}$	0,586	$\frac{\sum w_{\text{Fläche}}}{C_{\text{Fläche}}}$	0,682
	Moderat 300.000	N_{relativ}	99,44 %	N_{relativ}	99,44 %	N_{relativ}	89,37 %
		$\sum w_{\text{Kosten}}$	288.358,35	$\sum w_{\text{Kosten}}$	288.358,35	$\sum w_{\text{Kosten}}$	67.295,85
		$\frac{\sum w_{\text{Fläche}}}{C_{\text{Fläche}}}$	0,390	$\frac{\sum w_{\text{Fläche}}}{C_{\text{Fläche}}}$	0,274	$\frac{\sum w_{\text{Fläche}}}{C_{\text{Fläche}}}$	0,631
	Gering 75.000	N_{relativ}	89,66 %	N_{relativ}	89,66 %	N_{relativ}	89,63 %
		$\sum w_{\text{Kosten}}$	67.108,35	$\sum w_{\text{Kosten}}$	67.108,35	$\sum w_{\text{Kosten}}$	67.295,85
		$\frac{\sum w_{\text{Fläche}}}{C_{\text{Fläche}}}$	0,326	$\frac{\sum w_{\text{Fläche}}}{C_{\text{Fläche}}}$	0,466	$\frac{\sum w_{\text{Fläche}}}{C_{\text{Fläche}}}$	0,631

Zu erkennen ist, dass die Nutzenänderungen von „Hoch“ auf „Moderat“ jeweils gering ist (max. -0,56 Prozentpunkte), während die Nutzenänderungen von „Moderat“ auf „Gering“ deutlich höher ausfallen (max. -10,07 Prozentpunkte). Die Konfiguration mit moderaten Abmessungen und einem moderaten Budget bietet

⁴² Die tatsächlichen Geldbeträge unterliegen der Geheimhaltung.

⁴³ Eine restriktive Wirkung liegt vor, sofern durch Kapazitätserhöhung der entsprechenden Ressource ein höherer Nutzwert N resultiert.

einen vergleichsweise hohen Nutzwert. Bis auf eine Ausnahme können beim Konfigurationsszenario mit moderatem Budget und moderaten Lernfabrik-Abmessungen die Konfigurationsalternativen mit den höchsten Nutzwerten in den jeweiligen Fabrikbereichen ausgewählt werden.

Um mögliche Konfigurationen weiter zu analysieren, wurde für jedes Abmessungsszenario eine Nutzen-Budget-Kurve erstellt (s. Abbildung 7.1). Jeder Punkt auf der Nutzen-Budget-Kurve entspricht einer optimalen Konfiguration. Zu erkennen ist, dass die Abmessungsszenarien „50 m x 30 m“ und „42 m x 25 m“ die gleichen Konfigurationen aufweisen – außer bei einem sehr hohen Budget. Die Nutzenänderung ist allerdings, wie bereits gezeigt, gering. Die zusätzliche Fläche erhöht den Gesamtnutzen erst bei hohem Budget. Im Gegensatz dazu wirkt die geringe Fläche des Abmessungsszenarios „30 m x 20 m“ bereits bei einem geringen Budget limitierend. Bei Eckpunkten der Nutzen-Budget-Kurve erhöht sich der Nutzwert bei weiterer Erhöhung des Budgets nicht, weshalb sie sich als Lösungen eignen. Der rechteckig-umrahmte Eckpunkt stellt die Konfiguration bei moderatem Budget und moderaten Lernfabrik-Abmessungen dar. Diese Konfiguration wird im weiteren Projektverlauf verfolgt [KM22a].

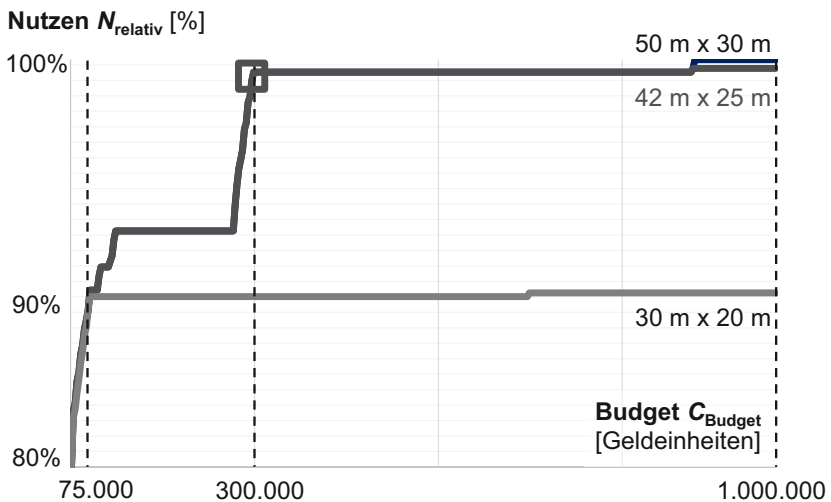


Abbildung 7.1: Nutzen-Budget-Kurve der Fallstudie 1, eigene Darstellung

In Abbildung 7.2 ist das erstellte Layout der konfigurierten Lernfabrik zu erkennen (bei moderatem Budget und moderaten Abmessungen). Hierbei handelt es sich um einen ersten Entwurf, der im weiteren Verlauf der Lernfabrik-Planung weiterentwickelt wird. In Dunkelgrau sind die einzelnen Fabrikelemente innerhalb der Konfigurationsalternativen und in Hellgrau der Gang hinterlegt. Der (optionale) Fabrikbereich „Bahnübergang“ befindet sich außerhalb der Lernfabrik.

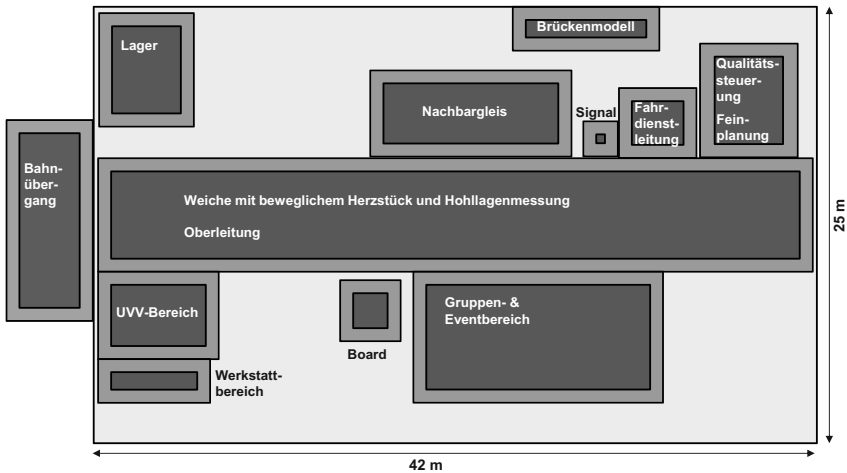


Abbildung 7.2: Erstelltes Layout der Fallstudie 1, eigene Darstellung

7.1.2 Anwendung im universitären Umfeld

Neben der Anwendung in Unternehmen kann die entwickelte Methodik auch zur Konfiguration von Lernfabriken im universitären Umfeld verwendet werden. Im Folgenden wird dazu eine neue Lernfabrik des Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt betrachtet: die FlowFactory. Angelehnt an den Rahmenbedingungen kleiner und mittelständischer Unternehmen in Deutschland ist die Vision der FlowFactory die wirtschaftliche Abwicklung kundenindividueller Aufträge in Kleinserienfertigung zu kurzen Liefer- und Durchlaufzeiten. Neben dem auftragspezifisch veränderbaren Wertstrom werden die ganzheitliche Datenverfügbarkeit in der Produktion sowie Datenanalysen insbesondere durch maschinelles Lernen fokussiert. Dabei werden die Primärziele Forschung, Weiterbildung und Lehre adressiert. Außerdem wird in der FlowFactory einen Makerspace integriert, in dem Studierenden vielfältige Möglichkeiten zum experimentellen Lernen geboten werden [PHK16].

In **Vorgehensschritt I** wurden Anforderungen an die Konfiguration erhoben und strukturiert. Die Anforderungen ließen sich aus den Forschungs- und Lernzielen der FlowFactory ableiten. So sollte das Produkt über elektronische Komponenten verfügen und digitale Inhalte bereitstellen können. Neben der spannenden Fertigung sollen auch additive Verfahren als Fabrikbereiche betrachtet werden. Da der Einsatz von künstlicher Intelligenz in der Produktion gelehrt und erforscht werden soll, sollten in den Fabrikelementen Sensoren zur Datenaufnahme und Schnittstellen zur Datenübertragung vorhanden sein.

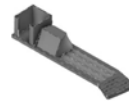
Der Fokus in **Vorgehensschritt II** lag zunächst auf der Auswahl eines passenden Produkts [Kr22]. Nachdem aus den Kann-Anforderungen Bewertungskriterien abgeleitet und gewichtet wurden, erfolgte die Auswahl des Produkts anhand einer Nutzwertanalyse. Das Produkt der FlowFactory stellt eine sog. Smart Office Station dar. Im Anschluss wurden die Fabrikbereiche aus den Anforderungen und dem Produkt hergeleitet. Hierzu zählen Sägen, Fräsen, Laserschneiden, Reinigen & Prüfen, Pulverbeschichten, Ofen, 3D-Druck, Montage & Funktionsprüfung, Logistik sowie Shopfloor Management. Zu jedem Fabrikbereich wurden bis zu fünf Konfigurationsalternativen ermittelt, welche die Muss-Anforderungen erfüllen.

In **Vorgehensschritt III** wurden die ermittelten Konfigurationsalternativen mithilfe der in Abschnitt 5.4.2 beschriebenen Bewertungskriterien bewertet. Dazu wurden keine zusätzlichen Bewertungskriterien benötigt. Die Bewertung erfolgte anhand des Bewertungsschemas für Konfigurationsalternativen (s. Anhang 2.4). Im Projektteam wurde zur Gewichtung der Bewertungskriterien ein Paarvergleich durchgeführt. Die Bewertungskriterien mit den höchsten Gewichtungswerten sind die Kompatibilität, der Einsatz neuer Technologien, die Universalität sowie die Implementierung von Gestaltungsprinzipien. Für die jeweiligen Fabrikelemente in den Konfigurationsalternativen wurden im Anschluss bei den Herstellern Angebote und weitere Informationen eingeholt. Weitere Details zur Gewichtung und den bewerteten Konfigurationsalternativen finden sich in Anhang 3.2.

In **Vorgehensschritt IV** erfolgte die Auswahl der Konfigurationsalternativen durch das entwickelte Konfigurationssystem. Das Ergebnis der Auswahl ist in Abbildung 7.3 dargestellt. Bei dem geplanten Budget von 1.300.000 € weist die bestmögliche Konfiguration einen relativen Nutzwert von 99,03 % auf. Die Fabrikbereiche mit den höchsten Kosten und größten Flächennutzung sind „Fräsen“ und „Logistik“.

Zusammenfassung

Produkt	Smart Office Station	
Σ Nutzwerte	5133	99,03%
Σ Kosten	1.257.164,31 €	94,52%
Σ Fläche	142,41	47,86%



Details

Fabrikbereiche	Konfigurationsalternativen	Nutzwerte	Kosten	Fläche	Rang
Sägen	Alternative 1.1.1	442	86.320,00 €	12,61	1
Fräsen	Alternative 1.2.1	517	395.615,00 €	22,68	4
Laserschneiden	Alternative 1.3.4	470	120.280,44 €	16,83	1
Reinigen & Prüfen	Alternative 1.4.1	436	146.378,82 €	9,67	1
Pulverbeschichten	Alternative 1.5.1	495	27.652,63 €	6,75	2
Ofen	Alternative 1.6.2	508	23.990,00 €	3,70	1
3D-Drucken	Alternative 1.7.1	491	119.900,00 €	4,37	1
Montage & Funktionsprüfung	Alternative 1.8.1	654	76.609,34 €	22,00	1
Logistik	Alternative 1.9.2	515	200.418,08 €	27,80	1
Shopfloor Management	Alternative 1.10.1	605	60.000,00 €	16,00	1

Abbildung 7.3: Ermittelte Konfiguration in Fallstudie 2, eigene Darstellung

Die Nutzen-Budget-Kurve der zweiten Fallstudie ist in Abbildung 7.4 dargestellt. Zu erkennen ist, dass Konfigurationen von ca. 930.000 € bis 2.530.000 € möglich sind. Die relativen Nutzwerte variieren von 90,5 % bis 100 %. Diese geringe Spannweite lässt sich damit erklären, dass alle potenziellen Konfigurationsalternativen einen vergleichsweise hohen Nutzwert aufweisen. Im linken Teil der Kurve (von 930.000 € bis 110.000 €) werden in den Fabrikbereichen „Montage“, „Logistik“ und „Ofen“ bereits die Konfigurationsalternativen mit dem höchsten Nutzwert ausgewählt. In den Fabrikbereichen „Fräsen“ und „Pulverbeschichten“ geschieht dies erst ab einem Budget von ca. 2.500.000 €.

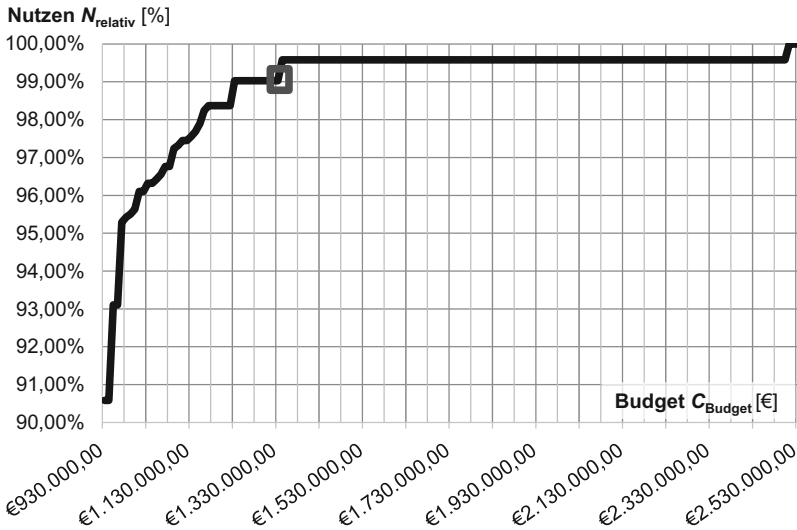


Abbildung 7.4: Nutzen-Budget-Kurve der Fallstudie 2, eigene Darstellung

7.1.3 Anwendung zur Rekonfiguration

Die entwickelte Methodik lässt sich dazu verwenden, bestehende Lernfabriken zu rekonfigurieren. In dieser Forschungsarbeit wird dazu die Prozesslernfabrik „Center für industrielle Produktion“ (CiP) am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt als beispielhafte Anwendung betrachtet (s. Abbildung 7.5). In der Prozesslernfabrik werden seit 2007 Beschäftigte verschiedener Hierarchiestufen aus Industrieunternehmen sowie Studierende zu Themen der schlanken, digitalen Produktion geschult. Das Primärziel liegt auf der betrieblichen Weiterbildung, Forschung und Lehre. [AMT19], [KM22b]

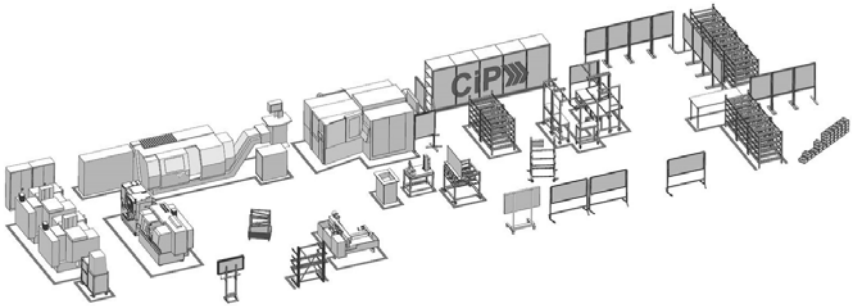


Abbildung 7.5: Dreidimensionale Ansicht der Prozesslernfabrik CiP[KM22b]

In **Vorgehensschritt I** wurden Anforderungen an die Konfiguration ermittelt. Als Muss-Anforderung bleiben die Abmessungen der bestehenden Lernfabrik unverändert bei 38,5 m x 10,4 m. Ein entsprechendes Budget wurde nicht festgelegt. Außerdem soll kein alternatives Produkt berücksichtigt werden. Zusätzliche Fabrikbereiche werden nicht betrachtet und der inhaltliche Fokus soll sich auch nicht grundlegend verändern. Allerdings sollen durch die Betrachtung weiterer Fabrikelemente bessere Möglichkeiten zur schlanken, digitalen Produktion geschaffen werden.

In **Vorgehensschritt II** wurden Konfigurationsalternativen ermittelt. Dabei wurden die bereits vorhandenen Konfigurationsalternativen ohne Kosten einbezogen. Da sich das Produkt zunächst nicht ändern sollte, wird weiterhin der Pneumatikzylinder zugrunde gelegt. Betrachtete Fabrikbereiche teilen sich in Sägen, Drehen, Fräsen, Waschen, Qualitätssicherung, Montage, Funktionsprüfung, Verpacken, Logistik und Shopfloor Management auf. Zu diesen Fabrikbereichen wurden weitere Fabrikelemente berücksichtigt, welche einzelne (oder mehrere) Kann-Anforderungen besser berücksichtigen und die bestehenden Fabrikelemente ersetzen.

In **Vorgehensschritt III** wurden die ermittelten Konfigurationsalternativen mithilfe der in Abschnitt 5.4.2 beschriebenen Bewertungskriterien bewertet. Zur Gewichtung wurden die Werte in den Paarvergleichen für die Primärziele Forschung und Weiterbildung/Lehre gemittelt (s. Anhang 2.5). Die Bewertung erfolgte anhand des definierten Bewertungsschemas. Zu weitergehenden Fragestellungen wurden die Hersteller kontaktiert und Angebote eingeholt, um die Kosten der Fabrikelemente zu ermitteln sowie weitere Informationen zu erhalten. Details zur Gewichtung und den bewerteten Konfigurationsalternativen finden sich in Anhang 3.3.

In **Vorgehensschritt IV** wurden die Konfigurationsalternativen mithilfe des Konfigurationssystems ausgewählt. Da noch kein Budget festgelegt wurde, wurden verschiedene Konfigurationsszenarien für das Budget gebildet. Die Abmes-

sungen der Prozesslernfabrik CiP bleiben jedoch, wie erwähnt, unverändert. Abbildung 7.6 zeigt die Nutzen-Budget-Kurve der dritten Fallstudie. Die relativen Nutzwerte N_{relativ} sind als schwarze Linie dargestellt und so gewählt, dass die aktuelle Konfiguration bei 100 % liegt. Die Anzahl rekonfigurierter Fabrikbereiche ist als graues Balkendiagramm abgebildet. Zu erkennen ist der typische degressive Verlauf der Nutzen-Budget-Kurve. Die Anzahl rekonfigurierter Fabrikbereiche korreliert mit dem relativen Nutzen (Korrelationskoeffizient: 0,73). Bei einem Budget von knapp 3 Millionen Euro werden alle zehn Fabrikbereiche rekonfiguriert, wobei der Nutzen um 20,62 % steigt.

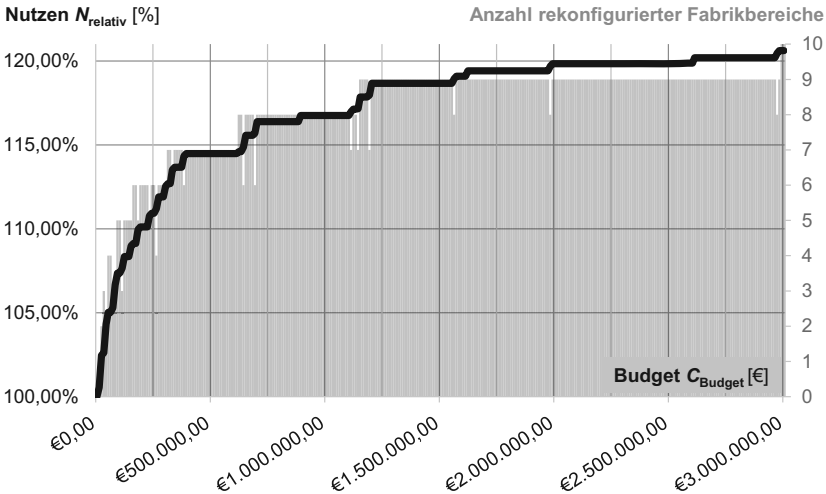


Abbildung 7.6: Nutzen-Budget-Kurve der Fallstudie 3, eigene Darstellung

7.2 Evaluation

In diesem Abschnitt wird die Methodik zur Konfiguration von Lernfabriken aufbauend auf deren Anwendung entsprechend den gesetzten inhaltlichen und formalen Anforderungen (s. Abschnitt 3.2) wissenschaftlich evaluiert. Zunächst wird in Abschnitt 7.2.1 das Evaluationskonzept beschrieben. Im Anschluss werden die Ergebnisse in Abschnitt 7.2.2 vorgestellt.

7.2.1 Evaluationskonzept

Zur Evaluation der entwickelten Methodik werden vier Instrumente eingesetzt, die in Tabelle 7.4 den aufgestellten Anforderungen gegenübergestellt werden:

i. Vergleichsexperiment

Ohne die entwickelte Methodik dieser Forschungsarbeit ist die intuitive Auswahl von Fabrikelementen die einzige Möglichkeit zur Konfiguration von Lern-

fabriken. Durch den Vergleich mit der intuitiven Auswahl kann der Mehrwert der entwickelten Methodik messbar gemacht werden. Dabei wählen die Projektbeteiligten aus Fallstudie 1 in einem Experiment Konfigurationsalternativen des tatsächlichen Anwendungsfalls intuitiv in einem Fragebogen aus. Der Nutzwert wurde nicht angegeben, da dieser erst mithilfe des dritten Vorgehensschritt aus dieser Forschungsarbeit ermittelt werden kann. Bei der intuitiven Auswahl von Konfigurationsalternativen kann es vorkommen, dass Lösungen entstehen, die nicht zulässig sind (bspw. hinsichtlich des Budgets oder den Abmessungen der Lernfabrik). Unzulässige Konfigurationen können einen höheren Nutzwert aufweisen als das jeweilige optimale Ergebnis. Da diese jedoch praktisch nicht implementiert werden können, sollten nur zulässige Lösungen verglichen werden. In dem erstellten Fragebogen zur intuitiven Auswahl von Konfigurationsalternativen wurde deshalb eine Hilfsfunktion integriert, die anzeigt, ob die ausgewählte Konfiguration zulässig ist. Den Projektbeteiligten ist zum Zeitpunkt des Experiments die Lösung durch des Optimierungsmodells nicht bekannt – allerdings kennen sie bereits die einzelnen Vor- und Nachteile der Konfigurationsalternativen, da sie bei den vorherigen Vorgehensschritten mitwirkten.

ii. Analytische Argumentation

Nicht alle formalen und inhaltlichen Anforderungen können durch das Vergleichsexperiment bewertet werden. Die Anforderungen sind teilweise explizit in den Bestandteilen der Methodik berücksichtigt. So kann analytisch-argumentativ die Erfüllung der Anforderungen auf Basis der Methodik begründet werden.

iii. Expertenbefragung

In einem zusätzlichen standardisierten Fragebogen werden die Anforderungen sowohl von den vier Projektbeteiligten als auch von sieben weiteren (internationalen) Expertinnen und Experten aus dem Bereich Lernfabrik-Gestaltung bewertet, z. B. aus der IALF Working Group „Learning Factory Design“ sowie weiteren (promovierten) Wissenschaftler*innen, die bei der Conference on Learning Factories (CLF) veröffentlicht haben. Dazu wird auch eine Selbsteinschätzung zur eigenen Expertise in der Gestaltung von Lernfabriken gegeben. Den Expertinnen und Experten wurde die Methodik dieser Forschungsarbeit im Rahmen einer einstündigen Präsentation erklärt. Im Fragebogen sind die aufgestellten Anforderungen an die Methodik hinterlegt. Neben der entwickelten Methodik dieser Forschungsarbeit wird zudem die intuitive Auswahl bewertet, um auch hier einen Vergleich zu ermöglichen und den Mehrwert der Methodik zu ermitteln. Die Antwortmöglichkeiten werden von 1 („nicht erfüllt“) bis 5 („absolut erfüllt“) angegeben. Des Weiteren gibt es die Möglichkeit, Kommentare in Freitextfeldern anzugeben. Der Fragebogen befindet sich in Anhang 4.

iv. Statistische Untersuchung der Ergebnisse

Einzelne Ergebnisse der empirischen Anwendung werden mithilfe statistischer Verfahren analysiert. Auf diese Weise kann bspw. die Robustheit der ermittelten Konfiguration bezüglich der Gewichtung direkt berechnet werden. Außerdem kann die statistische Signifikanz der Ergebnisse aus dem Vergleichsexperiment ermittelt werden.

In Tabelle 7.4 werden die vier beschriebenen Instrumente zur Evaluation den formalen und inhaltlichen Anforderungen dieser Forschungsarbeit gegenübergestellt.

Tabelle 7.4: Evaluationskonzept, eigene Darstellung

Art	#	Anforderung	Instrument zur Evaluation				
			Vergleichs-experiment	Fragebogen	Analytische Begründung	Statistische Untersuchung	
Inhaltlich	1	Optimalität					
	2	Zielorientierung					
	3	Individualität					
	4	Strukturierter Ablauf					
	5	Geeignete Unterstützung					
Formal	6	Objektivität					
	7	Reliabilität					
	8	Validität	Interne Validität				
			Konstruktvalidität				
			Externe Validität				
	9	Anpassungsfähigkeit					
	10	Robustheit					
	11	Interaktionsfähigkeit					
	12	Simplizität					
13	Kontrollierbarkeit						

Evaluation inhaltlicher Anforderungen

Die **Optimalität** des Optimierungsmodells ergibt sich aus den Algorithmen zur Lösung des MMKP und des FCP. Der im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelte USBB-Algorithmus zur Lösung des MMKP wurde überprüft, indem 11.160 unterschiedliche Instanzen gelöst wurden. Die Instanzen basieren auf gleichverteilten Zufallszahlen für die Nutzwerte n_{ij} und Ressourcenverbräuche w_{ij} . Dabei wurde eine unterschiedliche Anzahl an Fabrikbereichen (2 bis 13) und Konfigurationsalternativen (2 bis 10) betrachtet. Details zum Studiendesign finden sich in KREß ET AL. [KKM21]. Um zu überprüfen, ob wirklich die exakte Lösung gefunden wurde, wurde als Enumerationsverfahren ein Brute-Force-Ansatz implementiert, der alle möglichen Kombinationen untersucht und den jeweils höchsten Gesamtnutzen speichert. Die Optimalität des FCP-Algorithmus basiert zum einen auf dem USBB-Algorithmus, zum anderen muss zur exakten Lösung des FCP sichergestellt werden, dass die optimale Lösung nicht durch Variation des Flächenzulässigkeitsfaktors übersprungen wird.

Darüber hinaus wird die Optimalität im Vergleich zur intuitiven Auswahl betrachtet, um den Mehrwert des Optimierungsmodells zu messen. Zur Messung der Optimalität der intuitiven Auswahl wird der Nutzwert der intuitiven Auswahl N_{intuitiv} (basierend auf den Entscheidungen $x_{i,j,s,\text{person,intuitiv}}$) mit dem Nutzen des Optimierungsmodells N_{optimal} verglichen. Das Verhältnis der beiden Werte – abzüglich des minimal möglichen Nutzens im Anwendungsfall N_{minimal} zur Skalierung – wird in dieser Forschungsarbeit als Effektivität der Konfiguration E bezeichnet und kann durch Formel (28) berechnet werden:

$$E = \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{\text{person}=P_1}^{n_{\text{person}}} \left(\frac{N_{\text{intuitiv},s,\text{person}} - N_{\text{minimal},s}}{N_{\text{optimal},s} - N_{\text{minimal},s}} \right)}{S \cdot n_{\text{person}}} \quad (28)$$

Die Normalisierung ist deshalb notwendig, da sich die optimalen Nutzwerte $N_{\text{optimal},s}$ in jedem Konfigurationsszenario unterscheiden und so eine Vergleichbarkeit entsteht. Je kleiner die Effektivität der intuitiven Auswahl ist, umso höher ist der Mehrwert des Optimierungsmodells in der entwickelten Methodik.

Des Weiteren werden zur Auswertung des Vergleichsexperiments die einzelnen Entscheidungen der Fabrikbereiche herangezogen. Dazu werden die vom optimalen Ergebnis abweichenden Entscheidungen betrachtet, d. h., ob je Fabrikbereich die gleiche Konfigurationsalternative ausgewählt wurde. Weicht die Entscheidung ab, ist die Binärvariable $d_{s,i,\text{person}}$ gleich 1, sonst 0. Die relative Anzahl an abweichenden Entscheidungen D ergibt sich in Formel (29) aus dem Mittelwert dieser Binärvariablen über alle Fabrikbereiche I , Konfigurationsszenarien S und Personen n_{Personen} .

$$D = \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \sum_{\text{person}=P_1}^{n_{\text{Personen}}} d_{s,i,\text{person}}}{I \cdot S \cdot n_{\text{Personen}}} \quad (29)$$

Die nachfolgenden inhaltlichen Anforderungen werden zum einen analytisch-argumentativ bewertet und zum anderen durch einen Fragebogen mit der intuitiven Auswahl verglichen. Die **Zielorientierung** hinsichtlich der Primärziele von Lernfabriken – Forschung, Lehre und Weiterbildung – sollte in der Methodik berücksichtigt werden. Dies stellt vor allem eine Anforderung an das Optimierungsmodell und das Vorgehen zur Konfiguration dar. Die **Individualität** unterschiedlicher Lernfabrikkonzepte sollte beachtet werden. Sowohl für das Optimierungsmodell als auch für das Vorgehen zur Konfiguration ist dies zur praktischen Anwendung relevant. Ein **strukturierter Ablauf** der Methodik sollte gegeben sein. Dies wirkt sich vor allem auf das Vorgehen zur Konfiguration sowie auf das Konfigurationssystem aus. Die Umsetzung der Methodik sollte durch eine **geeignete Unterstützung** erfolgen. Dies wird vor allem durch das Konfigurationssystem ermöglicht, welches das Optimierungsmodell lösen soll. Dieses sollte auf dem Vorgehen zur Konfiguration aufbauen.

Evaluation formaler Anforderungen

Objektivität liegt vor, wenn mehrere Personen unabhängig voneinander zum gleichen Ergebnis kommen [AI09]. In der vorliegenden Forschungsarbeit wird die Objektivität der intuitiven Auswahl durch die Interrater-Reliabilität gemessen. Beim Vergleichsexperiment werden die Ergebnisse unterschiedlicher Personen – bezüglich der Auswahl von Konfigurationsalternativen – gemessen. Anschließend wird Fleiss' Kappa κ_{Fleiss} durch Formel (30) berechnet [FI71].

$$\kappa_{\text{Fleiss}} = \frac{\bar{P} - \bar{P}_e}{1 - \bar{P}_e} \quad (30)$$

Die weiteren formalen Anforderungen werden ebenfalls analytisch-argumentativ begründet und durch Expertenbefragungen mit der intuitiven Auswahl verglichen. **Reliabilität** ist gegeben, wenn eine Methodik bei wiederholter Durchführung zum gleichen Ergebnis führt [GRW08]. **Validität** gibt an, ob eine Methodik für das Forschungsziel bzw. zur Beantwortung der Forschungsfrage geeignet ist [CS66]. Dabei kann zwischen der internen Validität, der Konstruktvalidität und der externen Validität unterschieden werden [We15]. Durch die **interne Validität** wird sichergestellt, dass das Ergebnis durch die Änderung der Eingangsgrößen zustande kommt und nicht durch sonstige Störgrößen (Ursache-Wirkungs-Beziehung). **Konstruktvalidität** liegt dann vor, wenn die Messung eines Konstrukts dessen Inhalt in all seinen Aspekten erfasst. Als Konstrukt wird die Konfiguration einer Lernfabrik betrachtet. Die **externe Validität** betrachtet die Übertragbarkeit auf weitere Anwendungsfälle sowie die Generalisierbarkeit der Methodik. Durch das wiederholte erfolgreiche Anwenden der Methodik erhöht sich deren externe Validität. Die Betrachtung weiterer Anwendungsfälle der Methodik sollte bei der Konzeption beachtet werden.

Die **Anpassbarkeit** der Methodik durch neue Informationen sollte gegeben sein [Li70]. Durch die **Robustheit** der Methodik verhält sich das Ergebnis gegenüber Unsicherheiten der Eingangsgrößen stabil [Sc01]. Dazu werden in dieser Forschungsarbeit vor allem die Gewichtungswerte der Bewertungskriterien betrachtet, da diese subjektive Aspekte beinhalten. Die Gewichtungswerte werden in einer Sensitivitätsanalyse [SvH10] einzeln so lange variiert, bis sich die Konfiguration der Lernfabrik erstmalig ändert. Zur Bewertung der Robustheit wird die durchschnittliche Abweichung vom ursprünglichen Gewichtungswert betrachtet. Die **Interaktionsfähigkeit** gewährleistet die einfache Änderung von Eingangsgrößen sowie die Umsetzung eines neuen Ergebnisses in kurzer Zeit [Li70]. **Simplizität** bezeichnet die Beschränkung und den Fokus auf die wesentlichen Elemente, wodurch – bei ausreichender Modellierung der Realität – die Methodik anwendbar bleibt [Li70]. Durch die **Kontrollierbarkeit** sind die Ergebnisse bezüglich der Eingangsgrößen nachvollziehbar.

7.2.2 Evaluationsergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Evaluation vorgestellt. Diese sind nach den inhaltlichen und formalen Anforderungen geordnet.

Inhaltliche Anforderungen

Die **Optimalität** des Optimierungsmodells wurde experimentell anhand der 11.160 aufgestellten Instanzen bestimmt (s. Abschnitt 7.2.1). Der entwickelte USBB-Algorithmus hat bei jeder Instanz die exakte Lösung des Optimierungsproblems gefunden, welche durch den Brute-Force-Ansatz ermittelt wurde. Im Gegensatz zum Brute-Force-Ansatz musste nicht der gesamte Lösungsraum durchsucht werden, sondern lediglich 17 % im Durchschnitt. Dies bestätigt die theoretische Vermutung aus Abschnitt 4.2.1 [KKM21]. Außerdem wurde überprüft, ob zur Lösung des FCP Lösungen durch den Flächenzulässigkeitsfaktor übersprungen werden. Dazu wurden die einzelnen Lösungsvektoren betrachtet. Das Überspringen eines Knotens wurde in keinem Fall beobachtet. Dies liegt vor allem daran, dass die Änderung des Flächenzulässigkeitsfaktors so klein ist, dass dies nicht auftreten kann. Auch hier kann die theoretische Vermutung aus Abschnitt 4.2.2 bestätigt werden.

Die Auswertung des Vergleichsexperiments mit der intuitiven Auswahl zeigt, dass das Ergebnis der Methodik hinsichtlich der Effizienz E durchschnittlich 22,87 % bessere Nutzwerte für die Konfiguration liefert ($n=36$) [KM22a]. Um die Signifikanz dieses Ergebnisses zu bewerten, wurde ein t-Test durchgeführt. Dieser bestätigt bei einem p-Wert von 10^{-10} die statistische Signifikanz des Ergebnisses.⁴⁴ Die Aufteilung in den 3x3-Konfigurationsszenarien zeigt weitere Details (s. Abbildung 7.7). Dabei ist ersichtlich, dass sich bei der intuitiven Auswahl mit kleineren Kapazitätsgrenzen ($C_{\text{Fläche}}$ und C_{Budget}) die Effizienz bis auf 61,48 % verkleinert und somit 38,52 % kleiner als das optimale Ergebnisse ist [KM22a].

Außerdem wurden für die intuitive Auswahl die relative Anzahl an abweichenden Entscheidungen D zu den einzelnen Fabrikbereichen im Vergleich zum optimalen Ergebnis betrachtet. Die Auswertung zeigt, dass durchschnittlich 40,83 % der Entscheidungen abweichen [KM22a]. Die statistische Auswertung durch einen t-Test zeigt die hohe Signifikanz des Ergebnisses bei einem p-Wert von 10^{-15} . Auch hier können weitere Erkenntnisse durch die Aufteilung in den 3x3-Konfigurationsszenarien gewonnen werden (s. Abbildung 7.7). Generell ist zu erkennen, dass bei der intuitiven Auswahl bei kleineren Kapazitätsgrenzen ($C_{\text{Fläche}}$ und C_{Budget}) die Anzahl der abweichenden Entscheidungen bis zu einem Wert von 67,50 % zunimmt [KM22a].

⁴⁴ Die Anwendung des t-Tests ist in hier angemessen, da die Stichprobe größer als 30 ist.

Effizienz E						Abweichende Entscheidungen						
		Abmessungen der Lernfabrik							Abmessungen der Lernfabrik			
		C _{Fläche}							C _{Fläche}			
Budget	C _{Budget}		Hoch	Moderat	Gering			Hoch	Moderat	Gering		
		Hoch	83,50%	85,20%	92,05%	86,91%	Hoch	15,00%	22,50%	37,50%	25,00%	
		Moderat	71,22%	69,52%	88,67%	76,47%	Moderat	25,00%	47,50%	45,00%	39,17%	
Gering	70,04%	72,47%	61,48%	68,00%	Gering	52,50%	55,00%	67,50%	58,33%			
		74,92%	75,73%	80,73%	77,13%			30,83%	41,67%	50,00%	40,83%	

Abbildung 7.7: Effizienz und abweichende Entscheidungen der intuitiven Auswahl, eigene Darstellung

Tabelle 7.5 zeigt die Auswertung der standardisierten Expertenbefragung der inhaltlichen Anforderungen. Die Anforderung Optimalität schneidet hier mit einem Mittelwert von 4,82 ab. Im Vergleich dazu wurde die intuitive Auswahl mit 2,64 bewertet. Die in dieser Forschungsarbeit entwickelte Methodik erfüllt daher die Anforderung Optimalität zu einem höheren Grad als die intuitive Auswahl.

Tabelle 7.5: Ergebnis der Expertenbefragung zu den inhaltlichen Anforderungen, eigene Darstellung

Art	#	Anforderung	Mittelwerte		Differenz
			Intuitive Auswahl	Methodik dieser Forschungsarbeit	
Inhaltlich	1	Optimalität	2,64	4,82	2,18
	2	Zielorientierung	2,82	4,73	1,91
	3	Individualität	3,91	4,64	0,73
	4	Strukturierter Ablauf	1,82	5,00	3,18
	5	Geeignete Unterstützung	1,55	4,64	3,09

Die Anforderung **Zielorientierung** wird vor allem im ersten Vorgehensschritt berücksichtigt, da hier die Anforderungen aus den Lern- und Forschungszielen abgeleitet werden. Die Muss-Anforderungen werden im weiteren Verlauf für die Vorauswahl der Konfigurationsalternativen genutzt (s. Abschnitt 5.3); aus den Kann-Anforderungen werden Bewertungskriterien gebildet, durch welche der Nutzwert der Konfigurationsalternativen steigt (s. Abschnitt 5.4). Auf diese Weise werden die Primärziele auch in der Zielfunktion des Optimierungsmodells berücksichtigt. Daher orientiert sich die entwickelte Methodik systematisch an den Primärzielen von Lernfabriken. Die Expertenbefragung hat zudem ergeben, dass der Mittelwert der Anforderung Zielorientierung bei 4,73 eingeschätzt wird. Zum Vergleich: Die intuitive Auswahl wird mit 2,82 niedriger eingeschätzt.

Die Anforderung **Individualität** wird in allen Bestandteilen der entwickelten Methodik beachtet. Ausgehend von den heutigen Lernfabrikkonzepten [AMT19] könnte jeder Fall durch die Methodik abgebildet werden: Es können keine Einschränkungen festgestellt werden, z. B. zur Auswahl der Fabrikbereiche oder Konfigurationsalternativen. In der Expertenbefragung liegt der Mittelwert dieser Anforderung bei 4,64. Im Vergleich zur intuitiven Auswahl mit einem Mittelwert

von 3,91 zeigt sich allerdings, dass sich diese Anforderung nicht deutlich erhöht hat, da individuelle Konzepte auch mit der intuitiven Auswahl ermöglicht werden.

Die Anforderung **strukturierter Ablauf** wird explizit im Vorgehen zur Konfiguration (s. Kapitel 5) berücksichtigt. Zum Konfigurationssystem wurde ein Bedienungshandbuch verfasst, das den genauen Ablauf bei der Nutzung des Konfigurationssystems beschreibt. Die befragten Experten schätzen den Erfüllungsgrad dieser Anforderung ausnahmslos auf 5,00. Die intuitive Auswahl erreicht einen Mittelwert von 1,82.

Die Anforderung **geeignete Unterstützung** wird ebenfalls explizit im softwarebasierten Konfigurationssystem für Lernfabriken (s. Kapitel 6) umgesetzt, dessen Funktionen aus dem Vorgehen zur Konfiguration hergeleitet wurden (s. Abschnitt 6.1). Diese Anforderung erreicht einen Mittelwert von 4,64. Der Mittelwert der intuitiven Auswahl ist mit 1,55 deutlich kleiner, da hier keine standardisierten Hilfsmittel zur Unterstützung existieren.

Formale Anforderungen

Die Anforderung **Objektivität** wird im Vergleichsexperiment durch die Interrater-Reliabilität gemessen. Zur Berechnung der Interrater-Reliabilität wird Fleiss' Kappa κ_{Fleiss} herangezogen. Die Berechnung von Fleiss' Kappa κ_{Fleiss} ergibt 28,14 % (bei $n=36$). Nach der Einordnung von CICHETTI UND SPARROW sowie von FLEISS ET AL. entspricht dies einer schwachen Interrater-Reliabilität [CS81], [FLP13]. Unterschiedliche Personen gelangen somit bei der intuitiven Auswahl zu unterschiedlichen Konfigurationen. Insgesamt kann die Objektivität der intuitiven Auswahl damit als schwach gewertet werden. Im Vergleich dazu gelangt die Methodik dieser Forschungsarbeit unter den gleichen Rahmenbedingungen in jedem Fall zum gleichen (und bestmöglichen) Ergebnis, was einer Interrater-Reliabilität von 100 % entspricht. Damit kann die Objektivität der in dieser Forschungsarbeit entwickelten Methodik als höher gewertet werden.

Tabelle 7.6 zeigt die Auswertung der standardisierten Expertenbefragung der formalen Anforderungen. Hier ist zu erkennen, dass die Anforderung Objektivität einen Mittelwert von 4,45 aufweist. Vergleichsweise schätzen die Experten die Objektivität der intuitiven Auswahl auf 1,73. Allerdings sollte an dieser Stelle erwähnt werden, dass dennoch subjektive Aspekte in der Methodik bestehen: Bspw. hängen die Gewichtungswerte der Bewertungskriterien beim Paarvergleich von den Einschätzungen der Personen ab, welche die Lernfabrik konfigurieren. Außerdem ist die Vorauswahl der Konfigurationsalternativen personenabhängig. Aus diesem Grund wird empfohlen die Konfiguration von Lernfabriken möglichst in Projektteams durchzuführen. Dennoch kann die Objektivität dieser Forschungsarbeit als hoch gewertet werden.

Tabelle 7.6: Ergebnis der Expertenbefragung zu den formalen Anforderungen, eigene Darstellung

Art	#	Anforderung	Mittelwerte		Differenz	
			Intuitive Auswahl	Methodik dieser Forschungsarbeit		
Formal	6	Objektivität	1,73	4,45	2,73	
	7	Reliabilität	2,36	4,82	2,45	
	8	Validität	Interne Validität	2,55	4,82	2,27
			Konstruktvalidität	2,36	4,45	2,09
			Externe Validität	3,36	4,82	1,45
	9	Anpassungsfähigkeit	4,00	4,73	0,73	
	10	Robustheit	2,82	4,36	1,55	
	11	Interaktionsfähigkeit	1,82	4,82	3,00	
	12	Simplizität	2,64	4,27	1,64	
	13	Kontrollierbarkeit	2,91	4,91	2,00	

Die schwache Interrater-Reliabilität der intuitiven Auswahl lässt Rückschlüsse auf die Anforderung **Reliabilität** zu. Grundsätzlich kann bei der intuitiven Auswahl nicht sichergestellt werden, dass die gleiche Person bei der wiederholten Auswahl zu einem anderen Zeitpunkt zur gleichen Auswahl kommt. Im Vergleich ist in der entwickelten Methodik dieser Forschungsarbeit die Auswahl immer gleich, da das Optimierungsmodell immer exakt gelöst wird. Bei der Expertenbefragung erreicht die entwickelte Methodik einen Mittelwert von 4,82 – die intuitive Auswahl im Vergleich 2,36.

Die **Validität** gibt an, ob das Ergebnis der Methodik mit dem gewünschten übereinstimmt, sprich der bestmöglichen Konfiguration einer Lernfabrik. Dies spiegelt sich bereits in der inhaltlichen Anforderung der Optimalität wider. Die **interne Validität** wird in der Expertenbefragung mit 4,82 bewertet, die intuitive Auswahl mit 2,55. Die **Konstruktvalidität** erreicht den Wert 4,45 (intuitive Auswahl: 2,36) und die **externe Validität** 4,82 (intuitive Auswahl: 3,36). Die geringere Differenz bei der externen Validität kann damit erklärt werden, dass die intuitive Auswahl grundsätzlich auch auf weitere Anwendungsfälle übertragbar ist.

Die Anforderung **Anpassungsfähigkeit** erreicht in der Expertenbefragung einen Mittelwert von 4,73. Durch das Konfigurationssystem können die Eingangsgrößen im Projektverlauf einfach und aufwandsarm geändert werden. Die intuitive Auswahl erreicht einen Mittelwert von 4,00, was damit begründet werden kann, dass Eingabewerte bei der intuitiven Auswahl ebenfalls einfach geändert werden können.

Die **Robustheit** der Ergebnisse erzielt bei der Expertenbefragung einen Mittelwert von 4,36 (intuitive Auswahl: 2,82). Zusätzlich ist für die Fallstudie 1 eine Sensibilitätsanalyse der Gewichtungen vorgenommen worden, die einen subjektiven Einfluss auf die Konfiguration beinhalten. Die einzelnen Gewichtungswerte wurden so lange variiert, bis sich die Konfiguration erstmalig änderte, d. h. mindestens in einem Fabrikbereich eine andere Konfigurationsalternative gewählt wurde. Zum einen wurden die einzelnen Gewichtungen positiv bis über den

ursprünglichen Wertebereich (0 bis 10) auf 150 variiert, zum anderen negativ bis auf 0. Bei den 14 Bewertungskriterien in der ersten Fallstudie gibt es demnach 28 Variationen, von denen 14 Variationen im untersuchten Bereich zu keinen Änderungen der Konfiguration führen. Durchschnittlich müssen die Gewichtungen um 525,55 % positiv (bei 8 Variationen) und um 79,24 % negativ (bei 2 Variationen) variiert werden, bis sich die Konfiguration erstmalig ändert. Lediglich 3 Variationen liegen innerhalb des gültigen Wertebereichs. Die Konfigurationen unterscheiden sich lediglich um jeweils eine geänderte Konfigurationsalternative. Insgesamt wirken sich einzelne Abweichungen der Gewichtungen nur sehr schwach auf das Ergebnis der Methodik aus. Von diesen Ergebnissen ausgehend verhält sich die Methodik robust auf Unsicherheiten bezüglich der Gewichtungswerte.

Die **Interaktionsfähigkeit** wird in der entwickelten Methodik vor allem durch das softwarebasierte Konfigurationssystem erreicht, in welchem durch neue Eingabewerte auf einfache Weise und in kurzer Zeit neue bestmögliche Konfigurationen erreicht werden. Die Experten schätzen den Erfüllungsgrad dieser Anforderung durchschnittlich auf 4,82 – die intuitive Auswahl wird 1,82 geschätzt. Die Methodik erreicht damit einen höheren Erfüllungsgrad als die intuitive Auswahl und kann als interaktiv angesehen werden.

Die Anforderung **Simplizität** fordert für die Methodik eine begrenzte und gleichzeitig ausreichende Komplexität. Dies wird vor allem durch die verschiedenen Konfigurationsfälle im softwarebasierten Konfigurationssystem erreicht (s. Abbildung 6.2). Je nach Fall wird die Komplexität durch die Verwendung bereits bestehender Daten verringert. In der Expertenbefragung erreicht die Simplizität einen Mittelwert von 4,27, die intuitive Auswahl 2,64. Im Gegensatz zur Methodik dieser Forschungsarbeit wird die Komplexität der intuitiven Auswahl als nicht ausreichend hoch eingeschätzt, da elementare Aspekte nicht berücksichtigt werden.

Die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse wird durch die Anforderung **Kontrollierbarkeit** formalisiert. Im softwarebasierten Konfigurationssystem lassen sich verschiedene Konfigurationen miteinander vergleichen. Hierdurch werden die Änderungen der Ergebnisse durch Variation der Eingabegrößen direkt nachvollziehbar. Die befragten Experten schätzen den Erfüllungsgrad der in dieser Forschungsarbeit entwickelten Methodik auf durchschnittlich 4,91; der Mittelwert der intuitiven Auswahl liegt zum Vergleich bei 2,91.

7.3 Diskussion

In diesem Abschnitt werden die Anwendung der entwickelten Methodik zur Konfiguration von Lernfabriken sowie deren wissenschaftliche Evaluation diskutiert. Die Methodik wurde in drei Fallstudien eingesetzt, die verschiedene Planungsfälle von Lernfabriken umfassen. Dabei konnte gezeigt werden, dass die

Methodik zu detaillierten Ergebnissen führt, die zur Beschaffung von Fabrikelementen genutzt werden können. Die zu konfigurierenden Lernfabriken in den Fallstudien unterscheiden sich derart, dass von der generellen Anwendbarkeit der Methodik für weitere Lernfabrikprojekte auszugehen ist.

In bisherigen Ansätzen zur Gestaltung von Lernfabriken werden Fabrikelemente lediglich intuitiv ausgewählt. Durch den Einsatz des in dieser Forschungsarbeit hergeleiteten Optimierungsmodells kann die bestmögliche Konfiguration einer Lernfabrik ermittelt werden. Die Ergebnisse weisen signifikant bessere Nutzwerte auf als die Konfigurationen, die intuitiv ermittelt werden. Dies liegt vor allem darin begründet, dass es sich bei der Konfiguration von Lernfabriken um eine komplexe Aufgabe handelt, bei der (abhängig von der Anzahl an Fabrikbereichen und Konfigurationsalternativen) mehrere Millionen Möglichkeiten entstehen⁴⁵. Im entwickelten Konfigurationssystem sind die Algorithmen zur exakten Lösung des Optimierungsmodells hinterlegt. Zusätzlich bietet das Konfigurationssystem weitere Funktionalitäten, die aus dem Vorgehen zur Konfiguration hergeleitet wurden. Angesichts des i. d. R. hohen Kapiteleinsatzes ist deshalb von der intuitiven Auswahl abzuraten. Der zur Anwendung der Methodik verbundene Mehraufwand im Vergleich zur intuitiven Auswahl ist ähnlich hoch, da die entsprechenden Informationen (Kosten, Flächenbedarf, Erfüllung der Anforderungen) auch bei der intuitiven Auswahl einzuholen sind. Mithilfe der Methodik können zudem verschiedene Konfigurationsszenarien analysiert werden, um die Entscheidungsfindung zu verbessern. So konnte in Fallstudie 1 gezeigt werden, dass bereits mit 30 % des ursprünglich geplanten Budgets und 70 % der geplanten Lernfabrikabmessungen ein relativer Nutzen von 99,44 % erreicht werden kann.

Die wissenschaftliche Evaluation zeigt zudem, dass die Methodik eine signifikant höhere Objektivität aufweist, die durch die Interrater-Reliabilität gemessen wurde. Bei der intuitiven Auswahl von Fabrikelementen kommen unterschiedliche Personen zu einer unterschiedlichen Auswahl – auch wenn diese vorher die Konfigurationsalternativen gemeinsam bewertet haben und so die einzelnen Vor- und Nachteile kennen. Die Methodik dieser Forschungsarbeit nutzt hingegen dazu die Ergebnisse des Optimierungsmodells und kommt so personenunabhängig unter den gleichen Rahmenbedingungen zu gleichbleibenden und gleichzeitig bestmöglichen Ergebnissen.

Die Ergebnisse dieser Methodik sind lediglich dann nicht zufriedenstellend, wenn relevante Muss- oder Kann-Anforderungen nicht beachtet wurden. Falls dies der Fall ist, können diese weiteren Anforderungen durch das entwickelte Konfigurationssystem interaktiv implementiert werden, indem bspw. neue Bewertungskriterien gebildet werden und sich durch die anschließende Bewertung der Konfi-

⁴⁵ In den Anwendungsfällen wurden bspw. 10 Fabrikbereiche mit 5 Konfigurationsalternativen betrachtet. Dadurch ergeben sich $5^{10} = 9.765.625$ Möglichkeiten.

gurationsalternativen der Nutzwert und somit das Ergebnis ändert. Werden neue Muss-Anforderungen hinzugefügt, ist zu überprüfen, ob die aktuelle Vorauswahl der Konfigurationsalternativen diese erfüllen. Falls das nicht der Fall ist, sind diese entsprechend aus der Vorauswahl zu entfernen.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass mit der entwickelten Methodik die bestmögliche Konfiguration von Lernfabriken basierend auf einem Optimierungsmodell ermittelt werden kann. Mit dem hergeleiteten Vorgehen und dem Konfigurationssystem bietet die Methodik laut der befragten Experten einen Mehrwert im Vergleich zu den bisherigen Ansätzen. Die an die Methodik gestellten inhaltlichen und formalen Anforderungen können zusammengefasst als erfüllt angesehen werden. In Tabelle 7.7 sind die Evaluationsergebnisse dargestellt. In der Spalte „Bewertung“ deuten die gefüllten Kreise den Erfüllungsgrad der jeweiligen Anforderungen an. Die Spalte „Mehrwert zu bisherigen Ansätzen“ zeigt die Expertenbewertungen.

Tabelle 7.7: Ergebnisse der Evaluation, eigene Darstellung

Art	#	Anforderung	Erfüllung in der entwickelten Methodik	Mehrwert zu bisherigen Ansätzen	
Inhaltlich	1	Optimalität	●		
	2	Zielorientierung	●		
	3	Individualität	●		
	4	Strukturierter Ablauf	●		
	5	Geeignete Unterstützung	●		
Formal	6	Objektivität	●		
	7	Reliabilität	●		
	8	Validität	Interne Validität	●	
			Konstruktvalidität	●	
			Externe Validität	●	
	9	Anpassungsfähigkeit	●		
	10	Robustheit	●		
	11	Interaktionsfähigkeit	●		
12	Simplizität	●			
13	Kontrollierbarkeit	●			

8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Kapitel wird die vorliegende Forschungsarbeit zum einen anhand der aufgestellten Forschungsfragen zusammengefasst (Abschnitt 8.1), zum anderen werden weiterführende Forschungsthemen als Ausblick aufgezeigt (Abschnitt 8.2).

8.1 Zusammenfassung

Lernfabriken stellen ein geeignetes Instrument zur Weiterbildung, Forschung und Lehre in Unternehmen und Forschungsinstituten zu Inhalten rund um die industrielle Produktion dar [Ab15b]. Aus diesem Grund werden weltweit vermehrt Lernfabriken in Unternehmen und Universitäten gestaltet und aufgebaut [AMT19]. Bisherige Gestaltungsansätze für Lernfabriken fokussieren dabei nicht deren Konfiguration (s. Kapitel 2). Die Auswahl von Fabrikelementen findet i. d. R. intuitiv statt. So kann nicht sichergestellt werden, dass die bestmögliche Ausstattung ermittelt wird. Bisherige quantitative Ansätze zur Konfiguration industrieller Fabriken betrachten lediglich einen Fabrikbereich, wodurch finanzielle und bauliche Restriktionen auf Fabrikebene nicht betrachtet werden können. Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist es daher, diese Forschungslücke durch eine wissenschaftlich fundierte Methodik zu schließen. Dazu wurden drei Forschungsfragen gestellt, die im Folgenden zusammenfassend beantwortet werden.

Forschungsfrage 1:

Wie kann die bestmögliche Konfiguration einer Lernfabrik ermittelt werden?

Die bestmögliche Konfiguration einer Lernfabrik kann durch den Einsatz eines Optimierungsmodells ermittelt werden. Das Optimierungsmodell wurde im Rahmen dieser Forschungsarbeit hergeleitet und setzt sich aus Entscheidungsvariablen, einer Zielfunktion sowie Restriktionen zusammen (s. Kapitel 4). Aus der exakten Lösung des Optimierungsmodells bestimmt sich die bestmögliche Konfiguration hinsichtlich der definierten Zielfunktion. Zur Modellierung werden für jeden Fabrikbereich Konfigurationsalternativen gebildet, die aus einem oder mehreren Fabrikelementen bestehen. Die Entscheidungsvariablen kennzeichnen, welche Konfigurationsalternativen für einen Fabrikbereich ausgewählt werden. Die Zielfunktion bildet sich aus den summierten Nutzwerten aller ausgewählten Konfigurationsalternativen und kann als Summenprodukt der Entscheidungsvariablen mit den jeweiligen Nutzwerten dargestellt werden. Restriktionen zur Konfiguration einer Lernfabrik stellen u. a. das vorhandene Budget und die Fläche der Lernfabrik dar. So kann festgestellt werden, dass das Optimierungsmodell zur Konfiguration grundlegend auf dem MMKP aufbaut. Da jedoch die konkreten Abmessungen einer Lernfabrik berücksichtigt werden müssen, wird das Modell um zusätzliche Restriktionen des BPP erweitert. Im Rahmen dieser

Forschungsarbeit ist ein erster exakter Lösungsalgorithmus für das hergeleitete Optimierungsmodell entwickelt worden. Dieser basiert auf einem Branch-and-Bound-Ansatz und baut auf der systematischen Variation der Ränge auf. Durch den Vergleich mit einem Enumerationsverfahren konnte gezeigt werden, dass der entwickelte Algorithmus zu jeder aufgestellten Instanz die exakte Lösung finden konnte. Mit Hilfe des aufgestellten Optimierungsmodell kann daher die bestmögliche Konfiguration einer Lernfabrik ermittelt werden.

Forschungsfrage 2:

Nach welchem strukturierten Vorgehen können Lernfabriken konfiguriert werden?

Das in der vorliegenden Forschungsarbeit entwickelte Vorgehen zur Konfiguration von Lernfabriken ist in vier Vorgehensschritte eingeteilt (s. Kapitel 5). Zur Konfiguration von Lernfabriken sollten zunächst die zugrundeliegenden Anforderungen geklärt werden (Vorgehensschritt I). Diese gehen vor allem aus den zuvor ermittelten Lern- und Forschungszielen sowie den Rahmenbedingungen der Organisation hervor, die eine Lernfabrik betreiben möchte. Dabei wird zwischen Muss- und Kann-Anforderungen unterschieden. Im Anschluss werden mögliche Konfigurationsalternativen gebildet, die aus Fabrikelementen bestehen (Vorgehensschritt II). Dabei werden die ermittelten Muss-Anforderungen beachtet, die bei jeder Konfigurationsalternative zu berücksichtigen sind. Die Auswahl des Produkts bzw. der Dienstleistung der Lernfabrik bestimmt den abgebildeten Wertstrom der Lernfabrik und somit deren Fabrikbereiche. Zu jedem Fabrikbereich sind mögliche Konfigurationsalternativen zu gestalten, die aus einem oder mehreren Fabrikelementen bestehen. Diese Vorauswahl an Konfigurationsalternativen wird anschließend bewertet (Vorgehensschritt III). Aus den Kann-Anforderungen werden die entsprechenden Bewertungskriterien abgeleitet, welche zu gewichten sind. Dabei sind auch die in dieser Forschungsarbeit ermittelten Bewertungskriterien zu beachten, welche für Lernfabriken typisch sind. Die tatsächliche Bewertung erfolgt möglichst objektiv durch operationalisierte Variablen. Durch Anwendung und Lösung des Optimierungsmodells anhand ausgewählter Algorithmen kann abschließend die bestmögliche Konfiguration einer Lernfabrik ermittelt und analysiert werden (Vorgehensschritt IV). Als geeignete Unterstützung wurde dazu im Rahmen dieser Forschungsarbeit ein softwaregestütztes Konfigurationssystem konzipiert und umgesetzt, das sich am gezeigten Vorgehen orientiert und in dem die Algorithmen zur Lösung des Optimierungsmodells hinterlegt sind (s. Kapitel 6).

Forschungsfrage 3:

Welchen Mehrwert bietet die Methodik dieser Arbeit im Vergleich zur intuitiven Auswahl?

Die in dieser Forschungsarbeit entwickelte Methodik wurde in drei Fallstudien angewendet, welche verschiedene Planungsfälle für Lernfabriken in Unternehmen und Forschungseinrichtungen darstellen (s. Kapitel 7). Zur Evaluation wurde ein Vergleichsexperiment durchgeführt, bei dem die Ergebnisse dieser Methodik mit der intuitiven Auswahl von Fabrikelementen verglichen wurden. Dabei ist zu erwähnen, dass die Projektbeteiligten bei der Bewertung der Konfigurationsalternativen mitgewirkt haben, jedoch die optimalen Ergebnisse nicht kannten. Bei der intuitiven Auswahl waren die Nutzwerte durchschnittlich mehr als 22 % niedriger als das optimale Ergebnis. Außerdem sind die Konfigurationen bei der intuitiven Auswahl personenabhängig und damit nicht objektiv. Im Vergleich dazu kann durch die Methodik dieser Forschungsarbeit personenunabhängig bei jeder Durchführung die bestmögliche Konfiguration ermittelt werden. In einer Expertenbefragung konnte zusätzlich gezeigt werden, dass die Methodik dieser Forschungsarbeit hinsichtlich der gestellten Anforderungen besser eingeschätzt wird als bisherige Ansätze.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die vorliegende Forschungsarbeit einen wichtigen Beitrag zur Lernfabrik-Forschung leistet. Mit der entwickelten Methodik lassen sich Konfigurationen ermitteln, die signifikant bessere Nutzwerte aufweisen als bisherige Verfahren. Dadurch wird die Auswahl von Fabrikelementen in Lernfabriken verbessert, in denen Kompetenzen zu produktionsrelevanten Themen vermittelt werden und Produktionsforschung stattfindet.

8.2 Ausblick

Die Erfüllung der gestellten Anforderungen der entwickelten Methode zur Konfiguration von Lernfabriken konnte zwar in der vorliegenden Forschungsarbeit gezeigt werden, weiterer Forschungsbedarf ergibt sich dennoch aus den gewonnenen Erkenntnissen. Dazu sind die folgenden Aspekte zu nennen:

- Die entwickelte Methodik wurde vorwiegend für Kompetenzen zur schlanken Produktion entwickelt. In den Anwendungsfällen wurden auch *weitere Kompetenzklassen* einbezogen. Dies legt die breite Anwendbarkeit nahe, jedoch kann die Methodik durch die systematische Betrachtung ergänzender Kompetenzklassen inhaltlich erweitert werden. So könnten bspw. Lernfabriken zur Energieeffizienz oder zur Digitalisierung, insbesondere dem Einsatz künstlicher Intelligenz in der Produktion, konfiguriert werden. Zur inhaltlichen Erweiterung sind vor allem die Anforderungen (in Vorgehensschritt I) und darauf aufbauend die Bewertungskriterien (in Vorgehensschritt III) anzupassen.
- Physische Lernfabriken sind hinsichtlich der abgebildeten Realität in verschiedener Dimensionen limitiert [TM17]. So können bspw. nicht immer Lösungen bestimmter Probleme in Lernfabriken umgesetzt werden. Eine mögliche Lösung stellt die Erweiterung des Lernfabrikkonzepts durch den zusätzlichen *Einsatz virtueller Lernfabriken* dar [Ri21d]. Mithilfe dieser Arbeit ist es möglich,

hybride Lernfabriken zu konfigurieren, indem z. B. ein Fabrikbereich für die Schulung im virtuellen Raum vorgesehen wird (in Vorgehensschritt II). Die in dieser Forschungsarbeit entwickelte Methodik kann also grundsätzlich auf hybride Lernfabriken erweitert werden. Allerdings fehlt in diesem Kontext ein systematischer Ansatz zur Gestaltung von virtuellen Lernfabriken, insbesondere von virtuellen Lernszenarien.

- Im entwickelten Konfigurationssystem sind bereits vielfältige Funktionen zur Anwendung der Methodik implementiert. Allerdings sind *Softwareerweiterungen* möglich. Durch die Import- und Export-Funktion kann eine breite Datenbank an bereits bewerteten Fabrikelementen bzw. Konfigurationsalternativen für Fabrikbereiche entstehen. Durch diese Datenbank könnten Lernfabriken in Zukunft noch einfacher und schneller konfiguriert werden. In zukünftigen Forschungsprojekten des PTW kann die Methodik zur Konfiguration von Lernfabriken als Beratungsansatz genutzt werden, um Lernfabriken zu konfigurieren. Außerdem wäre die Implementierung des Konfigurationssystems in weiteren Programmiersprachen interessant, wodurch bspw. auch virtuelle Rundgänge der konfigurierten Lernfabriken zur besseren Planung möglich sind.
- Die Bewertung der Fabrikelemente erfolgt in dieser Methodik zeitlich vor deren Einsatz, da die Fabrikelemente zunächst ausgewählt werden. Durch eine nachträgliche Evaluation beim tatsächlichen Einsatz kann diese Bewertung für zukünftige Konfigurationen verbessert werden. Hier ist vor allem die Nutzung eines dazu geeigneten Kompetenzmessverfahrens zu nennen.
- Das hergeleitete Optimierungsmodell sowie die entwickelten Algorithmen zu dessen Lösung lassen sich auf weitere Planungsobjekte verallgemeinern, z. B. zur *Planung industrieller Fabriken* im Rahmen der VDI 5200. Dabei verändert sich vor allem durch die unterschiedliche Zielstellung das Vorgehen, insbesondere die gestellten Anforderungen sowie die Bewertungskriterien der Konfigurationsalternativen. Während einige Bewertungskriterien dieser Forschungsarbeit beibehalten werden sollten (z. B. Universalität), sind andere Bewertungskriterien spezifisch für Lernfabriken und daher nicht geeignet (z. B. Interaktionsfähigkeit). Dies kann in zukünftigen Forschungsarbeiten zur Fabrikplanung weiter untersucht werden, um den Fabrikplanungsprozess nach der VDI 5200 – speziell in der Detailplanung (Phase 4) – zu erweitern und zu verbessern.

Der Trend zur anwendungsnahen Forschung, Weiterbildung und Lehre produktionsrelevanter Inhalte in Lernfabriken wird durch die Methodik dieser Forschungsarbeit unterstützt, indem bestmögliche Konfigurationen auf Basis eines Optimierungsmodells ermittelt werden. Das hergeleitete Vorgehen zur Konfiguration sowie das entwickelte Konfigurationssystem unterstützen die praktische Anwendung. Die Forschungsziele können somit als erfüllt angesehen werden.

9 LITERATURVERZEICHNIS

- [Ab15a] Abele, E.; Metternich, J.; Tenberg, R.; Tisch, M.; Abel, M.; Hertle, C.; Eißler, S.; Enke, J.; Faatz, L. (2015): Innovative Lernmodule und -fabriken – Validierung und Weiterentwicklung einer neuartigen Wissensplattform für die Produktionsexzellenz von morgen. Darmstadt: TU-Prints.
- [Ab15b] Abele, E.; Metternich, J.; Tisch, M.; Chryssolouris, G.; Sihn, W.; El-Maraghy, H.; Hummel, V.; Ranz, F. (2015): Learning Factories for Research, Education, and Training. In: *Procedia CIRP* 32, S. 1–6.
- [Ab16] Abele, E.; Bauerdick, C. J.; Strobel, N.; Panten, N. (2016): ETA Learning Factory – A Holistic Concept for Teaching Energy Efficiency in Production. In: *Procedia CIRP* 54, S. 83–88.
- [ABC11] Abele, E.; Brungs, F.; Cachay, J. (2011): KVP auf breiter Basis – Reaktive und proaktive Produktionsoptimierung durch tägliche Verbesserungsrouitinen. In: *VDI-Zeitung Integrierte Produktion* 153 3, S. 68–70.
- [ABN19] Andersen, A.-L.; Brunoe, T. D.; Nielsen, K. (2019): Engineering education in changeable and reconfigurable manufacturing – Using problem-based learning in a learning factory environment. In: *Procedia CIRP* 81, S. 7–12.
- [ABS12] Abele, E.; Bechtloff, S.; Seifermann, S. (2012): Sequenzfertigung für flexible und schlanke Zerspanung. In: *Productivity Management* 17, S. 45–48.
- [AC10] Athawale, V. M.; Chakraborty, S. (2010): A TOPSIS method-based approach to machine tool selection. In: *Proceedings of the 2010 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management* 2.
- [Ae94] Aebli, H. (1994): *Denken – Das Ordnen des Tuns*. Stuttgart: Klett-Cotta.
- [AF18] Aires, R. F. D. F.; Ferreira, L. (2018): The rank reversal problem in multi-criteria decision making – A literature review. In: *Pesquisa Operacional* 38, S. 331–362.
- [AFS17] Abele, E.; Flum, D.; Strobel, N. (2017): A systematic approach for designing learning environments for energy efficiency in industrial production. In: *Procedia Manufacturing* 9, S. 9–16.

- [Ag21] Agrawal, R. (2021): Sustainable material selection for additive manufacturing technologies – A critical analysis of rank reversal approach. In: *Journal of Cleaner Production* 296, S. 126500.
- [Ag90] Aggteleky, B. (1990): *Fabrikplanung Werksentwicklung und Betriebsrationalisierung – 2. Betriebsanalyse und Feasibility-Studie, technisch-wirtschaftliche Optimierung von Anlagen und Bauten.* München u.a.: Carl Hanser.
- [AKA01] Anderson, L. W.; Krathwohl, D. R.; Airasian, P. W. (2001): *A taxonomy for learning, teaching, and assessing – A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives.* New York: Longman.
- [AKR19] Auberger, E.; Karre, H.; Ramsauer, C. (2019): Introduction of a new product in an operating assembly process at Graz University of Technology's LEAD Factory. In: *Procedia Manufacturing* 31, S. 103–108.
- [AI04] Allan, N.; Heisig, P.; Iske, P.; Kelleher, D.; Mekhilef, M.; Oertel, R.; Olesen, A. J.; van Leeuwen, M. (2004): *Europäischer Leitfaden zur erfolgreichen Praxis im Wissensmanagement.* Brüssel: CEN/ISSS.
- [AI09] Albers, S.; Klapper, D.; Konradt, U.; Walter, A.; Wolf, J. (2009): *Methodik der empirischen Forschung.* Wiesbaden: Springer Gabler.
- [ALR20] Arnold, R.; Lipsmeier, A.; Rohs, M. (2020): *Handbuch Berufsbildung.* Wiesbaden: Springer.
- [AMT19] Abele, E.; Metternich, J.; Tisch, M. (2019): *Learning Factories – Concepts, Guidelines, Best-Practice Examples.* Cham: Springer.
- [An11] Angelis, J.; Conti, R.; Cooper, C.; Gill, C. (2011): Building a high-commitment lean culture. In: *Journal of Manufacturing Technology Management* 22 5, S. 569–586.
- [AÖ12] Ayağ, Z.; Özdemir, R. G. (2012): Evaluating machine tool alternatives through modified TOPSIS and alpha-cut based fuzzy ANP. In: *International Journal of Production Economics* 140 2, S. 630–636.
- [AR11] Abele, E.; Reinhart, G. (2011): *Zukunft der Produktion – Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen.* München: Carl Hanser.
- [As15] Asmus, S.; Karl, F.; Mohnen, A.; Reinhart, G. (2015): The impact of goal-setting on worker performance – Empirical evidence from a real-effort production experiment. In: *Procedia CIRP* 26, S. 127–132.

- [Ay07] Ayağ, Z. (2007): A hybrid approach to machine-tool selection through AHP and simulation. In: *International Journal of Production Research* 45 9, S. 2029–2050.
- [AZZ13] Aghdaie, M. H.; Zolfani, S. H.; Zavadskas, E. K. (2013): Decision making in machine tool selection – An integrated approach with SWARA and COPRAS-G methods. In: *Engineering Economics* 24 1, S. 5–17.
- [Ba17] Baena, F.; Guarín, A.; Mora, J.; Sauza, J.; Retat, S. (2017): Learning factory – The path to industry 4.0. In: *Procedia Manufacturing* 9, S. 73–80.
- [BC07] Barney, J. B.; Clark, D. N. (2007): *Resource-based theory – Creating and sustaining competitive advantage*. Oxford: Oxford University Press on Demand.
- [BC09] Blessing, L. T. M.; Chakrabarti, A. (2009): *DRM – A Design Research Methodology*. London: Springer.
- [Be02] Berendt, B.; Fleischmann, A.; Schaper, N.; Szczyrba, B.; Wildt, J. (2002): *Neues Handbuch Hochschullehre – Lehren und Lernen effizient gestalten*. Berlin: DUZ Medienhaus.
- [Be09] Becker, G. S. (2009): *Human Capital – A Theoretical and Empirical Analysis, with Special Reference to Education*. Chicago: University of Chicago Press.
- [Be20] Benček, D.; Ceni-Hulek, L.; Wambach, A.; Weche, J. (2020): Wettbewerb in Zeiten der Pandemie. In: *Wirtschaftsdienst* 100 11, S. 876–884.
- [BE91] Bonwell, C. C.; Eison, J. A. (1991): *Active Learning – Creating Excitement in the Classroom*. In: 1991 ASHE-ERIC Higher Education Reports. Washington, DC: ERIC Clearinghouse on Higher Education, The George Washington University.
- [Be96] Berning, R. (1996): *Beschaffungsmarketing*. Wiesbaden: Gabler.
- [BF99] Boud, D.; Feletti, G. (1999): *The challenge of problem-based learning*. London: Psychology Press.
- [BGK09] Balaji, C. M.; Gurumurthy, A.; Kodali, R. (2009): Selection of a machine tool for FMS using ELECTRE III – A case study. In: 2009 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, S. 171–176.

- [BHV14] Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-Heuser, B. (2014): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik – Anwendung · Technologien · Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- [BK97] Breiing, A.; Knosala, R. (1997): Bewerten technischer Systeme – Theoretische und methodische Grundlagen bewertungstechnischer Entscheidungshilfen. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [Bl14] Bleher, N. (2014): Produktionssysteme erfolgreich einführen. Wiesbaden: Springer Gabler.
- [Br03] Brauers, W. K. (2003): Optimization methods for a stakeholder society – A revolution in economic thinking by multi-objective optimization. Boston: Springer.
- [Br14] Brecher, C.; Behnen, D.; Brumm, M.; Carl, C.; Ecker, C.; Herfs, W.; Klement, R.; Königs, M.; Komma, T.; Lohse, W. (2014): Virtualisierung und Vernetzung in Produktionssystemen – In: Brecher, C. et al. (Hrsg.): Integrative Produktion. Industrie 4.0 – Aachener Perspektiven. Aachen: Shaker.
- [Br17] Brunner, F. J. (2017): Japanische Erfolgskonzepte – KAIZEN, KVP, Lean Production Management, Total Productive Maintenance Shopfloor Management, Toyota Production System, GD3-Lean Development. München: Carl Hanser.
- [Br19a] Briskorn, D. (2019): Operations Research – Eine (möglichst) natürlchsprachige und detaillierte Einführung in Modelle und Verfahren. Berlin: Springer Gabler.
- [Br19b] Brito, S. M. (2019): Active Learning – Beyond the Future. London: IntechOpen.
- [BS21] Burggräf, P.; Schuh, G. (2021): Fabrikplanung – Handbuch Produktion und Management 4. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [BT52] Bradley, R. A.; Terry M. T. (1952): Rank Analysis of Incomplete Block Designs – The Method of Paired Comparisons. In: Biometrika 39 3-4, S. 324–345.
- [Bu09] Bullinger, H.-J.; Spath, D.; Warnecke, H.-J.; Westkämper, E. (2009): Handbuch Unternehmensorganisation – Strategien, Planung, Umsetzung. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [BV85] Brans, J.-P.; Vincke, P. (1985): Note—A Preference Ranking Organisation Method – The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making. In: Management Science 31 6, S. 647–656.

- [BW87] Berkey, J. O.; Wang, P. Y. (1987): Two-dimensional finite bin-packing algorithms. In: *Journal of the operational research society* 38 5, S. 423–429.
- [ÇÇB07] Çimren, E.; Çatay, B.; Budak, E. (2007): Development of a machine tool selection system using AHP. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 35 3-4, S. 363–376.
- [CCF55] Charnes, A.; Cooper, W. W.; Ferguson, R. O. (1955): Optimal estimation of executive compensation by linear programming. In: *Management Science* 1 2, S. 138–151.
- [CCK14] Cinelli, M.; Coles, S. R.; Kirwan, K. (2014): Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. In: *Ecological indicators* 46, S. 138–148.
- [Ch11] Chakraborty, S. (2011): Applications of the MOORA method for decision making in manufacturing environment. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 54 9, S. 1155–1166.
- [Ch76] Chen, P. P.-S. (1976): The entity-relationship model – Toward a unified view of data. In: *ACM Transactions On Database Systems (TODS)* 1 1, S. 9–36.
- [Ci21] Ciano, M. P.; Dallasega, P.; Orzes, G.; Rossi, T. (2021): One-to-one relationships between Industry 4.0 technologies and Lean Production techniques – A multiple case study. In: *International Journal of Production Research* 59 5, S. 1386–1410.
- [CI12] Claussen, P. (2012): *Die Fabrik als soziales System – Wandlungsfähigkeit durch systemische Fabrikplanung und Organisationsentwicklung – ein Beispiel aus der Automobilindustrie*. Wiesbaden: Springer Gabler.
- [CS66] Campbell, D. T.; Stanley, J. C. (1966): *Experimental and quasi-experimental designs for research*. Chicago: Rand McNally.
- [CS81] Cicchetti, D. V.; Sparrow, S. A. (1981): Developing criteria for establishing interrater reliability of specific items – Applications to assessment of adaptive behavior. In: *American journal of mental deficiency* 86 2, S. 127–137.
- [Da08] Dağdeviren, M. (2008): Decision making in equipment selection – An integrated approach with AHP and PROMETHEE. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 19 4, S. 397–406.
- [DBJ16] Dombrowski, U.; Belz, T.; Jäger, F. (2016): Einsatz von Shopfloor Management zur Unterstützung von

- Qualitätsmanagementsystemen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 111 4, S. 169–173.
- [De03] Deutsche Industrienorm (2003): DIN 8580. Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth.
- [De21] Demary, V.; Matthes, J.; Plünnecke, A.; Schaefer, T. (2021): Gleichzeitig: Wie vier Disruptionen die deutsche Wirtschaft verändern – Herausforderungen und Lösungen. In: IW-Studien-Schriften zur Wirtschaftspolitik aus dem Institut der deutschen Wirtschaft. Köln: Institut der deutschen Wirtschaft Köln Medien GmbH.
- [De91] Deci, E. L.; Vallerand, R. J.; Pelletier, L. G.; Ryan, R. M. (1991): Motivation and Education – The Self-Determination Perspective. In: Educational Psychologist 26 3-4, S. 325–346.
- [De93] Dehnbostel, P. (1993): Lernen im Arbeitsprozeß und neue Lernortkombinationen – In: Bundesinstitut für Berufsbildung (Hrsg.): Umsetzung neuer Qualifikationen in die Berufsbildungspraxis. Entwicklungstendenzen und Lösungswege. Nürnberg: Bildung und Wissen, Verl. und Software.
- [DHN96] Dehnbostel, P.; Holz, H.; Novak, H. (1996): Neue Lernorte und Lernortkombinationen – Erfahrungen und Erkenntnisse aus dezentralen Berufsbildungskonzepten. In: Berichte zur beruflichen Bildung Bd. 195. Bielefeld: Bertelsmann.
- [DHS06] Dombrowski, U.; Hennesdorf, S.; Schmidt, S. (2006): Grundlagen Ganzheitlicher Produktionssysteme. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 101 4, S. 172–177.
- [Di08] Dickmann, P. (2008): Schlanker Materialfluss – Mit Lean Production, Kanban und Innovationen. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [DJ13] Duffy, T. M.; Jonassen, D. H. (2013): Constructivism and the technology of instruction – A conversation: Routledge.
- [Do15a] Doch, S.; Merkle, S.; Straube, F.; Roy, D. (2015): Aufbau und Umsetzung einer Lernfabrik – Produktionsnahe Lean-Weiterbildung in der Prozess- und Pharmaindustrie. In: Industrie Management 3, S. 26–30.
- [Do15b] Dombrowski, U. (2015): Lean Development. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [Do15c] Domschke, W.; Drexler, A.; Klein, R.; Scholl, A. (2015): Einführung in Operations Research. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler.

- [DP04] Dehnbostel, P.; Pätzold, G. (2004): Innovationen und Tendenzen der betrieblichen Berufsbildung. In: Zeitschrift für Berufs- und Wirtschaftspädagogik 18, S. 19–30.
- [DRK17] Dombrowski, U.; Richter, T.; Krenkel, P. (2017): Interdependencies of Industrie 4.0 & lean production systems – A use cases analysis. In: Procedia Manufacturing 11, S. 1061–1068.
- [DS17] Dehnbostel, P.; Schröder, T. (2017): Work-based and Work-related Learning – Models and Learning Concepts. In: TVET@Asia 9, S. 1–16.
- [Du] Dudenreaktion): Fabrik. <https://www.duden.de/rechtschreibung/Fabrik> (Zugriff am 19.03.2022).
- [EE09] Eliiyi, U.; Eliiyi, D. T. (2009): Applications of bin packing models through the supply chain. In: International Journal of Business and Management Studies 1 1, S. 11–19.
- [EKM15] Enke, J.; Kraft, K.; Metternich, J. (2015): Competency-oriented Design of Learning Modules. In: Procedia CIRP 32, S. 7–12.
- [EI17] EIMaraghy, H.; Moussa, M.; EIMaraghy, W.; Abbas, M. (2017): Integrated product/system design and planning for new product family in a changeable learning factory. In: Procedia Manufacturing 9, S. 65–72.
- [EI18] Elbestawi, M.; Centea, D.; Singh, I.; Wanyama, T. (2018): SEPT learning factory for industry 4.0 education and applied research. In: Procedia Manufacturing 23, S. 249–254.
- [EM13] Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H. (2013): Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. München, Wien: Carl Hanser.
- [En18] Enke, J.; Glass, R.; Kreß, A.; Hambach, J.; Tisch, M.; Metternich, J. (2018): Industrie 4.0-Competencies for a modern production system – A curriculum for Learning Factories. In: Procedia Manufacturing 23, S. 267–272.
- [En20a] Enke, J.; Oberc, H.; Riemann, T.; Schuhmacher, J.; Hummel, V.; Kühlenkötter, B.; Metternich, J.; Prinz, C. (2020): Cooperation between Learning Factories – Approach and Example. In: Procedia Manufacturing 45, S. 222–227.
- [En20b] Enke, J. (2020): Methodik zur multidimensionalen, reifegradbasierten Entwicklung von Lernfabriken für die Produktion. Dissertation. Düren: Shaker.

- [ER07] Erpenbeck, J.; Rosenstiel, L. v. (2007): Handbuch Kompetenzmessung – Erkennen, Verstehen und Bewerten von Kompetenzen in der betrieblichen, pädagogischen und psychologischen Praxis. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.
- [ES13] Erpenbeck, J.; Sauter, W. (2013): So werden wir lernen. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler.
- [ETM16] Enke, J.; Tisch, M.; Metternich, J. (2016): Learning Factory Requirements Analysis – Requirements of Learning Factory Stakeholders on Learning Factories. In: Procedia CIRP 55, S. 224–229.
- [FF14] Fendrich, L.; Fengler, W. (2014): Handbuch Eisenbahninfrastruktur. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- [Fi18] Fiedler, M. (2018): Lean Construction – Das Managementhandbuch – Agile Methoden und Lean Management im Bauwesen. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler.
- [FK87] Franke, G.; Kleinschmitt, M. (1987): Ansätze zur Intensivierung des Lernens am Arbeitsplatz. In: Berichte zur beruflichen Bildung 90. Berlin.
- [FI71] Fleiss, J. L. (1971): Measuring nominal scale agreement among many raters. In: Psychological bulletin 76 5, S. 378.
- [FLP13] Fleiss, J. L.; Levin, B.; Paik, M. C. (2013): Statistical methods for rates and proportions. New Jersey: John Wiley & Sons.
- [Fo22] Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0/acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (2022): Blinde Flecken in der Umsetzung von Industrie 4.0 – identifizieren und verstehen.
- [Fr98] Fraunhofer ISST (1998): Jahresbericht 1998. https://www.isst.fraunhofer.de/content/dam/isst-neu/documents/Publicationen/Jahresberichte/Fraunhofer-ISST_Jahresbericht_1998.pdf (Zugriff am 27.03.2022).
- [Ga97] Garrison, D. R. (1997): Self-Directed Learning – Toward a Comprehensive Model. In: Adult Education Quarterly 48 1, S. 18–33.
- [GCR96] Greeno, J.; Collins, A.; Resnick, L. (1996): Cognition and learning – In: Berliner, D. C.; Calfee, R. C. (Hrsg.): Handbook of Educational Psychology. New York, London: Macmillan.
- [Ge88] Gerrard, W. (1988): Selection procedures adopted by industry for introducing new machine tools. In: Advances in Manufacturing Technology III, Proceedings Fourth National Conference on Production Research, London.

- [GHH18] Ghassemi-Tari, F.; Hendizadeh, H.; Hogg, G. L. (2018): Exact solution algorithms for multidimensional multiple-choice knapsack problems. In: *Current Journal of Applied Science and Technology* 26 5.
- [GI21] Glass, R. (2021): *Methodik zur multivariaten Messung fachlich-methodischer Kompetenzen für die Produktion*. Dissertation. Düren: Shaker.
- [GM20] Glass, R.; Metternich, J. (2020): Method to measure competencies – A concept for development, design and validation. In: *Procedia Manufacturing* 45, S. 37–42.
- [GPP16] Gräßler, I.; Pöhler, A.; Pottebaum, J. (2016): Creation of a learning factory for cyber physical production systems. In: *Procedia CIRP* 54, S. 107–112.
- [GR11] Ghasemi, T.; Razzazi, M. (2011): Development of core to solve the multidimensional multiple-choice knapsack problem. In: *Computers & Industrial Engineering* 60 2, S. 349–360.
- [Gr15] Grundig, C.-G. (2015): *Fabrikplanung – Planungssystematik – Methoden – Anwendungen*. München: Carl Hanser.
- [GRW08] Gibbert, M.; Ruigrok, W.; Wicki, B. (2008): What passes as a rigorous case study? In: *Strategic Management Journal* 29 13, S. 1465–1474.
- [Ha05] Hacker, W. (2005): *Allgemeine Arbeitspsychologie – Psychische Regulation von Wissens-, Denk- und körperlicher Arbeit*. Bern: Huber.
- [Ha14] Haghighi, A.; Shariatzadeh, N.; Sivard, G.; Lundholm, T.; Eriksson, Y. (2014): Digital learning factories – Conceptualization, review and discussion. In: *The 6th Swedish Production Symposium*. <http://conferences.chalmers.se/index.php/SPS/SPS14/paper/viewFile/1729/401> (Zugriff am 27.03.2022).
- [Ha17] Haoues, M.; Sellami, A.; Ben-Abdallah, H.; Cheikhi, L. (2017): A guideline for software architecture selection based on ISO 25010 quality related characteristics. In: *International Journal of System Assurance Engineering and Management* 8 2, S. 886–909.
- [Ha19] Haberfellner, R.; Nagel, P.; Becker, M.; Büchel, A.; Massow, H. von (2019): *Systems Engineering – Fundamentals and Applications*. Cham: Springer.
- [He03] Hernández Morales, R. (2003): *Systematik und Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung*. Dissertation. Düsseldorf: VDI-Verlag.

- [He07] Heger, C. L. (2007): Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten. Garbsen: TEWISS.
- [HE09] Heyse, V.; Erpenbeck, J. (2009): Kompetenztraining – Informations- und Trainingsprogramme. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.
- [He10] Heinen, T.; Peter, K.; Erlach, K.; Nyhuis, P.; Lanza, G.; Westkämper, E. (2010): Zukunftsthemen der Fabrikplanung. In: Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF 105 5, S. 405–409.
- [He14] Herrmann, C.; Schmidt, C.; Kurle, D.; Blume, S.; Thiede, S. (2014): Sustainability in manufacturing and factories of the future. In: International Journal of precision engineering and manufacturing-green technology 1 4, S. 283–292.
- [He18] Helbing, K. W. (2018): Handbuch Fabrikprojektierung. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [HI10] Huszak, A.; Imre, S. (2010): Eliminating rank reversal phenomenon in GRA-based network selection method. In: IEEE International Conference on Communications (ICC), S. 1–6.
- [HJL08] Hung, W.; Jonassen, D. H.; Liu, R. (2008): Problem-based learning. In: Handbook of research on educational communications and technology 3 1, S. 485–506.
- [HOS79] Heimann, P.; Otto, G.; Schulz, W. (1979): Unterricht – Analyse und Planung. Hannover: Schroedel.
- [HPO16] Hermann, M.; Pentek, T.; Otto, B. (2016): Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. In: 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), S. 3928–3937.
- [HTM15] Hambach, J.; Tenberg, R.; Metternich, J. (2015): Guideline-based video analysis of competencies for a target-oriented continuous improvement process. In: Procedia CIRP 32, S. 25–30.
- [HW12] Hifi, M.; Wu, L. (2012): An equivalent model for exactly solving the multiple-choice multidimensional knapsack problem. In: International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics 3 3, S. 43–58.
- [In16] Institut für angewandte Arbeitswissenschaft e.V. (ifaa) (2016): 5S als Basis des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- [IY10] Imahori, S.; Yagiura, M. (2010): The best-fit heuristic for the rectangular strip packing problem – An efficient implementation and the

- worst-case approximation ratio. In: *Computers & Operations Research* 37 2, S. 325–333.
- [Ja09] Jacobs, A. (2009): The pathologies of big data. In: *Communications of the ACM* 52 8, S. 36–44.
- [JJS91] Johnson, D. W.; Johnson, R. T.; Smith, K. A. (1991): Active Learning – Cooperation in the college classroom. In: *Edina, MN. The annual report of educational psychology in Japan* 47, S. 29–30.
- [JR99] Jonassen, D. H.; Rohrer-Murphy, L. (1999): Activity theory as a framework for designing constructivist learning environments. In: *Educational Technology Research and Development* 47 1, S. 61–79.
- [JS82] Jacquet-Lagrece, E.; Siskos, J. (1982): Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making, the UTA method. In: *European journal of operational research* 10 2, S. 151–164.
- [Ju10] Jung, E. (2010): *Kompetenzerwerb – Grundlagen, Didaktik, Überprüfbarkeit*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- [Ju82] Ju-Long, D. (1982): Control problems of grey systems. In: *Systems & control letters* 1 5, S. 288–294.
- [Ka12] Kallrath, J. (2012): *Gemischt-ganzzahlige Optimierung – Modellierung in der Praxis*. Wiesbaden: Springer.
- [Ka17] Karre, H.; Hammer, M.; Kleindienst, M.; Ramsauer, C. (2017): Transition towards an Industry 4.0 state of the LeanLab at Graz University of Technology. In: *Procedia Manufacturing* 9, S. 206–213.
- [KC13] Karande, P.; Chakraborty, S. (2013): Material handling equipment selection using weighted utility additive theory. In: *Journal of Industrial Engineering* 2013, S. 1–9.
- [Kh98] Khan, M. S. (1998): *Quality adaptation in a multisession multimedia system – Model, algorithms and architecture*. Dissertation. Victoria: Department of ECE.
- [KK13] Kostka, C.; Kostka, S. (2013): *Der Kontinuierliche Verbesserungsprozess – Methoden des KVP*. München: Carl Hanser.
- [KK15] Kumru, M.; Kumru, P. Y. (2015): A fuzzy ANP model for the selection of 3D coordinate-measuring machine. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 26 5, S. 999–1010.
- [KK16] Karim, R.; Karmaker, C. L. (2016): Machine selection by AHP and TOPSIS methods. In: *American Journal of Industrial Engineering* 4 1, S. 7–13.

- [KKM21] Kreß, A.; Kiel, F.; Metternich, J. (2021): A new exact algorithm to solve the Multiple-Choice Multidimensional Knapsack Problem – The Utility Sorted Branch and Bound Algorithm. In: TU Prints.
- [KLW11] Kagermann, H.; Lukas, W.-D.; Wahlster, W. (2011): Industrie 4.0 – Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. In: VDI Nachrichten 13 1, S. 2–3.
- [KM17] Koether, R.; Meier, K.-J. (2017): Lean Production für die variantenreiche Einzelfertigung. Wiesbaden: Springer Gabler.
- [KM20] Kreß, A.; Metternich, J. (2020): System development for the configuration of learning factories. In: Procedia Manufacturing 45, S. 146–151.
- [KM21] Kreß, A.; Metternich, J. (2021): Evaluation of factory elements for the configuration of learning factories. In: SSRN, S. 1–6.
- [KM22a] Kreß, A.; Metternich, J. (2022): Procedure for the configuration of learning factories – Application in industry and comparison. In: SSRN, S. 1–6.
- [KM22b] Kreß, A.; Metternich, J. (2022): Einsatz von digitalen Technologien in Lernfabriken – Use Cases der Prozesslernfabrik „Center für industrielle Produktivität“ (im Druck). In: Factory Innovation.
- [KP16] Kaliszewski, I.; Podkopaev, D. (2016): Simple additive weighting – A metamodel for multiple criteria decision analysis methods. In: Expert Systems with Applications 54, S. 155–161.
- [KPP04] Kellerer, H.; Pferschy, U.; Pisinger, D. (2004): Knapsack Problems. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [Kr14] Kreimeier, D.; Morlock, F.; Prinz, C.; Krückhans, B.; Bakir, D. C.; Meier, H. (2014): Holistic learning factories – A concept to train lean management, resource efficiency as well as management and organization improvement skills. In: Procedia CIRP 17, S. 184–188.
- [Kr18] Kriegesmann, B.; Kley, T.; Knickmeier, A.; Balic, M.; Ottensmeier, B.; Lauterbach, S.; Monstadt, H.; Hannes, R.; Pracht, H. (2018): Kompetenzentwicklung in analogen und digitalisierten Arbeitswelten – Gestaltung sozialer, organisationaler und technologischer Innovationen. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [Kr19] Kreß, A.; Lieb, N.; Lorenz, V.; Metternich, J. (2019): Kompetenzorientierte Gestaltung mobiler Lernfabrikmodule bei der DB Netz AG. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 114 10, S. 631–634.

- [Kr21a] Kreß, A.; Mittenzwei, B.; Knöß, M.; Metternich, J. (2021): Algorithmenbasierte Fabrikplanung – Am Beispiel der SMC Deutschland GmbH. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 116 3, S. 120–123.
- [Kr21b] Kreß, A.; Riemann, T.; Roth, L.; Klipfel, S.; Metternich, J.; Grell, P. (2021): Requirements for the Implementation of Virtual Reality in Learning Factories. In: TU Prints.
- [Kr22] Kreß, A.; Steinmeyer, M.; Longard, L.; Kaiser, J.; Metternich, J. (2022): A product selection method for the configuration of learning factories. In: SSRN, S. 1–3.
- [KS15] Kletti, J.; Schumacher, J. (2015): Die perfekte Produktion – Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- [KSG84] Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H.-R. (1984): Leitfaden der systematischen Fabrikplanung. München: Carl Hanser.
- [Kü18] Küsters, D. (2018): Methodik zum Aufbau und Betrieb einer Lernfabrik für die digitale Transformation der Produktion. Dissertation. Aachen: Shaker.
- [KV12] Korte, B.; Vygen, J. (2012): Kombinatorische Optimierung – Theorie und Algorithmen. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [KWH13] Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J. (2013): Securing the future of German manufacturing industry – Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. In: Final report of the Industrie 4 0.
- [KWM21] Kreß, A.; Wuchterl, S.; Metternich, J. (2021): Design approaches for learning factories – Review and evaluation. In: SSRN, S. 1–6.
- [La08] Lamancusa, J. S.; Zayas, J. L.; Soyster, A. L.; Morell, L.; Jorgensen, J. (2008): The Learning Factory – Industry-Partnered Active Learning. 2006 Bernard M. Gordon Prize Lecture. In: Journal of Engineering Education 97 1, S. 5–11.
- [La15] Lanza, G.; Moser, E.; Stoll, J.; Haefner, B. (2015): Learning Factory on Global Production. In: Procedia CIRP 32, S. 120–125.
- [La16] Lanza, G.; Minges, S.; Stoll, J.; Moser, E.; Haefner, B. (2016): Integrated and modular didactic and methodological concept for a learning factory. In: Procedia CIRP 54, S. 136–140.

- [LFZ20] Leal, L. F.; Fleury, A.; Zancul, E. (2020): Starting up a Learning Factory focused on Industry 4.0. In: *Procedia Manufacturing* 45, S. 436–441.
- [Li12] Liker, J. K. (2012): *Der Toyota-Weg – 14 Managementprinzipien des weltweit erfolgreichsten Automobilkonzerns*. München: Finanz-Buch.
- [Li19] Li, F.; Yang, J.; Wang, J.; Li, S.; Zheng, L. (2019): Integration of digitization trends in learning factories. In: *Procedia Manufacturing* 31, S. 343–348.
- [Li70] Little, J. D. C. (1970): *Models and Managers – The Concept of a Decision Calculus*. In: *Management Science* 16 8, 466–485.
- [LMM02] Lodi, A.; Martello, S.; Monaci, M. (2002): Two-dimensional packing problems – A survey. In: *European journal of operational research* 141 2, S. 241–252.
- [LR15] Laperrière, L.; Reinhart, G. (2015): *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [LR96] Langford, D.; Retik, A. (1996): *The Organization and Management of Construction – Managing Construction Information*. London [u.a.]: Taylor & Francis.
- [LW91] Lave, J.; Wenger, E. (1991): *Situated Learning – Legitimate Peripheral Participation*. Cambridge [u.a.]: Cambridge University Press.
- [Ma18] Mayr, A.; Weigelt, M.; Kühn, A.; Grimm, S.; Erll, A.; Potzel, M.; Franke, J. (2018): Lean 4.0 – A conceptual conjunction of lean management and Industry 4.0. In: *Procedia CIRP* 72, S. 622–628.
- [Mä19] Mäkiö-Marusik, E.; Colombo, A. W.; Mäkiö, J.; Pechmann, A. (2019): Concept and case study for teaching and learning industrial digitalization. In: *Procedia Manufacturing* 31, S. 97–102.
- [Me17] Metternich, J.; Müller, M.; Meudt, T.; Schaede, C. (2017): Lean 4.0 – Zwischen Widerspruch und Vision. In: *Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF* 112 5, S. 346–348.
- [Me18a] Merschbacher, A. (2018): *Brandschutzfibel*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- [Me18b] Menn, J. P.; Sieckmann, F.; Kohl, H.; Seliger, G. (2018): Learning process planning for special machinery assembly. In: *Procedia Manufacturing* 23, S. 75–80.
- [Me18c] Metternich, J.; Schuh, G.; Enke, J.; Molitor, M.; Kreß, A.; Schlosser, T.; Gerschner, K.; Goppold, M. (2018): *Reifegradbasierte*

- Auditierung von Weiterbildungsmaßnahmen in Lernfabriken. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 113 10, S. 641–646.
- [MG11] Mell, P.; Grance, T. (2011): The NIST definition of cloud computing. In: NIST Special Publication 800, S. 1–3.
- [MGC18] Mavrikios, D.; Georgoulas, K.; Chryssolouris, G. (2018): The Teaching Factory Paradigm – Developments and Outlook. In: Procedia Manufacturing 23, S. 1–6.
- [Mi14] Micouin, P. (2014): Model Based Systems Engineering – Fundamentals and Methods. New Jersey: John Wiley & Sons.
- [MN21] Martins, J.; Ning, A. (2021): Engineering Design Optimization. Cambridge [u.a.]: Cambridge University Press.
- [Mo18] Mourtzis, D.; Vlachou, E.; Dimitrakopoulos, G.; Zogopoulos, V. (2018): Cyber-Physical Systems and Education 4.0 – The Teaching Factory 4.0 Concept. In: Procedia Manufacturing 23, S. 129–134.
- [MRD14] Matt, D. T.; Rauch, E.; Dallasega, P. (2014): Mini-Factory – A learning factory concept for students and small and medium sized enterprises. In: Procedia CIRP 17, S. 178–183.
- [Mü18] Müller, R.; Vette-Steinkamp, M.; Hörauf, L.; Speicher, C.; Burkhard, D. (2018): Development of an intelligent material shuttle to digitize and connect production areas with the production process planning department. In: Procedia CIRP 72, S. 967–972.
- [MXZ18] Mao, J.; Xing, H.; Zhang, X. (2018): Design of intelligent warehouse management system. In: Wireless Personal Communications 102 2, S. 1355–1367.
- [MZ20] Mansini, R.; Zanotti, R. (2020): A Core-Based Exact Algorithm for the Multidimensional Multiple Choice Knapsack Problem. In: INFORMS Journal on Computing 32 4, S. 1061–1079.
- [Ng15] Nguyen, H.-T.; Md Dawal, S. Z.; Nukman, Y.; Aoyama, H.; Case, K. (2015): An integrated approach of fuzzy linguistic preference based AHP and fuzzy COPRAS for machine tool evaluation. In: PloS One 10 9, e0133599.
- [Ni20] Niemeyer, C. L.; Gehrke, I.; Müller, K.; Küsters, D.; Gries, T. (2020): Getting Small Medium Enterprises started on Industry 4.0 using retrofitting solutions. In: Procedia Manufacturing 45, S. 208–214.
- [NL16] Nermend, K.; Łatuszyńska, M. (2016): Selected Issues in Experimental Economics – Proceedings of the 2015 Computational

- Methods in Experimental Economics (CMEE) Conference. Cham: Springer.
- [Og17] Ogorodnyk, O.; Granheim, M.; Holtskog, H.; Ogorodnyk, I. (2017): Roller skis assembly line learning factory – Development and learning outcomes. In: *Procedia Manufacturing* 9, S. 121–126.
- [Oh13] Ohno, T. (2013): *Das Toyota-Produktionssystem*. Frankfurt am Main, New York: Campus.
- [Op98] Opricovic, S. (1998): Multicriteria optimization of civil engineering systems. In: *Faculty of Civil Engineering, Belgrade 2* 1, S. 5–21.
- [OT04] Opricovic, S.; Tzeng, G.-H. (2004): Compromise solution by MCDM methods – A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. In: *European journal of operational research* 156 2, S. 445–455.
- [ÖYB17] Özdağoğlu, A.; Yakut, E.; Bahar, S. (2017): Machine selection in a dairy product company with entropy and SAW methods integration. In: *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi* 32 1, S. 341–359.
- [PC12] Poppendieck, M.; Cusumano, M. A. (2012): Lean software development – A tutorial. In: *IEEE software* 29 5, S. 26–32.
- [Pe19] Petrusch, N.; Sieckmann, F.; Menn, J. P.; Kohl, H. (2019): Integration of active pharmaceutical ingredient production into a pharmaceutical lean learning factory. In: *Procedia Manufacturing* 31, S. 245–250.
- [PHK16] Peppler, K.; Halverson, E.; Kafai, Y. B. (2016): *Makeology – Makerspaces as learning environments*. New York, London: Routledge.
- [PI16] Plorin, D. (2016): *Gestaltung und Evaluation eines Referenzmodells zur Realisierung von Lernfabriken im Objektbereich der Fabrikplanung und des Fabrikbetriebes*. Dissertation. Chemnitz: TU Chemnitz Universitätsverlag.
- [Pr17] Prifti, L.; Knigge, M.; Kienegger, H.; Krcmar, H. (2017): A Competency Model for "Industrie 4.0" Employees. In: *Proceedings der 13. Internationalen Tagung*, S. 46–60.
- [PSR11] Paramasivam, V.; Senthil, V.; Ramasamy, N. R. (2011): Decision making in equipment selection – an integrated approach with digraph and matrix approach, AHP and ANP. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 54 9-12, S. 1233–1244.

- [PTL20] Pittich, D.; Tenberg, R.; Lensing, K. (2020): Learning factories for complex competence acquisition. In: *European Journal of Engineering Education* 45 2, S. 196–213.
- [Ra07] Rao, R. V. (2007): *Decision Making in the Manufacturing Environment – Using Graph Theory and Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods*. London: Springer.
- [Re09] Reiner, D. (2009): *Methode der kompetenzorientierten Transformation zum nachhaltig schlanken Produktionssystem – Dissertation*. Aachen: Shaker.
- [Re99] Reigeluth, C. M. (1999): *Instructional-design Theories and Models – A New Paradigm of Instructional Theory*. New Jersey: Lawrence Erlbaum.
- [RG18] Reis, J. Z.; Gonçalves, R. F. (2018): The Role of Internet of Services (IoS) on Industry 4.0 Through the Service Oriented Architecture (SOA). In: (SOA). *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS)*, S. 20–26.
- [Ri13] Riffelmacher, P. (2013): *Konzeption einer Lernfabrik für die variantenreiche Montage*. Dissertation. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- [Ri20a] Riemann, T.; Kreß, A.; Roth, L.; Görke, D.; Glass, R.; Metternich, J.; Grell, P. (2020): Gestaltung von personalisierten Lernfabrikschulungen in Virtual Reality im Kontext schlanker Produktion – In: *Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA), Dortmund (Hrsg.): Frühjahrskongress 2020, Berlin, Digitaler Wandel, digitale Arbeit, digitaler Mensch? Beitrag B.16.5*,
- [Ri20b] Riemann, T.; Kreß, A.; Roth, L.; Klipfel, S.; Metternich, J.; Grell, P. (2020): Agile implementation of virtual reality in learning factories. In: *Procedia Manufacturing* 45, S. 1–6.
- [Ri21a] Riemann, T.; Kreß, A.; Roth, L.; Metternich, J.; Grell, P. (2021): User-oriented Design of Virtual Reality Supported Learning Factory Trainings – Methodology for the Generation of Suitable Design Elements. In: *SSRN*, S. 1–6.
- [Ri21b] Riemann, T.; Kreß, A.; Klassen, L.; Metternich, J. (2021): Hybrid Learning Factories for Lean Education: – Approach and Morphology for Competency-Oriented Design of Suitable Virtual Reality Learning Environments. In: *European Lean Educator Conference*, S. 60–67.
- [Ri21c] Riemann, T.; Kreß, A.; Roth, L.; Staiger, B.; Metternich, J.; Grell, P. (2021): *Virtual Reality in der betrieblichen Bildung – Chancen und*

- Herausforderungen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 10, S. 673–676.
- [Ri21d] Riemann, T.; Kreß, A.; Roth, L.; Metternich, J.; Grell, P. (2021): Approach for Conceptualization and Implementation of Virtual Reality in Learning Factories. In: SSRN, S. 1–6.
- [RK09] Rother, M.; Kata, T. (2009): Managing people for improvement, adaptiveness and superior results. New York: McGraw Hill.
- [RMC15] Rentzos, L.; Mavrikios, D.; Chryssolouris, G. (2015): A two-way knowledge interaction in manufacturing education – The teaching factory. In: Procedia CIRP 32, S. 31–35.
- [Ro20] Rosin, F.; Forget, P.; Lamouri, S.; Pellerin, R. (2020): Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles. In: International Journal of Production Research 58 6, S. 1644–1661.
- [Ro68] Roy, B. (1968): Classement et choix en présence de points de vue multiples. In: Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle 2 8, S. 57–75.
- [RS16] Rüttimann, B. G.; Stöckli, M. T. (2016): Lean and Industry 4.0 – Twins, partners, or contenders? A due clarification regarding the supposed clash of two production systems. In: Journal of Service Science and Management 9 6, S. 485–500.
- [RSM08] Ryschka, J.; Solga, M.; Mattenklott, A. (2008): Praxishandbuch Personalentwicklung – Instrumente, Konzepte, Beispiele. Wiesbaden: Gabler.
- [RSW08] Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S. (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik – Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [Ru98] Ruben, B. D. (1998): Simulations, games, and experience-based learning – The quest for a new paradigm for teaching and learning. In: Simulation & Gaming 30 4, S. 498–505.
- [RVB01] Rheinberg, F.; Vollmeyer, R.; Burns, B. D. (2001): QCM: A questionnaire to assess current motivation in learning situations. In: Diagnostica 47 2, S. 57–66.
- [Sa87] Saaty, R. W. (1987): The Analytic Hierarchy Process – What it is and how it is used. In: Mathematical Modelling 9 3-5, S. 161–176.
- [Sa96] Saaty, T. L. (1996): Decision Making with Dependence and Feedback – The Analytic Network Process. Pittsburgh: RWS Publications.

- [Sb07] Sbihi, A. (2007): A best first search exact algorithm for the multiple-choice multidimensional knapsack problem. In: *Journal of Combinatorial Optimization* 13 4, S. 337–351.
- [SB19] Stojkić, Ž.; Bošnjak, I. (2019): Development of Learning Factory at FSRE, University of Mostar. In: *Procedia Manufacturing* 31, S. 180–186.
- [Sc00] Schaper, N. (2000): Gestaltung und Evaluation arbeitsbezogener Lernumgebungen. Habilitationsschrift. Heidelberg: Universität Heidelberg.
- [Sc01] Scholl, A. (2001): Robuste Planung und Optimierung – Grundlagen – Konzepte und Methoden – Experimentelle Untersuchungen. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [Sc05] Scholz, P. (2005): Softwareentwicklung eingebetteter Systeme – Grundlagen, Modellierung, Qualitätssicherung. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [Sc10] Scholz, D. (2010): Innerbetriebliche Standortplanung – Das Konzept der Slicing Trees bei der Optimierung von Layoutstrukturen. Dissertation. Wiesbaden: Springer Gabler.
- [SC17] Sioshansi, R.; Conejo, A. J. (2017): Optimization in Engineering – Models and Algorithms. Cham: Springer.
- [Sc90] Schunk, D. H. (1990): Goal Setting and Self-Efficacy During Self-Regulated Learning. In: *Educational Psychologist* 25, S. 71–86.
- [SE05] Seufert, S.; Euler, D. (2005): Learning Design – Gestaltung eLearning-gestützter Lernumgebungen in Hochschulen und Unternehmen. In: *SCIL-Arbeitsbericht 5*. St. Gallen: Swiss Centre for Innovations in Learning.
- [SEW16] Sanders, A.; Elangeswaran, C.; Wulfsberg, J. P. (2016): Industry 4.0 implies lean manufacturing – Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. In: *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)* 9 3, S. 811–833.
- [SFF13] Safari, H.; Faghih, A.; Fathi, M. R. (2013): Integration of graph theory and matrix approach with fuzzy AHP for equipment selection. In: *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)* 6 2, S. 477–494.
- [SH92] Shingo, S.; Hesse, R. (1992): Das Erfolgsgeheimnis der Toyota-Produktion – Eine Studie über das Toyota-Produktionssystem genannt die "Schlanke Produktion". Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie.

- [SHB13] Schaper, N.; Hilkenmeier, F.; Bender, E. (2013): Umsetzungshilfen für kompetenzorientiertes Prüfen – HRK-Zusatzgutachten ausgearbeitet für die HRK. <https://www.hrk-nexus.de/fileadmin/redaktion/hrk-nexus/07-Downloads/07-02-Publikationen/Zusatzgutachten-Kompetenzorientiertes-Pruefen.pdf> (Zugriff am 27.03.2022).
- [SHR20] Sadaj, E. A.; Hulla, M.; Ramsauer, C. (2020): Design approach for a learning factory to train services. In: *Procedia Manufacturing* 45, S. 60–65.
- [Si20] Sinsel, A. (2020): *Das Internet der Dinge in der Produktion – Smart Manufacturing für Anwender und Lösungsanbieter*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- [SJC12] Samvedi, A.; Jain, V.; Chan, F. T. S. (2012): An integrated approach for machine tool selection using fuzzy analytical hierarchy process and grey relational analysis. In: *International Journal of Production Research* 50 12, S. 3211–3221.
- [Sm10] Smith, A. (2010): *The Wealth of Nations – An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*. Hampshire: Harriman House.
- [SMA14] Seifermann, S.; Metternich, J.; Abele, E. (2014): Learning Factories – Benefits for Research and exemplary Results. In: CIRP January Meeting.
- [SS06] Singh, S. P.; Sharma, R. R. (2006): A review of different approaches to the facility layout problems. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 30 5, S. 425–433.
- [SS21] Schlömer-Laufen, N.; Schneck, S. (2021): Data for Mittelstand Companies in Germany at the IfM Bonn. In: *Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik* 240 6, S. 849–859.
- [SSJ98] Sonntag, K.; Stegmaier, R.; Jungmann, A. (1998): Implementation arbeitsbezogener Lernumgebungen. Konzepte und Umsetzungserfahrungen. In: *Unterrichtswissenschaft* 26 4, S. 327–347.
- [SSK20] Scholz, J.-A.; Sieckmann, F.; Kohl, H. (2020): Implementation with agile project management approaches – Case Study of an Industrie 4.0 Learning Factory in China. In: *Procedia Manufacturing* 45, S. 234–239.
- [St] Statistisches Bundesamt: Industrie, Verarbeitendes Gewerbe. https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/_inhalt.html (Zugriff am 11.03.2022).

- [SvH10] Siebertz, K.; van Bebbber, D.; Hochkirchen, T. (2010): Statistische Versuchsplanung – Design of Experiments (DoE). Berlin, Heidelberg: Springer.
- [SW03] Shah, R.; Ward, P. T. (2003): Lean Manufacturing – Context, Practice Bundles, and Performance. In: *Journal of operations management* 21 2, S. 129–149.
- [Sy85] Sydow, J. (1985): Der soziotechnische Ansatz der Arbeits- und Organisationsgestaltung – Darstellung, Kritik, Weiterentwicklung. Frankfurt am Main [u.a.]: Campus.
- [SZ79] Sinha, P.; Zoltners, A. A. (1979): The multiple-choice knapsack problem. In: *Operations Research* 27 3, S. 503–515.
- [Te11] Tenberg, R. (2011): Kompetenzorientierung statt Performanzorientierung – Ein neuer Lehrplan des beruflichen Gymnasiums als Prototyp für den nächsten Schritt im Lernfeldkonzept. In: *bwp@ Berufs- und Wirtschaftspädagogik – online* 20, S. 1–17.
- [Te20] Tenberg, R. (2020): Vermittlung fachlicher und überfachlicher Kompetenzen in technischen Berufen – Theorie und Praxis der Technikdidaktik. Stuttgart: Steiner.
- [TH11] Tzeng G.-H.; Huang J.-J. (2011): *Multiple Attribute Decision Making – Methods and Applications*. New York: Chapman and Hall/CRC.
- [Th21] Thakkar, J. J. (2021): *Multi-Criteria Decision Making*. Singapore: Springer.
- [Ti15a] Tisch, M.; Hertle, C.; Metternich, J.; Abele, E. (2015): Goal-oriented improvement of learning factory trainings. In: *The Learning Factory. An annual edition from the network of innovative Learning Factories* 1 1, S. 7–12.
- [Ti15b] Tisch, M.; Hertle, C.; Abele, E.; Metternich, J.; Tenberg, R. (2015): Learning Factory Design – A competency-oriented approach integrating three design levels. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 29 12, S. 1355–1375.
- [Ti15c] Tisch, M.; Ranz, F.; Abele, E.; Metternich, J.; Hummel, V. (2015): Learning Factory Morphology – Study on Form and Structure of an innovative learning approach in the manufacturing domain. In: *The Turkish Online Journal of Educational Technology (TOJET)* 2, S. 356–363.
- [Ti17] Tisch, M.; Laudemann, H.; Kreß, A.; Metternich, J. (2017): Utility-based configuration of learning factories using a multidimensional,

- multiple-choice knapsack problem. In: *Procedia Manufacturing* 9, S. 25–32.
- [Ti18] Tisch, M. (2018): Modellbasierte Methodik zur kompetenzorientierten Gestaltung von Lernfabriken für die schlanke Produktion. Dissertation. Aachen: Shaker.
- [TM17] Tisch, M.; Metternich, J. (2017): Potentials and Limits of Learning Factories for Research, Education, and Training. In: *Procedia Manufacturing* 9, S. 89–96.
- [TMK16] Tvenge, N.; Martinsen, K.; Kolla, S. S. V. K. (2016): Combining Learning Factories and ICT-Based Situated Learning. In: *Procedia CIRP* 54, S. 101–106.
- [TMS20] Tschandl, M.; Mayer, B.; Sorko, S. R. (2020): An interdisciplinary digital learning and research factory – The Smart Production Lab. In: *Procedia Manufacturing* 45, S. 491–496.
- [Tö07] Töpfer, A. (2007): Six Sigma – Konzeption und Erfolgsbeispiele für praktizierte Null-Fehler-Qualität. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [Tu10] Tuzkaya, G.; Gülsün, B.; Kahraman, C.; Özgen, D. (2010): An integrated fuzzy multi-criteria decision making methodology for material handling equipment selection problem and an application. In: *Expert Systems with Applications* 37 4, S. 2853–2863.
- [UH76] Ulrich, P.; Hill, W. (1976): Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. In: *Wirtschaftswissenschaftliches Studium – Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt* 5 7, S. 304–309.
- [UI19] Ullrich, A.; Enke, J.; Teichmann, M.; Kreß, A.; Gronau, N. (2019): Audit - and then what? A roadmap for digitization of learning factories. In: *Procedia Manufacturing* 31, S. 162–168.
- [VBH17] Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; Hompel, M. (2017): *Handbuch Industrie 4.0*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- [Ve02] Verein Deutscher Ingenieure (2002): VDI 2243 – Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte. Berlin: Beuth.
- [Ve11] Verein Deutscher Ingenieure (2011): VDI 5200 – Fabrikplanung. Blatt 1. Planungsvorgehen. Berlin: Beuth.
- [Ve12] Verein Deutscher Ingenieure (2012): VDI 2870 – Ganzheitliche Produktionssysteme [Lean production systems]. Blatt 1. Berlin: Beuth.
- [Ve89] Verein Deutscher Ingenieure (1989): VDI 2385 – Leitfaden für die materialflußgerechte Planung von Industrieanlagen. Berlin: Beuth.

- [Ve93] Verein Deutscher Ingenieure (1993): VDI 2221 – Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. In: Beuth (VDI-Richtlinien).
- [VMG19] Vijayan, K. K.; Mork, O. J.; Giske, L. A. L. (2019): Integration of a case study into learning factory for future research. In: *Procedia Manufacturing* 31, S. 258–263.
- [Vo15] Vogelsang, A. (2015): Model-based requirements engineering for multifunctional systems. Dissertation. München: mediaTUM.
- [Wa14] Wagner, U.; AlGeddawy, T.; ElMaraghy, H.; Müller, E. (2014): Product Family Design for Changeable Learning Factories. In: *Procedia CIRP* 1, S. 195–200.
- [Wa15] Wagner, U.; AlGeddawy, T.; ElMaraghy, H. A.; Müller, E. (2015): Developing products for changeable learning factories. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 9, S. 146–158.
- [WAX16] Wu, Z.; Ahmad, J.; Xu, J. (2016): A group decision making framework based on fuzzy VIKOR approach for machine tool selection with linguistic information. In: *Applied Soft Computing* 42, S. 314–324.
- [We08] Weber, R. (2008): Kanban-Einführung – Das effiziente, kundenorientierte Logistik- und Steuerungskonzept für Produktionsbetriebe. Tübingen: Expert.
- [We15] Wernitz, F. (2015): Wissenschaftsmarketing – Grundlagen und Möglichkeiten am Beispiel der Ressortforschung. Wiesbaden: Springer Gabler.
- [We16] Weeber, M.; Gebbe, C.; Lutter-Günther, M.; Böhner, J.; Glaschröder, J.; Steinhilper, R.; Reinhart, G. (2016): Extending the scope of future learning factories by using synergies through an interconnection of sites and process chains. In: *Procedia CIRP* 54, S. 124–129.
- [We20] Weyand, A.; Seyfried, S.; Gosch, B.; Fuhrländer-Völker, D.; Panten, N.; Abele, E. (2020): Method for transforming energy and production systems into mobile demonstrators. In: *Procedia Manufacturing* 45, S. 134–139.
- [We21] Weyand, A.; Schmitt, S.; Petruschke, L.; Elserafi, G.; Weigold, M. (2021): Approach for Implementing New Topics in Learning Factories – Application of Product-specific Carbon Footprint Analysis. In: *SSRN*, S. 1–6.

- [We97] Westkämper, E. (1997): Null-Fehler-Produktion in Prozessketten – Massnahmen zur Fehlervermeidung und -kompensation. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [WF15] Wortmann, F.; Flüchter, K. (2015): Internet of things. In: *Business & Information Systems Engineering* 57 3, S. 221–224.
- [WHR19] Wolf, M.; Herstätter, P.; Ramsauer, C. (2019): Using the IIM LEAD factory to identify countermeasures for the demographic challenge. In: *Procedia Manufacturing* 31, S. 123–128.
- [WHT17] Wagner, T.; Herrmann, C.; Thiede, S. (2017): Industry 4.0 impacts on lean production systems. In: *Procedia CIRP* 63, S. 125–131.
- [Wi07a] Wiegand, B. (2007): Mit kontinuierlicher Fließfertigung die Durchlaufzeit senken. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 102 3, S. 149–153.
- [Wi07b] Wiendahl, H. P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N.; Brieke, M. (2007): Changeable manufacturing-classification, design and operation. In: *CIRP Annals* 56 2, S. 783–809.
- [Wi98] Wildemann, H. (1998): Die modulare Fabrik – Kundennahe Produktion durch Fertigungssegmentierung. München: TCW, Transfer-Centrum.
- [WJR90] Womack, J. P.; Jones, D. T.; Roos, D. (1990): *The Machine that Changed the World – Based on the MIT 5-million-dollar 5-year Study on the Future of the Automobile*. New York [u.a.]: Free Press.
- [WNR14] Wiendahl, H.-P.; Nyhuis, P.; Reichardt, J. (2014): *Handbuch Fabrikplanung – Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*. München [u.a.]: Carl Hanser.
- [WSG15] Weiß, E.; Strubl, C.; Goschy, W. (2015): *Lean Management – Grundlagen der Führung und Organisation lernender Unternehmen*. Berlin: Erich Schmidt Verlag.
- [WW10] Westkämper, E.; Warnecke, H.-J. (2010): *Einführung in die Fertigungstechnik*. Wiesbaden: Springer.
- [YD11] Yilmaz, B.; Dağdeviren, M. (2011): A Combined Approach for Equipment Selection – F-PROMETHEE Method and Zero-One Goal Programming. In: *Expert Systems with Applications* 38 9, S. 11641–11650.
- [Yu17] Yuan, L.; Guo, Y.; Wei, F.; Lu, K.; Jiang, J.; Nian, L. (2017): Radio frequency identification – Enabled monitoring and evaluating in the

- discrete manufacturing process. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 231 12, S. 2184–2196.
- [Za14] Zangemeister, C. (2014): Nutzwertanalyse in der Systemtechnik – Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. Teilw. zugl.: Berlin, Univ., Diss., 1970. Nordstedt: Books on Demand.
- [Ze19] Zeitner, R.; Marchionini, M.; Neumann, G.; Irmischer, H. (2019): Flächenmanagement in der Immobilienwirtschaft. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- [ZW83] Zions, S.; Wallenius, J. (1983): An interactive multiple objective linear programming method for a class of underlying nonlinear utility functions. In: Management Science 29 5, S. 519–529.

ANHANG

Anhangsverzeichnis

Anhang 1: Unterlagen zur Lernfabrikgestaltung-----	164
Anhang 1.1: Lernfabrik-Morphologie-----	164
Anhang 1.2: Übergeordnete Kompetenzmatrix zur schlanken Produktion -	167
Anhang 1.3: Vertikaler und horizontaler Abbildungsumfang -----	170
Anhang 2: Unterlagen zur Konfiguration von Lernfabriken -----	171
Anhang 2.1: Beispielhafte Anforderungen zur Lernfabrik-Konfiguration ----	171
Anhang 2.2: Betrachtete Interaktionen-----	172
Anhang 2.3: Betrachtete Technologien in Lernfabriken -----	173
Anhang 2.4: Bewertungskriterien -----	174
Anhang 2.5: Paarvergleich der Bewertungskriterien -----	176
Anhang 3: Bewertete Konfigurationsalternativen in den Fallstudien -----	177
Anhang 3.1: Fallstudie 1 -----	177
Anhang 3.2: Fallstudie 2 -----	178
Anhang 3.3: Fallstudie 3 -----	179
Anhang 4: Evaluationsfragebogen zur entwickelten Methodik-----	180
Anhang 5: Betreute Abschlussarbeiten-----	184
Anhang 6: Publikationsübersicht -----	185

ANHANG 1: UNTERLAGEN ZUR LERNFABRIKGESTALTUNG

Anhang 1.1: Lernfabrik-Morphologie

Nachfolgend wird die Lernfabrik-Morphologie nach TISCH ET AL. aufgeführt [Ti15c], [Ti18].

Gestaltungsdimension 1: Ziele

#	Gestaltungselement	Merkmale														
1.1	Primärzweck	Lehre			Weiterbildung				Forschung							
1.2	Sekundärzweck	Testumgebung			Industrielle Produktion		Innovations-transfer		Außenwirkung							
1.3	Zielgruppen für Lehre und Weiterbildung	Schulkinder	Studierende		Beschäftigte						Selbständige	Arbeitslose	Öffentlichkeit			
			Bachelor	Master	Promo-vierende	Auszubildende	Fachkraft	Sachbearbeiter*in	Angelernte	Ungelernte				Management		
			Unteres Mgmt.											Mittleres Mgmt.	Top Mgmt.	
1.4	Gruppenzusammensetzung	Homogen			Heterogen (Wissen, Hierarchie, Unternehmenszugehörigkeit etc.)											
1.5	Anvisierte Industriezweige	Maschinen & Anlagenbau		Automotive		Logistik		Transport		Konsumgüterindustrie	Luftfahrt					
		Chemische Industrie		Elektronikindustrie		Bau		Banken		Textilindustrie	...					
1.6	Lerninhalte	Prod. Mgmt. & Org.	Ressourcen-effizienz	Lean Mgmt.	Auto-matisierung	CPPS	Arbeitssystem-gestaltung	HMI	PE	Intra-logistik	...					
1.7	Rolle LF für Forschung	Forschungsobjekt				Forschungsbefähigung										
1.8	Forschungsfelder	Prod. Mgmt. & Org.	Res. Effizienz	Lean Mgmt.	Automatisierung	CPPS	Arbeitssystem-gest.	HMI	PE	Intra-logistik	...					

Gestaltungsdimension 2: Prozess

#	Gestaltungselement	Merkmale										
2.1	Produktlebenszyklus	Produktplanung		Produktentwicklung		Prototypenerstellung		Fertigung	Montage	Logistik	Service	Recycling
2.2	Fabriklebenszyklus	Investitionsplanung		Fabrik-konzept	Prozess-planung	Produkt-anlauf	Wartung				Recycling/ Abbau	
2.3	Auftragslebenszyklus	Konfiguration und Bestellung		Auftragssequenzierung		Produktions- und Terminplanung					Kommiss., Verpackung	Versand
2.4	Technologielebenszyklus	Planung	Entwicklung		Virtuelle Prüfung		Wartung				Modernisierung	
2.5	Indirekte Funktionen	Primäre Aktivitäten				Unterstützende Aktivitäten						
		Ein-/Ausgangsl-logistik	Marketing & Vertrieb	Kunden-dienst	Beschaf-fung	Technologie-entwicklung	Personal-wirtschaft		Unternehmens-infrastruktur			
2.6	Materialfluss	Kontinuierliche Produktion				Diskrete Fertigung						
2.7	Prozesstyp	Massenproduktion		Serienproduktion		Kleinserienproduktion		Einzelfertigung				
2.8	Fertigungsorganisation	Baustellenfertigung		Werkbankfertigung		Werkstattfertigung		Fließproduktion				
2.9	Automatisierungsgrad	Manuell			Teilautomatisiert / Hybride Automatisierung			Vollautomatisiert				
2.10	Fertigungsverfahren	Trennen	Urformen	Umformen	Fügen	Beschichten	Materialeigenschaften ändern					
2.11	Fertigungstechnologie	Physikalisch			Chemisch			Biologisch				

Gestaltungsdimension 3: Umgebung

#	Gestaltungselement	Merkmale					
3.1	Virtualität der Lernumgebung	Rein physisch (Planung & Ausführung)	Physische Lernfabrik unterstützt durch digitale Fabrik (siehe Zeile „IT-Integration“)		Physischer Wertstrom der Lernfabrik virtuell erweitert		Rein virtuell (Planung & Ausführung)
3.2	Skalierung	Skaliert, miniaturisiert			Lebensgroß		
3.3	Arbeitsystemebenen	Arbeitsplatz	Zelle	Arbeits-system	Fabriksegment	Fabrik	Netzwerk
3.4	Wandlungsbefähiger	Mobilität	Modularität	Kompatibilität		Skalierbarkeit	Universalität
3.5	Wandlungsdimensionen	Produkt		Prozess	Organisation		Gebäude und Layout
3.6	IT- Integration	vor SOP (CAD, CAM, Simulation)			nach SOP (PPS, ERP, MES)		nach der Produktion (CRM, PLM etc.)

Gestaltungsdimension 4: Produkt

#	Gestaltungselement	Merkmale					
4.1	Materialität	Materiell (physisches Produkt)				Immateriell (Dienstleistung)	
4.2	Erzeugungsform	Stückgut			Fließgut		Schüttgut
4.3	Produktherkunft	Eigene Entwicklung			Entwicklung durch TN		Externe Entwicklung
4.4	Marktfähigkeit	Auf dem Markt erhältlich			Auf dem Markt erhältlich aber didaktisch angepasst		Nicht auf dem Markt erhältlich
4.5	Funktionalität	Funktionales Produkt			Reduziertes Produkt mit eingeschränkter Funktion		Ohne Funktion/Anwendung, nur zur Veranschaulichung
4.6	Anzahl unterschiedlicher Produkte	1	2	3-4	> 4	Flexibel, von den TN entwickelt	Annahme realer Bestellungen
4.7	Anzahl der Varianten	1	2-4	4-20	---	Flexibel, je nach TN	Abhängig von Aufträgen
4.8	Anzahl der Komponenten	1	2-5	6-20	21-50	51-100	> 100
4.9	Weiterer Produkt-Einsatz	Wiederverwendung/ Recycling	Ausstellung	Give-away		Verkauf	Entsorgung

Gestaltungsdimension 5: Didaktik

#	Gestaltungselement	Merkmale					
5.1	Kompetenzklassen	Fach- und Methodenkompetenzen		Sozial-kommunikative Kompetenzen	Persönlichen Kompetenzen	Aktivitäts- und Umsetzungs-kompetenzen	
5.2	Lernziel-dimensionen	Kognitiv			Affektiv		Psycho-motorisch
5.3	Lernszenario	Einweisung		Demonstration	Geschlossenes Szenario	Offenes Szenario	
5.4	Art der Lern-umgebung	Greenfield (Entwicklung der Fabrikumgebung)			Brownfield (Verbesserung bestehender Fabrikumgebung)		
5.5	Kommunikations-kanal	Vor-Ort-Lernen (in der Fabrikumgebung)			Remote-Verbindung (in die Fabrikumgebung)		
5.6	Maß an Autonomie	Angewiesen		Selbstgeführt/ selbstgesteuert		Selbstbestimmt/ Selbstorganisiert	
5.7	Rolle der Trainer	Vortragende		Tutor	Coach		Mentor
5.8	Format	Tutorial	Praktische Laborübungen		Seminar	Workshop	Projektarbeit
5.9	Standardisierung	Standardisierte Schulungen			Kundenspezifische Schulungen		
5.10	Theoretische Grundlagen	Voraussetzung	Im Voraus		Abwechselnd mit Nachfrage-basiert		Nach praktischen Teilen
5.11	Bewertungs-niveaus	Feedback der TN	Lernen der TN		Transfer zur realen Fabrik	wirtschaftliche Auswirkungen	Return on Trainings
5.12	Messinstrument	Wissenstest (schriftlich)		Wissenstest (Oral)	Schriftlicher Bericht	Mündliche Präsentation	Praktische Prüfung
							Keine

Gestaltungsdimension 6: Betreibermodell

#	Gestaltungselement	Merkmale					
6.1	Betreibende	Akademische Einrichtung (Universität, Hochschule etc.)		Nicht-akademische Einrichtung (Berufsschule, Schule, Verband, Industriennetzwerk etc.)		Gewinnorientierte Unternehmen (Unternehmensberatung, produzierendes Unternehmen etc.)	
6.2	Trainingsleitung	Forschende	Studierende, Hilfskräfte	Fachkraft	Führungskraft	Beratende Person	Person mit didaktischer Ausrichtung
6.3	Entwicklungs-prozess	Eigenentwicklung		Von außen unterstützte Entwicklung		Externe Entwicklung	
6.4	Initialfinanzierung	Interne Finanzmittel		Öffentliche Mittel		Externe Finanzierung	
6.5	Laufende Finanzierung	Interne Finanzmittel		Öffentliche Mittel		Externe Finanzierung	
6.6	Förderkontinuität	Kurzfristige Mittelbeschaffung (z. B. Einzelveranstaltungen)		Mittelfristige Finanzierung (Projekte, Programme; Laufzeit < 3 Jahre)		langfristige Finanzierung (Projekte, Programme; Laufzeit > 3 Jahre)	
6.7	Geschäftsmodell für Schulungen	Offene Modelle			Geschlossene Modelle (Trainingsprogramm für einzelne Organisation)		
		Club-Modelle					

Anhang 1.2: Übergeordnete Kompetenzmatrix zur schlanken Produktion

In der nachfolgenden Tabelle sind Haupt- und Teilkompetenzen für die schlanke Produktion aus der VDI 2870 hergeleitet [Ve12]. Die Kompetenzen sind nach den Gestaltungsprinzipien und Methoden sortiert. Darüber hinaus finden eigenständige Ergänzungen aus dem Bereich der digitalen Produktion (s. Abschnitt 2.2.3).

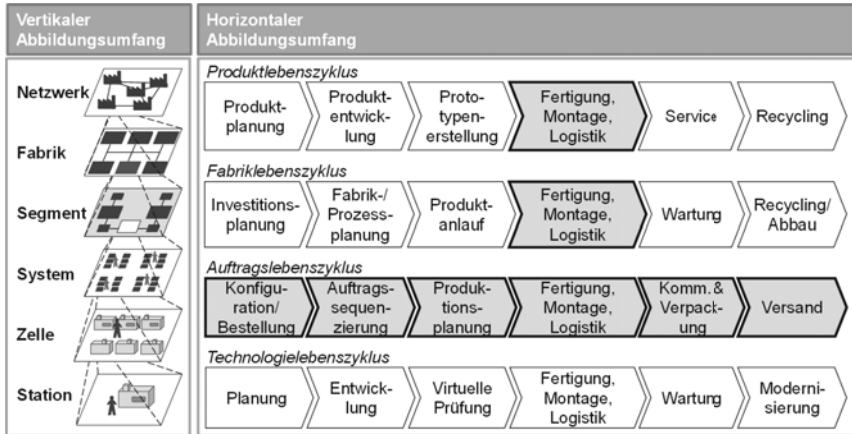
Gestaltungsprinzipien	Methoden	Zielgruppe	Hauptkompetenzen
Standardisierung	5S	Operative Beschäftigte	Die TN bilden durch Standardisierung Übersicht und Ordnung am Arbeitsplatz.
	Prozessstandardisierung	Operative Beschäftigte, Management	Die TN analysieren Prozesse und legen Standards fest.
Null-Fehler-Prinzip	5x Warum	Operative Beschäftigte, Management	Die TN analysieren mögliche Problemursachen durch Rückführung des Problems.
	8D-Methode	Management	Die TN identifizieren Probleme und beseitigen die Ursachen durch eine strukturierte Vorgehensweise mithilfe eines 8D-Formblatts.
	Digitale 8D-Methode	Management	Die TN identifizieren Probleme und beseitigen die Ursachen digital durch eine strukturierte Vorgehensweise.
	A3-Methode	Operatives Management, strategisches Management	Die TN identifizieren Probleme und beseitigen die Ursachen durch eine strukturierte Vorgehensweise mithilfe eines A3-Formblatts.
	Autonomation	Operative Beschäftigte	Die TN setzen Sensoren und Funktionsprinzipien zur Selbstüberwachung ein und ermitteln Problemursachen bei Störungen in Prozessen.
	Ishikawa-Diagramm	Operative Beschäftigte, Management	Die TN erkennen mögliche Probleme durch grafische Zuordnung der jeweiligen Ursachen.
	Kurze Regelkreise	Operative Beschäftigte, Management	Die TN erkennen mögliche Problemursachen und beheben diese eigenständig oder mithilfe von höheren Ebenen.
	Poka Yoke	Operative Beschäftigte, operatives Management, taktisches Management	Die TN analysieren Fehler und entwickeln Gestaltungsansätze zur Fehlervermeidung.
	Six Sigma	Operatives Management und taktisches Management	Die TN analysieren Kundenanforderungen und Prozesse zur Prozessverbesserung.
	Statistische Prozessregelung	Operative Beschäftigte, operatives Management	Die TN überwachen statistisch Prozesse zur Fehlervermeidung durch Nutzen von Werkzeugen wie Qualitätsregelkarten.
	Qualitäts-selbstkontrolle	Operative Beschäftigte	Die TN identifizieren Fehler und Fehlerquellen durch erhöhtes Verantwortungsbewusstsein der Beschäftigten und führen Qualitätskontrollen durch.

Gestaltungsprinzipien	Methoden	Zielgruppe	Hauptkompetenzen
Visuelles Management	Andon	Operative Beschäftigte, Management	Die TN erkennen den Aufwand der Problembeseitigung bei Störungen und benutzen die Andon-Boards zur Visualisierung der aktuellen Lage.
	Digitales Shopfloor Management	Management	Die TN beseitigen Prozessabweichungen mithilfe von digitalisierten Prozessen und Echtzeitdaten durch Nutzen von Kommunikations- und Kollaborationsplattformen.
	Shopfloor Management	Management	Die TN verstehen die Führungsrolle richtig einzusetzen und gestalten kurzzyklische Kommunikations- und Überwachungsmechanismen zur Problembeseitigung.
KVP	Audit	Management	Die TN überwachen und analysieren Prozesse und Methoden hinsichtlich der Richtlinien.
	Benchmarking	Management	Die TN analysieren Prozesse und machen sie messbar, um Hauptverbesserungsmerkmale zu identifizieren.
	Cardboard Engineering	Operative Beschäftigte, operatives Management	Die TN simulieren die Anordnungen von Arbeitssystemen und Prozessen mit leicht verfügbarem Materialien.
	Ideenmanagement	Operative Beschäftigte, Management	Die TN sorgen für Verbesserung und Neuerung durch Ideenlenkung und Berücksichtigung von Ideen aus unterschiedlichen Unternehmensebenen.
	PDCA	Operative Beschäftigte, Management	Die TN wenden den vierphasigen Problemlösungsprozess PDCA an, um Verbesserungen an Prozessen vorzunehmen.
Beschäftigtenorientierung und zielorientierte Führung	Hancho	Operative Beschäftigte, operatives Management	Die TN erhöhen die Produktivität durch eigenständige Problemlösung und kontinuierliche Prozessverbesserung.
	Zielmanagement	Operative Beschäftigte, Management	Die TN bestimmen Unternehmensziele und verteilen diese auf die Unternehmensebenen.
Fließprinzip	FIFO	Operative Beschäftigte	Die TN erkennen Möglichkeiten zur Qualitätsverbesserung und Steuerungsvereinfachung durch Beeinflussen des Materialflusses in Bearbeitungsreihenfolge.
	One Piece Flow	Operative Beschäftigte, operatives Management, taktisches Management	Die TN gestalten Fertigungsprozesse und Materialflüsse ohne Losgrößenbildung durch Reduzieren der Bestände.
	Schnellrüsten	Operative Beschäftigte, operatives Management	Die TN gestalten Rüstvorgänge und minimieren Rüstzeiten bzw. Stillstandszeiten.
	Wertstromplanung	Management	Die TN gestalten einen an den Kundentakt orientierten Materialfluss.
	Wertstromdesign 4.0	Management	Die TN analysieren Informationsflüsse und reduzieren Verschwendung durch Digitalisierung und Vernetzung der Wertschöpfungskette.
	U-Layout	Operative Beschäftigte	Die TN gestalten die Anordnung von Fertigungseinheiten und bestimmen die Taktzeit.

Gestaltungsprinzipien	Methoden	Zielgruppe	Hauptkompetenzen
Pull-Prinzip	JIT/JIS	Operative Beschäftigte	Die TN analysieren Teilespektrum und gestalten Logistikprozesse zur Reduzierung von Beständen und Durchlaufzeiten.
	Kanban	Operative Beschäftigte	Die TN überprüfen die Voraussetzungen durch eine Materialflussanalyse und gestalten eine nachfrageorientierte Produktionssteuerung.
	E-Kanban 4.0	Operative Beschäftigte	Die TN überprüfen die Voraussetzungen durch eine Materialflussanalyse und gestalten eine nachfrageorientierte Produktionssteuerung mithilfe von Echtzeitvisualisierungen.
	Milkrun	Operative Beschäftigte, operatives Management	Die TN reduzieren die Komplexität in Logistikprozessen und standardisieren den Auffüllvorgang.
	Milkrun 4.0	Operative Beschäftigte, operatives Management	Die TN reduzieren die Komplexität in Logistikprozessen durch digitale Datenerfassung und standardisieren den Auffüllvorgang mithilfe von virtuellen Systemen.
	Nivellierung	Operative Beschäftigte, operatives Management	Die TN gestalten ein standardisiertes Produktionsprogramm bei gleichmäßiger Auslastung.
	Supermarkt	Operative Beschäftigte	Die TN analysieren Prozesse und gestalten bedarfsgenau versorgte Pufferflächen zwischen Fertigungs- und Montagebereichen.
Vermeidung von Verschwendung	Chaku-Chaku	Operative Beschäftigte	Die TN gestalten wertstromorientierte Fertigungseinheiten und planen verschwendungsarme Arbeitsplatzanordnung.
	Low Cost Automation	Operative Beschäftigte	Die TN entwerfen eigenständig produktivitätssteigernde Automatisierungskonzepte.
	Total Productive Maintenance (TPM)	Operative Beschäftigte, operatives Management, taktisches Management	Die TN überwachen Prozesse und entwickeln Instandhaltungsprogramme zur Vermeidung von Produktivitätsverlusten.
	Digitale Instandhaltung	Operative Beschäftigte, operatives Management, taktisches Management	Die TN überwachen Prozesse digital und entwickeln Instandhaltungsprogramme zur Vermeidung von Produktivitätsverlusten.
	Verschwendungsbewertung	Operative Beschäftigte, operatives Management, taktisches Management	Die TN gestalten einen verbesserten Wertschöpfungsprozess und eliminieren Verschwendungen aus den Fertigungs- und Montageprozessen.

Anhang 1.3: Vertikaler und horizontaler Abbildungsumfang

Im Folgenden wird der vertikale und horizontale Abbildungsumfang aus dem Gestaltungsansatz von ABELE ET AL./TISCH dargestellt [Ti18], [AMT19].



ANHANG 2: UNTERLAGEN ZUR KONFIGURATION VON LERNFABRIKEN**Anhang 2.1: Beispielhafte Anforderungen zur Lernfabrik-Konfiguration**

#	Anforderung	Art der Anforderung		Betrachtete Konfigurationsebene			
		Muss	Kann	Lernfabrik	Produkt/ Dienstleistung	Fabrikbereich	Konfigurations- alternativen
<i>Allgemein:</i>							
1	Angabe eines Budgetintervalls	■		■			
2	Angabe von Abmessungsintervallen der Lernfabrik	■		■			
3	Abmessungen möglicher Produkte	■				■	
4	Festlegung der obligatorisch betrachteten Prozesse & Fertigungstechnologien	■				■	
5	Festlegung der optional betrachteten Prozesse & Fertigungstechnologien		■			■	
6	Festlegung der obligatorischen Konfigurationsalternativen	■					■
7	Festlegung der optionalen Konfigurationsalternativen		■				■
<i>Beim Primärzweck Weiterbildung & Lehre:</i>							
8	Festlegung der obligatorischen Interaktionen	■					■
9	Festlegung der optionalen Interaktionen		■				■
10	Festlegung der obligatorisch integrierten Fehler und Verschwendungsarten	■			■		■
11	Festlegung der optional integrierten Fehler und Verschwendungsarten		■		■		■
<i>Beim Primärzweck Forschung:</i>							
12	Definition der zu erfassenden Daten	■			■		■
13	Festlegung der betrachteten digitalen Technologien		■				■

Anhang 2.2: Betrachtete Interaktionen

Gestaltungsprinzip	Methoden	Interaktionen
Standardisierung	5S	
	Prozessstandardisierung	
Null-Fehler-Prinzip	5x Warum	
	Digitales 8D-Report	
	A3-Methode	
	Autonomation	
	Ishikawa-Diagramm	
	Kurze Reize/Erkennung/ Eskalationsmanagement	
	Poka Yoke	
	Six Sigma	
	Statistische Prozessregelung	
	Qualitäts selbstkontrolle	
Visuelles Management	Andon	
	Digitales Shopfloormanagement	
Kontinuierlicher Verbesserungsprozess	Audit	
	Benchmarking	
	Dashboard Engineering	
	Ideemanagement	
Beschäftigtenorientierung & zielorientierte Führung	PDCA	
	Hancho	
Fließprinzip	Zielmanagement/Hoshin Kanri	
	FIFO	
	One Piece Flow	
	Schnelllisten	
	Wertstromdesign 4.0	
	U-Layout	
	JIT/JIS	
Pull-Prinzip	E-Kanban 4.0	
	Mikrun 4.0	
	Nivelierung / Heijunka	
	Supermarkt	
Vermeidung von Verschwendung	Chaku-Chaku	
	Low Cost/Automation (Digitale) Instandhaltung (TPM) Verschwendungsbewertung	

Anhang 2.3: Betrachtete Technologien in Lernfabriken

Kategorie	#	Technologie
Assistenzsysteme	1	Pick-to-Light/Voice/Laser
	2	Extended Reality (AR, MR, VR)
	3	Projektor
	4	Screen, Mobilgeräte (Apps)
	5	Kollaborative Roboter
	6	Exoskelett
Digital Fabrication	7	Additive Fertigung/3D-Druck
	8	Laserschneiden und -gravieren
Transport- und Automatisierungssysteme	9	Transportsysteme
	10	(Autonome) Roboter und Roboterzellen
	11	Fahrerlose Transportfahrzeuge (AGVs)
	12	Drohne
	13	Programmable Logic Controller (PLC)
Vernetzungstechnologien	14	Wi-Fi
	15	Light Fidelity (Li-Fi)
	16	LTE
	17	5G
	18	Cloud
	19	Blockchain
	20	Ethernet
Datenmanagement und -visualisierung	21	Enterprise Resource Planning (ERP)
	22	Product Lifecycle Management (PLM)
	23	Energy Management System (EMS)
	24	Manufacturing Execution System (MES)
	25	Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)
	26	Visualisierung/(Digitales) Dashboard
Datenverarbeitung	27	Künstliche Intelligenz (KI)/Neuronale Netze
	28	Machine/Deep Learning, Machine Vision
	29	Data Analytics, Data/Process Mining
	30	Predictive Maintenance/Analytics
Simulation	31	Digitale Fabriken, Simulationen (CAD, DMU, FEM)
	32	Digitaler Zwilling
Datenaufnahme	33	Sensoren
	34	Retrofitting
	35	Kameras, 3D-Scanner
Tracking und Auto-ID	36	Real-Time Location System (RTLS) (GPS, Bluetooth, UWB)
	37	RFID
	38	NFC
	39	Barcode
	40	QR-Code, Data Matrix Code
Cybersecurity	41	Cybersecurity

Anhang 2.4: Bewertungskriterien

Bewertungskriterien	Variable	Keine	Schwach	Mittel	Stark
Interaktionsfähigkeit	<i>Anzahl der Möglichkeiten zur Interaktion in der Schulung</i>	Die Konfigurationsalternative besitzt keine Möglichkeit zur Interaktion, sie können lediglich betrachtet werden.	Die Konfigurationsalternative besitzt eine Möglichkeit zur Interaktion.	Die Konfigurationsalternative besitzt mehr als eine Möglichkeit zur Interaktion.	Die Konfigurationsalternative besitzt mehr als drei interaktive Elemente, die in der Schulung genutzt werden können.
Implementierung von Gestaltungsprinzipien	<i>Anzahl implementierter Gestaltungsprinzipien</i>	In der Konfigurationsalternative sind keine Gestaltungsprinzipien implementiert.	In der Konfigurationsalternative sind eine bis vier Gestaltungsprinzipien implementiert.	In der Konfigurationsalternative sind fünf bis sieben Gestaltungsprinzipien implementiert.	In der Konfigurationsalternative sind acht Gestaltungsprinzipien implementiert.
Integrierbarkeit von Fehlern und Verschwendung	<i>Anzahl der integrierbaren Fehler und Verschwendungen</i>	Es können keine Fehler und Verschwendungen integriert werden.	Es kann ein Fehler bzw. eine Verschwendung integriert werden.	Es können eine bis drei Fehler bzw. Verschwendungen integriert werden.	Fehler und Verschwendungen können auf vielfältige Weise integriert werden (mehr als drei).
Realitätsnähe	<i>Häufigkeit des Einsatzes in der betrieblichen Praxis</i>	Die Konfigurationsalternative kommt in der Praxis nicht vor.	Die Konfigurationsalternative kommt in der Praxis sehr selten vor.	Die Konfigurationsalternative kommt in der Praxis häufig vor.	Die Konfigurationsalternative gehört zu den meisteingesetzten ihrer Art.
Einsatz neuer Technologien	<i>Anzahl eingesetzter Technologien</i>	Die Konfigurationsalternative besitzt keine neue Technologie.	Die Konfigurationsalternative besitzt eine neue Technologie.	Die Konfigurationsalternative besitzt zwischen eine und drei neuen Technologien.	Die Konfigurationsalternative besitzt mehr als drei neue Technologien.
Aktualität	<i>Jahr der Markteinführung</i>	Die Konfigurationsalternative ist veraltet und wird nicht mehr eingesetzt.	Die Konfigurationsalternative ist länger als fünf Jahre auf dem Markt, wird aber eingesetzt.	Die Konfigurationsalternative ist zwischen fünf und einem Jahr auf dem Markt.	Die Konfigurationsalternative ist kürzer als ein Jahr auf dem Markt.
Universalität	<i>Anpassungsfähigkeit hinsichtlich verschiedener Anforderungen</i>	Die Konfigurationsalternative ist in keiner Weise hinsichtlich verschiedener Anforderungen zum Produkt und zur Technologie dimensioniert und gestaltet.	Die Konfigurationsalternative ist hinsichtlich verschiedener Anforderungen zum Produkt oder zur Technologie stark eingeschränkt dimensioniert und gestaltet.	Die Konfigurationsalternative ist hinsichtlich verschiedener Anforderungen zum Produkt oder zur Technologie leicht eingeschränkt dimensioniert und gestaltet.	Die Konfigurationsalternative ist hinsichtlich verschiedener Anforderungen zum Produkt und zur Technologie dimensioniert und gestaltet.

Bewertungs-kriterien	Variable	Keine	Schwach	Mittel	Stark
Modularität	<i>Anzahl standardisierter und funktionsfähiger Elemente</i>	Die Konfigurationsalternative besitzt keine standardisierten und funktionsfähigen Einheiten, z. B. Plug & Produce-Module.	Die Konfigurationsalternative besitzt eine standardisierte und funktionsfähige Einheit, z. B. Plug & Produce-Module.	Die Konfigurationsalternative besitzt eine bis drei standardisierte und funktionsfähige Einheiten, z. B. Plug & Produce-Module.	Die Konfigurationsalternative besitzt mehr als drei standardisierte und funktionsfähige Einheiten, z. B. Plug & Produce-Module.
Mobilität	<i>Grad der Mobilität</i>	Die Konfigurationsalternative ist nicht beweglich, da z. B. fest mit dem Boden verbunden.	Die Konfigurationsalternative ist nur durch einen Kran beweglich.	Die Konfigurationsalternative lässt sich während einer Schaltung nur mit Mühe bewegen.	Die Konfigurationsalternative lässt sich während einer Schaltung uneingeschränkt bewegen, z. B. durch Rollen.
Kompatibilität	<i>Anzahl der Kategorien zur Vernetzungsfähigkeit</i>	Die Konfigurationsalternative kann sich bezüglich Material, Information, Medien und Energie nicht vernetzen.	Die Konfigurationsalternative kann sich in einer Kategorie (Material, Information, Medien, Energie) eingeschränkt vernetzen.	Die Konfigurationsalternative kann sich in mindestens zwei Kategorien (Material, Information, Medien, Energie) eingeschränkt vernetzen.	Die Konfigurationsalternative ist bezüglich Material, Information, Medien und Energie uneingeschränkt vernetzungsfähig, z. B. durch einheitliche Software-schnittstellen.
Skalierbarkeit	<i>Anzahl der Kategorien zur Erweiter- und Reproduzierbarkeit</i>	Die Konfigurationsalternative ist technisch, räumlich und personell in keiner Weise erweiter- und reproduzierbar.	Die Konfigurationsalternative ist in einer Kategorie (technisch, räumlich, personell) eingeschränkt erweiter- und reproduzierbar.	Die Konfigurationsalternative ist in mehr als einer Kategorie (technisch, räumlich, personell) eingeschränkt erweiter- und reproduzierbar.	Die Konfigurationsalternative ist technisch, räumlich und personell uneingeschränkt erweiter- und reproduzierbar.
Nachhaltigkeit	<i>Anzahl der Kategorien mit niedrigem Ressourcenverbrauch</i>	Die Konfigurationsalternative benötigt sehr viele Ressourcen in allen Kategorien (Strom, Druckluft, Wasser, Material).	Die Konfigurationsalternative benötigt in mindestens zwei Kategorien (Strom, Druckluft, Wasser, Material) sehr viele Ressourcen.	Die Konfigurationsalternative benötigt in mindestens zwei Kategorien (Strom, Druckluft, Wasser, Material) sehr wenige Ressourcen.	Die Konfigurationsalternative benötigt sehr wenige Ressourcen in allen Kategorien (Strom, Druckluft, Wasser, Material).
Vorbereitungsaufwand	<i>Geschätzter Zeitbedarf zur Vorbereitung und Instandhaltung</i>	Die Konfigurationsalternative benötigt einen sehr hohen zeitlichen Aufwand zur Vorbereitung und Instandhaltung.	Die Konfigurationsalternative benötigt einen hohen zeitlichen Aufwand zur Vorbereitung und Instandhaltung.	Die Konfigurationsalternative benötigt einen mittleren zeitlichen Aufwand zur Vorbereitung und Instandhaltung.	Die Konfigurationsalternative benötigt einen geringen zeitlichen Aufwand zur Vorbereitung und Instandhaltung.

Anhang 2.5: Paarvergleich der Bewertungskriterien

Weiterbildung/Lehre

	Interaktionsfähigkeit	Implementierung von Gestaltungsprinzipien	Integrierbarkeit von Fehlern und Verschwendung	Realitätsnähe	Einsatz neuer Technologien	Aktualität	Universalität	Modularität	Mobilität	Kompatibilität	Skalierbarkeit	Nachhaltigkeit	Vorbereitungsaufwand	Summe	Rangfolge
Interaktionsfähigkeit	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	24	1
Implementierung von Gestaltungsprinzipien	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	22	2
Integrierbarkeit von Fehlern und Verschwendung	0	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	21	3
Realitätsnähe	0	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	21	3
Einsatz neuer Technologien	0	0	0	0	1	2	0	2	0	2	2	2	1	12	6
Aktualität	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	2	0	6	10
Universalität	0	0	0	0	2	2	1	2	2	1	2	2	2	16	5
Modularität	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	6	10
Mobilität	0	0	0	0	2	2	0	2	1	1	2	1	1	12	6
Kompatibilität	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	1	9	9
Skalierbarkeit	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	5	12
Nachhaltigkeit	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	4	13
Vorbereitungsaufwand	0	0	0	0	1	2	0	1	1	1	2	2	1	11	8

Forschung

	Interaktionsfähigkeit	Implementierung von Gestaltungsprinzipien	Integrierbarkeit von Fehlern und Verschwendung	Realitätsnähe	Einsatz neuer Technologien	Aktualität	Universalität	Modularität	Mobilität	Kompatibilität	Skalierbarkeit	Nachhaltigkeit	Vorbereitungsaufwand	Summe	Rangfolge
Interaktionsfähigkeit	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	11
Implementierung von Gestaltungsprinzipien	2	1	2	2	0	0	1	1	1	1	1	1	2	15	7
Integrierbarkeit von Fehlern und Verschwendung	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	13
Realitätsnähe	2	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	7	10
Einsatz neuer Technologien	2	2	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	2	22	1
Aktualität	2	2	2	2	0	1	1	1	1	1	1	2	2	18	3
Universalität	2	1	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	22	1
Modularität	2	1	2	2	1	1	0	1	2	1	2	1	2	18	3
Mobilität	2	1	2	2	0	1	0	0	1	1	2	2	2	16	6
Kompatibilität	2	1	2	2	1	1	0	1	1	1	2	2	2	18	3
Skalierbarkeit	2	1	2	2	0	1	0	0	0	0	1	0	2	11	9
Nachhaltigkeit	2	1	2	1	0	0	0	1	0	0	2	1	2	12	8
Vorbereitungsaufwand	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	11

Anhang 3.2: Fallstudie 2

Fabrikbereiche	Konfigurationsalternativen	Bewertungskriterien											
		Interaktionsfähigkeit	Implementierung von Gestaltungsprinzipien	Integrierbarkeit von Fehlern und Verschwendung	Realitätsnähe	Einsatz neuer Technologien	Aktualität	Universalität	Modularität	Mobilität	Kompatibilität	Skalierbarkeit	Nachhaltigkeit
Sägen	Konfigurationsalternative 1.1	S	S	M	S	W	M	S	M	W	W	W	W
	Konfigurationsalternative 1.2	M	W	M	S	W	M	S	W	W	W	W	W
	Konfigurationsalternative 1.3	M	M	M	S	W	M	S	W	W	W	W	W
	Konfigurationsalternative 1.4	W	W	W	S	M	M	M	W	W	W	W	N
	Konfigurationsalternative 1.5	M	M	W	S	W	M	S	W	W	W	M	W
Fräsen	Konfigurationsalternative 2.1	M	M	W	M	S	S	M	S	W	S	M	W
	Konfigurationsalternative 2.2	M	M	W	M	S	S	M	S	W	S	M	W
	Konfigurationsalternative 2.3	M	M	W	M	S	S	S	S	W	S	M	W
	Konfigurationsalternative 2.4	M	M	W	M	S	S	S	S	W	S	M	W
Laserschneiden	Konfigurationsalternative 3.1	W	W	W	M	M	M	M	M	W	M	W	W
	Konfigurationsalternative 3.2	M	M	W	M	M	M	M	W	W	M	W	W
	Konfigurationsalternative 3.3	M	M	W	M	M	M	M	M	W	M	S	M
	Konfigurationsalternative 3.4	M	M	M	M	M	M	S	M	W	M	M	M
	Konfigurationsalternative 3.5	M	M	W	M	M	M	M	M	W	M	S	M
Reinigen & Prüfen	Konfigurationsalternative 4.1	M	S	S	S	W	M	M	W	M	W	W	S
	Konfigurationsalternative 4.2	M	S	S	S	W	M	M	W	M	W	W	M
	Konfigurationsalternative 4.3	M	M	W	M	M	S	W	W	M	M	W	M
	Konfigurationsalternative 4.4	M	M	W	M	M	S	W	W	M	M	W	M
	Konfigurationsalternative 4.5	S	M	M	S	W	M	M	W	M	W	W	M
Pulverbeschichten	Konfigurationsalternative 5.1	M	M	M	S	M	S	S	M	W	M	M	M
	Konfigurationsalternative 5.2	W	W	W	M	S	S	W	W	W	M	W	W
	Konfigurationsalternative 5.3	S	S	M	W	W	W	S	W	M	W	M	M
	Konfigurationsalternative 5.4	M	M	M	W	S	S	M	M	M	S	M	W
Ofen	Konfigurationsalternative 6.1	M	S	W	M	W	W	M	W	S	W	W	M
	Konfigurationsalternative 6.2	W	M	W	S	S	M	S	W	M	S	W	M
	Konfigurationsalternative 6.3	W	M	W	M	W	W	W	W	M	W	W	M
	Konfigurationsalternative 6.4	M	M	W	S	W	M	M	W	M	W	M	W
	Konfigurationsalternative 6.5	M	M	W	S	W	M	M	W	M	W	M	M
Additive Fertigung	Konfigurationsalternative 7.1	W	M	S	W	M	S	S	W	W	S	W	M
	Konfigurationsalternative 7.2	W	M	S	W	M	S	M	W	W	M	W	M
	Konfigurationsalternative 7.3	W	M	S	M	M	S	M	W	W	M	W	M
	Konfigurationsalternative 7.4	W	M	S	W	M	S	S	W	W	M	W	M
	Konfigurationsalternative 7.5	W	M	S	M	M	S	M	W	W	M	W	M
Montage & Funktionsprüfung	Konfigurationsalternative 8.1	S	S	S	M	S	S	S	S	S	S	M	S
	Konfigurationsalternative 8.2	M	M	S	S	W	M	M	S	S	W	M	S
	Konfigurationsalternative 8.3	M	M	S	S	W	M	M	S	S	W	M	S
Logistik	Konfigurationsalternative 9.1	W	S	W	M	W	S	M	M	W	M	M	W
	Konfigurationsalternative 9.2	M	S	M	S	M	M	M	S	M	M	M	M
Shopfloor Management	Konfigurationsalternative 10.1	S	S	W	W	S	S	S	S	S	S	S	M
	Konfigurationsalternative 10.2	M	S	W	M	M	S	W	M	S	M	S	M

Anhang 3.3: Fallstudie 3

Fabrikbereiche	Konfigurationsalternativen	Bewertungskriterien													
		Interaktionsfähigkeit	Implementierung von Gestaltungsprinzipien	Integration von Fehlern und Verschwendung	Realitätsnähe	Einsatz neuer Technologien	Aktualität	Universalität	Modularität	Mobilität	Kompatibilität	Skalierbarkeit	Nachhaltigkeit	Vorbereitungsaufwand	
Sägen	Konfigurationsalternative 1.1	S	M	W	M	M	S	S	W	W	S	W	M	M	
	Konfigurationsalternative 1.2	S	M	W	M	W	S	S	W	W	M	W	M	M	
	Konfigurationsalternative 1.3	S	S	M	W	N	N	M	W	W	N	W	M	M	
Fräsen	Konfigurationsalternative 2.1	M	M	M	M	S	M	M	W	W	S	W	S	M	
	Konfigurationsalternative 2.2	M	M	M	M	S	M	M	W	W	S	W	S	M	
	Konfigurationsalternative 2.3	M	M	M	M	S	M	M	W	W	S	W	M	M	
	Konfigurationsalternative 2.4	M	M	M	M	W	W	M	W	W	M	W	M	M	
Drehen	Konfigurationsalternative 3.1	M	M	M	M	S	M	M	W	W	S	M	S	M	
	Konfigurationsalternative 3.2	M	M	M	S	M	M	W	W	S	M	S	M	M	
	Konfigurationsalternative 3.3	M	S	M	S	S	W	S	W	W	S	M	S	W	
	Konfigurationsalternative 3.4	M	S	M	M	W	W	W	W	W	M	N	M	W	
Reinigen	Konfigurationsalternative 4.1	W	W	N	M	M	M	S	W	S	M	S	S	W	
	Konfigurationsalternative 4.2	M	W	W	M	M	M	M	M	S	M	S	S	W	
	Konfigurationsalternative 4.3	M	W	W	M	W	M	M	M	S	M	S	S	W	
	Konfigurationsalternative 4.4	M	S	N	M	N	W	S	M	S	M	M	S	S	
Qualitätssicherung	Konfigurationsalternative 5.1	M	W	M	S	W	W	S	W	W	S	S	S	W	
	Konfigurationsalternative 5.2	S	S	S	M	S	M	M	S	M	S	M	S	M	
	Konfigurationsalternative 5.3	S	M	S	W	W	M	W	S	M	S	M	S	S	
	Konfigurationsalternative 5.4	S	M	S	N	N	W	S	M	M	W	S	S	S	
Montage	Konfigurationsalternative 6.1	S	S	S	M	N	W	S	S	M	S	S	S	S	
	Konfigurationsalternative 6.2	W	S	W	M	N	W	S	S	M	S	S	S	S	
	Konfigurationsalternative 6.3	W	S	W	M	N	W	S	S	S	S	S	S	S	
	Konfigurationsalternative 6.4	M	S	M	M	N	W	S	S	S	S	S	S	S	
Funktionsprüfung	Konfigurationsalternative 7.1	S	S	M	W	N	W	W	M	M	S	S	S	S	
	Konfigurationsalternative 7.2	S	S	M	W	N	W	W	M	M	S	S	S	S	
	Konfigurationsalternative 7.3	S	S	M	W	N	W	W	M	S	S	S	S	S	
	Konfigurationsalternative 7.4	S	S	M	W	N	W	W	M	S	S	S	S	S	
Verpackung	Konfigurationsalternative 8.1	M	S	M	M	N	W	S	S	M	S	S	S	S	
	Konfigurationsalternative 8.2	W	S	W	M	N	W	S	M	M	S	S	S	S	
	Konfigurationsalternative 8.3	W	S	W	M	N	M	S	M	S	S	S	S	S	
	Konfigurationsalternative 8.4	M	S	M	M	N	W	S	M	S	S	S	S	S	
Logistik	Konfigurationsalternative 9.1	S	S	M	S	M	W	S	M	S	S	M	S	S	
	Konfigurationsalternative 9.2	S	S	M	S	M	W	S	M	S	S	M	S	S	
	Konfigurationsalternative 9.3	S	S	M	S	M	W	S	M	S	S	M	S	S	
	Konfigurationsalternative 9.4	S	S	M	S	M	W	S	M	S	S	M	S	S	
Shopfloor Management	Konfigurationsalternative 10.1	M	S	W	M	S	S	M	S	S	S	S	S	M	
	Konfigurationsalternative 10.2	M	S	W	M	S	S	M	S	S	S	S	S	S	
	Konfigurationsalternative 10.3	M	S	W	M	S	M	S	M	S	S	S	S	S	
	Konfigurationsalternative 10.4	M	M	N	M	S	W	S	W	S	M	M	S	S	

ANHANG 4: EVALUATIONSFRAGEBOGEN ZUR ENTWICKELTEN METHODIK

I. Allgemeine Angaben

Name: _____

Position: _____

Branche: _____

Unternehmen/Institution: _____

Bitte schätzen Sie Ihre fachliche Kompetenz zur Gestaltung von Lernfabriken ein (1 – gering; 5 – hoch):

	Selbsteinschätzung				
	1	2	3	4	5
Fachliche Kompetenz zur Gestaltung von Lernfabriken					

II. Inhaltliche Anforderungen

Bitte bewerten Sie die intuitive Auswahl von Fabrikelementen im Vergleich zur Methodik auf Basis des Optimierungsmodells anhand der folgenden Anforderungen (1 – nicht erfüllt; 5 – absolut erfüllt):

Anforderung	Intuitive Auswahl					Methodik auf Basis des Optimierungsmodells				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Optimalität Die bestmögliche Auswahl kann ermittelt werden.										
Zielorientierung Das Verfahren orientiert sich an den Primärzielen (Forschung, Weiterbildung, Lehre).										
Individualität Das Verfahren berücksichtigt die Individualität von Lernfabrikkonzepten.										

<p>Konstruktvalidität</p> <p>Das Ergebnis des Verfahrens enthält keinen systematischen Fehler.</p>																				
<p>Externe Validität</p> <p>Das Verfahren ist auf weitere Anwendungsfälle übertragbar.</p>																				
<p>Anpassungsfähigkeit</p> <p>Das Verfahren lässt sich adaptiv durch neue Informationen anpassen.</p>																				
<p>Robustheit</p> <p>Das Ergebnis verhält sich gegenüber Änderungen der Eingangsgrößen stabil.</p>																				
<p>Interaktionsfähigkeit</p> <p>Neue Eingangsgrößen lassen sich auf einfache Weise verändern, um neue Ergebnisse zu erhalten.</p>																				
<p>Simplizität</p> <p>Das Verfahren fokussiert sich auf wesentliche Elemente.</p>																				
<p>Kontrollierbarkeit</p> <p>Die Ergebnisse des Verfahrens sind in Bezug zu den Eingangsgrößen nachvollziehbar.</p>																				

Kommentar:

IV. Allgemeines und freies Feedback

1. Wo sehen Sie den Mehrwert der Methodik zur Konfiguration von Lernfabriken im Vergleich zur intuitiven Auswahl?

2. Was würden Sie an der Methodik zur Konfiguration von Lernfabriken verbessern?

Bei Rückfragen dürfen Sie mich gerne kontaktieren:

(Name, E-Mail-Adresse)

Zur Befragung internationaler Expertinnen und Experten auf dem Gebiet der Lernfabrikforschung wurde der Fragebogen zusätzlich auf Englisch übersetzt.

ANHANG 5: BETREUTE ABSCHLUSSARBEITEN

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden vom Autor die nachfolgenden studentischen Arbeiten betreut, welche weiterführende Informationen enthalten.

Studierende	Typ	Titel	Jahr
Antje Schroeter	BT	Methode zur systematischen Produktauswahl in Lernfabriken	2018
Albert Fischer	SA	Systematische Literaturanalyse zur Konfiguration von Lernfabriken	2019
Etienne Haubrich	BT	Ermittlung von Kriterien zur Bewertung von Fabrikelementen in Lernfabriken	2019
Natali Diker	MT	Competency and Requirement Analysis for the Configuration of Lean 4.0- Learning Factories	2019
Attila Nazli	MT	Methode zur systematischen Vorauswahl potenzieller Fabrikelemente in Lernfabriken für die schlanke und digitale Produktion	2019
Alexander Rouse	MT	Kompetenzbasierte Gestaltung von Wertströmen in Lernfabriken für die schlanke Produktion	2020
Björn Mittenzwei	MT	Entwicklung und Anwendung einer Methodik zur innerbetrieblichen Standortplanung mithilfe quantitativer Optimierungsverfahren	2020
Felina Armbruster Jonas Barth Florentin Fischer Matthias Harnischmacher	ARP	Recherche und Bewertung von Fabrikelementen für die Innovationsfabrik 4.0	2020
Florian Kiel	SA	Analyse eines Algorithmus zur Konfiguration von Lernfabriken	2020
Benedikt Brings	MT	Analyse und Bewertung zum Einsatz von Technologien für die Konfiguration von Lernfabriken	2021
Nuri Said Tüzün	MT	Ermittlung und Bewertung von Interaktivität in schlanken Lernfabriken	2021
Gerhard Göhner	MT	Bewertung von Ansätzen zur Auswahl von Fabrikelementen	2021
Sandra Masson	BT	Die Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikelementen	2021
Danial Quyyum	BT	Nutzenorientierte Auswahl von Produkten in Lernfabriken	2022
BT: Bachelorthesis MT: Masterthesis SA: Studienarbeit ARP: Advanced Research Project			

ANHANG 6: PUBLIKATIONSÜBERSICHT

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden vom Autor die nachfolgenden Publikationen erstellt und international im Peer-Review-Verfahren veröffentlicht.

Quelle	Titel	Jahr
[KM22a]	Procedure for the configuration of learning factories: Application in industry and comparison	2022
[Kr22]	A product selection method for the configuration of learning factories	2022
[KWM21]	Design approaches for learning factories – review and evaluation	2021
[KM21]	Evaluation of factory elements for the configuration of learning factories	2021
[Ri21b]	Hybrid Learning Factories for Lean Education: Approach and Morphology for Competency-Oriented Design of Suitable Virtual Reality Learning Environments	2021
[Ri21a]	User-oriented Design of Virtual Reality Supported Learning Factory Trainings: Methodology for the Generation of Suitable Design Elements	2021
[Ri21d]	Approach for Conceptualization and Implementation of Virtual Reality in Learning Factories	2021
[KM20]	System development for the configuration of learning factories	2020
[UI19]	Audit – and then what? A roadmap for digitization of learning factories	2019
[En18]	Industrie 4.0-Competencies for a modern production system: A curriculum for Learning Factories	2018
[Ti17]	Utility-based configuration of learning factories using a multidimensional, multiple-choice knapsack problem	2017

Darüber hinaus wurden vom Autor themenbezogene Fachbeiträge veröffentlicht.

Quelle	Titel	Jahr
[KM22b]	Einsatz von digitalen Technologien in Lernfabriken: Use Cases der Prozesslernfabrik „Center für industrielle Produktivität“	2022
[Kr21a]	Algorithmenbasierte Fabrikplanung – Am Beispiel der SMC Deutschland GmbH	2021
[KKM21]	A new exact algorithm to solve the Multiple-Choice Multidimensional Knapsack Problem: The Utility Sorted Branch and Bound Algorithm	2021
[Kr21b]	Requirements for the Implementation of Virtual Reality in Learning Factories	2021
[Ri21c]	Virtual Reality in der betrieblichen Bildung: Chancen und Herausforderungen	2021
[Ri20a]	Gestaltung von personalisierten Lernfabrikschulungen in Virtual Reality im Kontext schlanker Produktion	2020
[Kr19]	Kompetenzorientierte Gestaltung mobiler Lernfabrikmodule bei der DB Netz AG	2019
[Me18c]	Reifegradbasierte Auditierung von Weiterbildungsmaßnahmen in Lernfabriken	2018