

Methodik zur kompetenzorientierten Gestaltung und Implementierung von virtuellen Lehr-Lern-Konzepten für Lernfabriken

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Thomas Riemann, M. Sc.

aus Frankfurt am Main

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich
Mitberichterstatterin: Prof. Dr. Petra Grell
Tag der Einreichung: 13.04.2023
Tag der mündlichen Prüfung: 28.06.2023

Darmstadt 2023

D17

Riemann, Thomas:

Methodik zur kompetenzorientierten Gestaltung von virtuellen Lehr-Lern-Konzepten für Lernfabriken

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt,

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUprints: 2023

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-242040

URI: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/24204>

Tag der mündlichen Prüfung: 28.06.2023

Veröffentlicht unter CC BY 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/>

Vorwort des Herausgebers

Im Kontext von demografischem Wandel, Fachkräftemangel, Globalisierung und zunehmender Digitalisierung nimmt die Bedeutung der Kompetenzentwicklung für produzierende Unternehmen stetig zu. Lernfabriken haben sich in der Vergangenheit als arbeitsbasiertes Werkzeug zur Kompetenzentwicklung etabliert. Die Schulungen in Lernfabriken sind jedoch sehr aufwändig und ortsgebunden. Daher ist es interessant zu untersuchen, inwieweit das Lernfabrikkonzept durch den zielgerichteten Einsatz von Virtual Reality ergänzt bzw. ersetzt werden kann.

Die vorliegende Dissertation entwickelt eine Methodik zur Gestaltung und Implementierung virtueller Lehr-Lern-Konzepte für Lernfabriken. Dabei werden bestehende Ansätze zur kompetenzorientierten Gestaltung von Lernfabriken durch die notwendigen Betrachtungen im Kontext von Virtual Reality erweitert und wichtige Handlungsempfehlungen für die Implementierung gegeben. Das Vorgehen ist dabei sowohl für die Entwicklung hybrider als auch für die Entwicklung rein virtueller Lehr-Lern-Konzepte einsetzbar.

Die entwickelte Methodik wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts zur Gestaltung eines virtuellen Lehr-Lern-Konzepts für die Prozesslernfabrik CiP an der TU Darmstadt erfolgreich eingesetzt. Das hierbei entwickelte Lehr-Lern-Konzept wurde im Rahmen verschiedener Lehrveranstaltungen an der TU Darmstadt, der TU Graz sowie der Université du Luxembourg erfolgreich evaluiert. Mit der Methodik steht ein wertvolles Werkzeug zur Verfügung, das die komplexe Aufgabe der Gestaltung virtueller Lehr-Lern-Konzepte beherrschbar macht.

Die vorliegende Arbeit leistet damit einen wichtigen Beitrag zur zukunftsorientierten Weiterentwicklung der Kompetenzentwicklung für die Produktion von morgen.

Darmstadt, im Juli 2023

Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) an der Technischen Universität Darmstadt.

Meinen Dank möchte ich an dieser Stelle an Herrn Prof. Dr.-Ing Joachim Metternich für die inhaltliche Betreuung meiner Arbeit sowie für die konstruktiven Diskussionen im Kontext der zahlreichen Veröffentlichungen und Betreuungsgespräche aussprechen. Frau Prof. Dr. Petra Grell möchte ich für die Übernahme des Korreferats, das fachliche Interesse an meiner Arbeit, den stets erfrischenden Austausch sowie die gemeinsame Arbeit im Forschungsprojekt PortaL meinen Dank aussprechen.

Allen Kolleg:innen am Institut möchte ich für die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre und das vermittelte Gemeinschaftsgefühl danken. Zu besonderem Dank bin ich den Kolleg:innen aus dem Support verpflichtet. Den Kolleg:innen aus dem Kreis der wissenschaftlichen Mitarbeiter:innen, insbesondere derer der Forschungsgruppen CiP und MiP, danke ich für die gemeinsame inhaltliche Arbeit in den verschiedenen Forschungsprojekten. Besonderer Dank gebührt Dr.-Ing. Rupert Glass, Dr.-Ing. Judith Enke für den inhaltlichen Austausch sowie Dr.-Ing. Antonio Kreß, Jonas Barth, Jannik Rosemeyer, Astrid Weyand, Sebastian Bardy, Nicholas Frick und Lukas Longard, für das intensive Feedback zu meiner Arbeit.

Nicht wirklich in Worte zu fassender Dank gilt meiner Familie, welche den hinter mir liegenden Bildungsweg überhaupt erst ermöglicht, mich bestärkt, mir in schwierigen Phasen Rückhalt gegeben und den Rücken freigehalten hat. Meiner Verlobten Lena zudem für das akribische Korrekturlesen, die moralische Unterstützung und all die zeitlichen Entbehrungen während der Fertigstellung dieser Arbeit.

Dankbar bin ich für das Leben, in das ich in einem Land hineingeboren wurde, das mit seinen freiheitlich-demokratischen Werten wissenschaftliches Arbeiten und persönliche Entfaltung überhaupt erst ermöglicht.

Darmstadt, im Juli 2023

Thomas Riemann

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	v
Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2 Ziel der Forschungsarbeit	4
1.3 Aufbau der Arbeit	6
2 Stand der Forschung und Praxis	9
2.1 Kompetenzen und Kompetenzmessung	9
2.1.1 Wissen	9
2.1.2 Qualifikation, Handlung & Performanz	10
2.1.3 Kompetenz	11
2.1.4 Kompetenzmessung	14
2.2 Kompetenzentwicklung für die Produktion	17
2.2.1 Grundlagen des Lernens	18
2.2.2 Begriff und Konzept der Lernfabriken	21
2.2.3 Gestaltungsansätze für Lernfabriken	28
2.2.4 Digitalisierung und Virtualisierung in Lernfabriken . .	33
2.3 Virtual Reality	37
2.3.1 Abgrenzung des Begriffs	38
2.3.2 Virtual Reality als Hardwaresystem	42
2.3.3 Virtuelle Lehr-Lern-Welten	48
2.3.4 Chancen und Herausforderungen	50
2.3.5 Trends und Entwicklungspotentiale	51
2.4 Zwischenfazit	53
3 Zielsetzung und Forschungskonzeption	55
3.1 Zielsetzung	55

3.2	Forschungskonzeption	55
3.3	Anforderungen an die Methodik	58
3.3.1	Inhaltliche Anforderungen	58
3.3.2	Formale Anforderungen	59
3.4	Abgrenzung des Untersuchungsbereichs	61
4	Methodik zur Gestaltung und Implementierung virtueller Lehr-	
	Lern-Konzepte	65
4.1	Entwicklung und Struktur der Methodik	65
4.1.1	Zielbild der Methodik	65
4.1.2	Struktur der Methodik	66
4.2	Flankierende Bausteine	67
4.2.1	Auswahl der Entwicklungsmethode	68
4.2.2	Softwareentwicklung	69
4.3	Methodikbaustein I: Rahmenbedingungen	71
4.3.1	Initialsituation	71
4.3.2	Handlungsfelder	76
4.3.3	Anforderungen	79
4.4	Methodikbaustein II: Kompetenzorientierte Gestaltung	82
4.4.1	Hardware	83
4.4.2	Szenariokonfiguration	87
4.4.3	Detailgestaltung	91
4.5	Methodikbaustein III: Integration	97
4.5.1	Erprobung	98
4.5.2	Implementierung	99
4.5.3	Weiterentwicklung	103
4.6	Zwischenfazit	104
5	Anwendung und Evaluation	109
5.1	Anwendung der Methodik und Darstellung der Ergebnisse	109
5.1.1	Forschungsprojekt PortaL	109
5.2	Evaluation	122
5.2.1	Evaluationskonzept	122
5.2.2	Evaluationsergebnisse für die Methodik	125
5.2.3	Evaluationsergebnisse für die Lernumgebung	127
5.3	Diskussion der Evaluationsergebnisse	131

6 Zusammenfassung und Ausblick	135
6.1 Zusammenfassung	135
6.2 Ausblick	137
Literaturverzeichnis	141
A Anhang	169
A.1 Kompetenzmessung	169
A.1.1 Motivationsfragebogen	169
A.1.2 Wissensfragebogen	170
A.1.3 Beobachtungsbogen	173
A.2 Virtual Reality	175
A.2.1 Virtual-Reality-Nutzung im privaten Sektor	175
A.2.2 Entwicklungsthesen	176
A.3 Lernfabriken	181
A.3.1 Lernfabrik-Morphologie	181
A.3.2 Vertikaler und horizontaler Abbildungsumfang	189
A.4 Methodik	190
A.4.1 Kompetenzmatrix	190
A.4.2 Anforderungliste	191
A.4.3 Fragen der System-Usability-Scale	198
A.5 Anwendungsfall PortaL	199
A.5.1 Kompetenzmatrix zur Wertstromanalyse	199
A.5.2 Matrix zur Ableitung von Herausforderungen	202
A.5.3 Produktmerkmale	203
A.5.4 Bildschirmfotos 3D-Umgebung	204
A.5.5 Matrix zur Ableitung Szenarioelementen	207
A.5.6 Umgebungslayout Leiterplattenherstellung	208
A.6 Evaluation	209
A.6.1 Usability-Fragebogen	209
A.6.2 Expertenfragebogen	212
A.7 Betreute Abschlussarbeiten	214
A.8 Publikationsübersicht	216

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Formelzeichen	Beschreibung
H_{ijk}	Handlung k der Teilkompetenz j der Hauptkompetenz i
H_{norm}	Normierter Wert für Handlung
K_i	Hauptkompetenz i
k	Anzahl der Teilkompetenzen j pro Kompetenz i
l	Anzahl der Handlungen k pro Teilkompetenz j
m	Anzahl betrachteter Kompetenzen i der Überkompetenz
M_{norm}	Normierter Wert für Motivation
m_i	Teilnehmer:innenangabe zur Motivationsfrage i
M_{max}	maximale Punktzahl des Motivationsfragebogens
n	Stichprobenumfang
p	Signifikanzwert
σ	Standardabweichung
t	Anzahl der Teilkompetenzen j pro Kompetenz i
W_{norm}	Normierter Wert für Wissen
w_i	Erreichte Punktzahl der Wissensfrage i
$w_{i,max}$	maximale Punktzahl der Wissensfrage i
\bar{x}	Mittelwert
\tilde{x}	Median
z	Anzahl der im Wissenstest verwendeten Wissensfragen

Abkürzungen

Kurzzeichen	Beschreibung
3D	Dreidimensional
Acatech	Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.
AMOLED	Active Matrix Organic Light Emitting Diode
AR	Augmented Reality
AV	Augmented Virtuality
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
BT	Bachelorthesis
CiP	Center für industrielle Produktivität
CIRP	Collège International pour la Recherche en Productique (International Academy for Production Engineering)
DOF	Degrees of freedom, dt. Freiheitsgrade
DRM	Design Research Methodology
FoV	Field of View
GD	Gestaltungsdimension
GE	Gestaltungselement
GEP	Gestaltungselementpaket
HMD	Head Mounted Display
IALF	International Association of Learning Factories
i. e. S.	im engeren Sinne
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologien
i. w. S.	im weiteren Sinne
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
L4S	Lean4Students
LCD	Liquid Crystal Display
LF	Lernfabrik
Max.	Maximaler Bewertungswert
Min.	Minimaler Bewertungswert
MR	Mixed Reality
MT	Masterthesis

Fortgesetzt auf nächster Seite

Fortgesetzt von vorheriger Seite

Kurzzeichen	Beschreibung
MVP	Minimum-Viable-Product
MW	Mittelwert
OLED	Organic Light Emitting Diode
p-Wert	Signifikanzwert
PPS	Produktionsplanungs- und -steuerungssystem
PTW	Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen
QCM	Questionnaire of current motivation
RZ	Rüstzeit
SE	Szenarioelement
StA	Studienarbeit
SMD	Surface Mount Device
SMED	Single Minute Exchange of Dies
SoC	System-on-a-Chip
SUS	System-Usability-Scale
SWT	Shapiro-Wilk-Test
SzA	Szenarioalternative
THT	Through Hole Technology
TK	Teilkompetenz
TU	Technische Universität
UdL	Université du Luxembourg
VR	Virtual Reality
WIMP	Windows, Icons, Menus, Pointer
WSA	Wertstromanalyse
WSA 4.0	Wertstromanalyse 4.0
XR	Extended Reality
ZZ	Zykluszeit

Abbildungsverzeichnis

1.1	Auszug aus dem Gartner Hype Cycle 2022	4
1.2	Aufbau der Forschungsarbeit	8
2.1	Wissenstreppe	10
2.2	Wissensarten	11
2.3	Verhältnis zwischen Wissen, Qualifikationen und Kompetenzen	13
2.4	Kompetenzmodell	14
2.5	Generatives Verhältnis: Handeln und Lernen als Transformationsprozesse	15
2.6	Ausprägungen und Unterteilungen von Lernfabriken	22
2.7	Ebenen-Modell zur Gestaltung von Lernfabriken	29
2.8	Vorgehen zur kompetenzorientierten Gestaltung von Lernfabriken	30
2.9	Lernfabrikvirtualisierungsgradient	34
2.10	Unterscheidung zwischen physischen, digitalen, hybriden und virtuellen Lernfabriken	35
2.11	Virtualitätskontinuum	38
2.12	Kognitionszyklus der Virtual Reality	40
2.13	Hauptkomponenten von HMD-basierten VR-Systemen	43
2.14	Verschiedene VR-Controllermodelle	47
2.15	Interesse an Virtual-Reality-Nutzung im privaten Sektor	52
3.1	Forschungskonzeption der vorliegenden Arbeit	57
3.2	Anforderungen an die Methodik	61
4.1	Struktur der Methodik zur kompetenzorientierten Gestaltung und Implementierung virtueller LLK für Lernfabriken	67
4.2	Ablauf der Methodik zur kompetenzorientierten Gestaltung und Implementierung virtueller LLK für Lernfabriken	69
4.3	Methodikbaustein I: Rahmenbedingungen	72
4.4	Matrix zur Ableitung von Herausforderungen	77
4.5	Bewertungsmatrix für Anforderungen und Produktmerkmale	80

4.6	Methodikbaustein II: Kompetenzorientierte Gestaltung, eigene Darstellung	83
4.7	Exemplarisches Hardwareportfolio	84
4.8	Hardwareauswahl: Organisatorische Selektion	85
4.9	Handlungsarten und dazugehörige Taxonomien	85
4.10	Nutzwertmatrix für die Bewertung der Hardwarealternativen	87
4.11	Matrix zur Beschreibung von Szenarioalternativen und deren -elementen	91
4.12	Zusammenhang zwischen Szenarioalternativen, -elementen und Gestaltungselementen	92
4.13	Matrix zur Verknüpfung von Szenarioelementen, Gestaltungselementen und Gestaltungselementpaketen	97
4.14	Methodikbaustein III: Integration	97
4.15	Übersicht über die Methodik	106
4.16	Abfolge der Methodikschritte sowie deren Ergebnisse	107
5.1	3D Umgebung: Produktionsumgebung mit visualisierten Materialflüssen	118
5.2	3D Umgebung: Befragung eines virtuellen Werkers	118
5.3	3D Umgebung: Vergleich zweier Iterationen	119
5.4	Anwender:innen bei der Verwendung des VR-Szenarios im Rahmen einer Lehrveranstaltung an der TU Graz	120
5.5	Ablauf des Vergleichsexperiments	124
5.6	System-Usability-Bewertungsskalen	130
5.7	Boxplots zu den SUS-Bewertungen	131
A.1	Motivationsfragebogen	169
A.2	Wissensfragebogen - Teil 1	170
A.3	Wissensfragebogen - Teil 2	171
A.4	Wissensfragebogen - Teil 3	172
A.5	Beobachtungsbogen - Teil 1	173
A.6	Beobachtungsbogen - Teil 2	174
A.7	Nutzung von Virtual Reality im privaten Sektor	175
A.8	Gestaltungsdimension 1: Betriebsmodell	181
A.9	Gestaltungsdimension 2: Ziele	182
A.10	Gestaltungsdimension 3: Prozess	183

A.11 Gestaltungsdimension 4: Umgebung	184
A.12 Gestaltungsdimension 5: Produkt	185
A.13 Gestaltungsdimension 6: Pädagogik	186
A.14 Gestaltungsdimension 7: Metrik	187
A.15 Gestaltungsdimension 8: Forschung	188
A.16 Vertikaler und horizontaler Abbildungsumfang	189
A.17 Kompetenzmatrix	190
A.18 Kompetenzmatrix der WSA - Teil 1	199
A.19 Kompetenzmatrix der WSA - Teil 2	200
A.20 Kompetenzmatrix der WSA - Teil 3	201
A.21 Abgeleitete Herausforderungen	202
A.22 Abgeleitete und bewertete Produktmerkmale	203
A.23 3D-Umgebung: Minimum-Viable-Product	204
A.24 3D-Umgebung: Darstellung des Rüstvorgangs mittels Zahnrad	205
A.25 3D-Umgebung: Materialbestände	205
A.26 3D-Umgebung: Minimap	206
A.27 3D-Umgebung: Verschwendung	206
A.28 Auszug aus der Matrix zur Ableitung von Szenarioelementen	207
A.29 Umgebungslayout Leiterplattenherstellung	208
A.30 Nutzbarkeitsfragebogen - Teil 1	209
A.31 Nutzbarkeitsfragebogen - Teil 2	210
A.32 Nutzbarkeitsfragebogen - Teil 3	211
A.33 Expert:innenfragebogen - Teil 1	212
A.34 Expert:innenfragebogen - Teil 2	213

Tabellenverzeichnis

2.1	Gestaltungsdimensionen von Lernfabriken im engeren Sinne	23
2.2	Gegenüberstellung der Erfolgsfaktoren der Kompetenzentwicklung und der Umsetzung in Lernfabriken	25
2.3	Präsenzaspekte	42
2.4	Aspekte für die erfolgreiche Virtual-Reality-Implementierung	49
5.1	Listenauszug identifizierter Anforderungen	112
5.2	Bewertung der Szenarioalternativen	114
5.3	Bewertungskriterien mit Gewichtung	115
5.4	Listenauszug mit bewerteten Gestaltungselementen für das virtuelle LLK	117
5.5	Veranstaltungsliste	121
5.6	Expert:innenbewertung: Inhaltliche Anforderungen	126
5.7	Expert:innenbewertung: Formale Anforderungen	127
5.8	Statistische Auswertung der Kompetenzmessung - Teil I	128
5.9	Statistische Auswertung der Kompetenzmessung - Teil II	129
A.1	Entwicklungsthese zu Virtual Reality	176
A.2	Anforderungen an Virtual Reality	191
A.3	Betreute Abschlussarbeiten	214
A.4	Wissenschaftliche Publikationen	216
A.5	Fachbeiträge	217

1 Einleitung

In diesem Kapitel wird die Einleitung in die vorliegende Forschungsarbeit vorgenommen. Hierzu werden die Ausgangssituation und Problemstellung (Abschnitt 1.1) dargestellt. Anschließend werden das Ziel (Abschnitt 1.2) sowie der Aufbau der Forschungsarbeit (Abschnitt 1.3) erläutert.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Aus philosophischer Perspektive gehört es zur Natur des Menschen, sich und seine Welt kontinuierlich neu zu erschaffen [Sc22]. Virtual Reality (VR) stellt ein neues Werkzeug dar, das die Gestaltung völlig neuer Welten ermöglicht. Der Fortschritt dieser Technologie lässt erwarten, dass sie und die mit ihr verknüpften Anwendungen künftig eine wachsende Rolle im privaten wie professionellen Umfeld einnehmen werden [Ki19]. Bereits heute prägen Begriffe wie der des *Metaverse* den gesellschaftlichen Diskurs und bieten Anknüpfungspunkte für neue Geschäftsmodelle [Ki19; Sc22]. Die gesellschaftliche Versuchung, VR als Lösung für eine Vielzahl an Problemen in den unterschiedlichsten Lebensbereichen zu betrachten, ist dementsprechend groß. Fraglich ist, wie VR in der Kompetenzentwicklung für die moderne Arbeitswelt eingesetzt werden kann.

Gesellschaftliche, demographische aber auch technologische Entwicklungen stellen produzierende Unternehmen, als wesentliche Akteure eben dieser Arbeitswelt, kontinuierlich vor neue Herausforderungen. Hierzu zählen neben dem zunehmenden Fachkräftemangel, der immer geringeren Verweilzeit von Arbeitnehmer:innen an der selben Arbeitsstelle auch dynamischere Märkte und kürzere Produktlebenszyklen, die den Anpassungsdruck auf produzierende Unternehmen stetig erhöhen. [AR11] Betroffen sind insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen, die 99,6 % der deutschen Unternehmenslandschaft [SS20] und 61,2 % der Beschäftigten ausmachen [St19].

Das Erreichen strategischer Ziele, die Aufrechterhaltung der Innovationsfähigkeit und die Rentabilität sind in diesem Kontext für viele Unternehmen im-

mer enger mit dem effizienten Aufbau und der Weiterentwicklung notwendiger, produktionsrelevanter Kompetenzen verbunden [Ab10; Ba96; Gy01; HW07]. Durch die steigende Innovationsgeschwindigkeit verliert vorhandenes technologisches Wissen heute abhängig von der Branche innerhalb von zwei bis drei Jahren, digitalisierungsbezogenes Wissen nach rund zwei Jahren [HL20]. Bedingt durch die steigende Komplexität der Produkte und Fertigungsprozesse nimmt der für Unternehmen erforderliche Wissensumfang stetig zu. Aus diesem Grund werden Unternehmen immer häufiger daran gemessen, wie effektiv und effizient sie in der Lage sind Wissen aufzubauen, eigenständig weiterzuentwickeln und vorhandenes Wissen für die Wertschöpfung zu nutzen [BC07; NRS13]. Diese Entwicklung stellt immer neue Anforderungen an produzierende Unternehmen und insbesondere deren Beschäftigte [CE10; EC13]. Die so entstehende Ausgangslage offenbart für Unternehmen eine neue Situation: auf der einen Seite wird qualifiziertes Personal zum Schlüssel für Wettbewerbsfähigkeit, auf der anderen Seite nimmt die Halbwertszeit der Relevanz des Wissens und die Verweildauer der Beschäftigten stetig ab.

Neben Fach- und Methodenkompetenzen werden in Zukunft vermehrt auch digitale Kompetenzen benötigt, um im Kontext der Industrie 4.0 im Wettbewerb bestehen zu können. Laut Digitalaktionsplan der EUROPÄISCHEN KOMMISSION werden in Zukunft 90 % aller Berufe digitale Kompetenzen voraussetzen. Allerdings sind nach wie vor 35 % der europäischen Bürger:innen in dieser Hinsicht nicht hinreichend qualifiziert [Eu20]. Dieser Misstand wird auch in einer Befragung der ACATECH¹ unter deutschen Unternehmen bestätigt, in der 80 % der befragten Unternehmen angaben, dass fehlende Kompetenzen die digitale Transformation erschweren [Ac22]. Bereits heute führt dies dazu, dass vorhandene Potentiale nicht vollumfänglich ausgeschöpft werden können [Bi20; De21; Gl18; He20; SD18; SL20]. Der Mensch soll trotz technologischen Fortschritts und zunehmender Digitalisierung seine elementare Rolle in der Produktion behalten [Ba18; Re17]: Arbeitnehmer:innen sollen proaktiv Verbesserungspotentiale in der Produktion erkennen und diese nutzbar machen können. Dabei nicht nur für einzelne Prozesse, sondern im Idealfall prozessübergreifend [Ha17].

Die in Deutschland klassisch institutionell organisierte Weiterbildung kann mit der zuvor skizzierten Dynamik der Industrie nur schwer Schritt halten.

¹Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V.

Sie steht heute im Hinblick auf Methoden und Formate in Diskrepanz zu den bestehenden Anforderungen. Es zeigt sich, dass benötigte Kompetenzen durch klassische Lernmethoden nicht in ausreichendem Maß vermittelt werden können. [Bu19] Hierzu bedarf es mindestens der Erweiterung klassischer Weiterbildungsformate durch regelmäßige praktische Erfahrungsmöglichkeiten innerhalb eines realitätsnahen Umfelds [Bu16]. In den zurückliegenden Jahren hat sich das Konzept der Lernfabriken etabliert, das diese Verknüpfung von Wissensvermittlung und praktischer Erfahrung in den angebotenen Weiterbildungsformaten herstellt [AMT18]. Im Rahmen des sogenannten arbeitsplatzbezogenen Lernens werden in ihnen für die Zielgruppe relevante Lerninhalte vermittelt [SSJ98]. Zwar ist die Bedeutung der Lernfabriken in den letzten Jahren sukzessive gestiegen [SPK20], jedoch ist auch für Lernfabriken, aufgrund bestehender konzeptbedingter Limitationen, die stetige konzeptuelle Weiterentwicklung und Einbindung neuer Technologien von großer Relevanz [TM17]. So ist das Konzept aufgrund seines Aufwands (z. B. für Aufbau und Betrieb) nach wie vor großen Unternehmen und akademischen Institutionen vorbehalten [Ti15b]. Die zunehmende Digitalisierung und Virtualisierungsbemühungen könnten das Konzept wirtschaftlich attraktiver für die breite Masse an Unternehmen, insbesondere jedoch KMU, werden lassen [Ri20c].

Um Weiterbildungskonzepte weiter zu verbessern, kann der Einsatz innovativer Medien zielführend sein [TM17]. Im Rahmen der anfänglichen Versuche, Weiterbildungskonzepte zu digitalisieren und zu virtualisieren, fanden in den 1980er Jahren erste Untersuchungen statt, in wie weit computerbasierte Methoden künftige Weiterbildungsformate unterstützen können. Damit war auch die Frage verknüpft, ob durch die Digitalisierung ein Mehrwert für die Anwender:innen solcher Formate generiert werden kann. [NZ88] In den 1990er Jahren wurde prognostiziert, dass Schüler:innen bis zum Jahr 2020 einen Großteil des Unterrichts zeitlich und räumlich flexibel in virtuellen Welten absolvieren würden [Ps95]. Offenkundig schritt die Entwicklung in diesem Bereich wesentlich langsamer voran, als in den 1990er Jahren vorhergesagt. Die Entwicklung von VR ist heute allerdings auf einem technologischen Stand, der einen Einsatz nicht nur als Unterhaltungstechnologie im privaten Bereich ermöglicht, sondern auch den kommerziellen bzw. professionellen Einsatz im Weiterbildungsbereich prinzipiell erlaubt und attraktiv erscheinen lässt. An diesem Umstand knüpft die vorliegende Arbeit an.

1.2 Ziel der Forschungsarbeit

Lernfabriken haben sich in den vergangenen Jahren als geeignetes Instrument zur Kompetenzentwicklung für die Produktion etabliert [Ab10; Ab15; Ab17; AMT18; Kr19]. Doch ergeben sich diverse Limitationen, welche die Einsetzbarkeit in der Praxis einschränken können. Neben der geringen Anpassungsfähigkeit und Szenariovariabilität sind exemplarisch vor allem der hohe Aufbau- und Betriebsaufwand zu nennen, die dazu führen, dass Lernfabriken nach wie vor nur von großen Unternehmen sowie akademischen Institutionen betrieben werden [Ti15b; TM17]. Zeitgleich sehen sich Lernfabriken gleichermaßen wie die Industrien selbst, für deren Kompetenzentwicklung sie genutzt werden, mit dem stetigen Wandel der Produktion konfrontiert. Die Angebote der Lernfabriken müssen sich hieran kontinuierlich anpassen, wobei mit steigenden Kompetenzerfordernissen in der Produktion auch die Anforderungen an Lernfabriken wachsen.

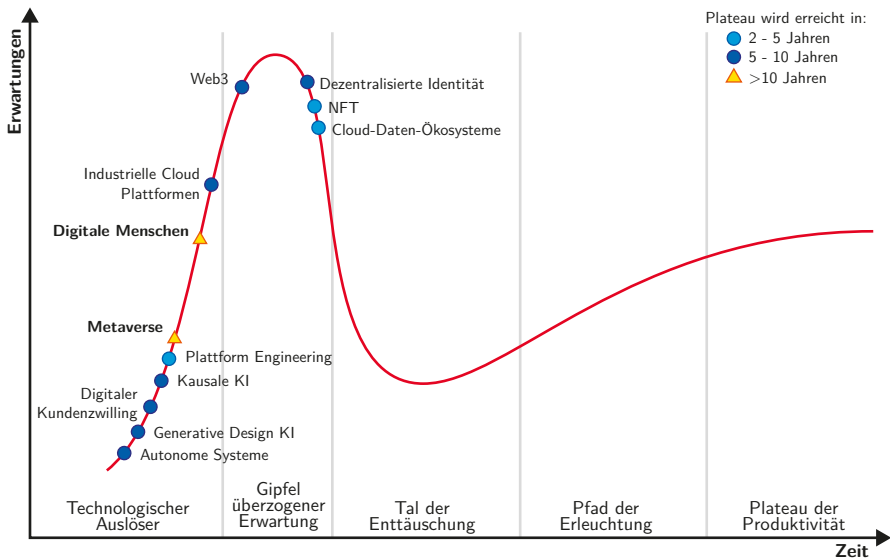


Abbildung 1.1: Auszug aus dem Gartner Hype Cycle 2022, eigene Darstellung in Anlehnung an [Ga22].

VR ist als Technologie heute auf einem Entwicklungsstand, der den produktiven Einsatz in Industrie und Weiterbildung realistisch erscheinen lässt. Dies zeigt u. a. der sogenannte *Hype Cycle* des Marktforschungsunternehmens GARTNER. Bereits im Jahr 2017 wurde VR auf dem sogenannten *Pfad der Erleuchtung* eingeordnet, auf dem sich Technologien kurz vor der produktiven Einsetzbarkeit befinden. [Ga17] Es ist davon auszugehen, dass diese Entwicklung in den vergangenen Jahren weiter vorangeschritten ist und VR mittlerweile auf dem Plateau der Produktivität angekommen ist [WSS20]. Mittlerweile sind im Hype Cycle bereits Technologien wie das *Metaverse* oder *Digitale Menschen* dargestellt, die in engem Zusammenhang mit VR stehen (s. Abbildung 1.1) [Ga22].

Das Potential und die schnelle Entwicklung von VR-Technologien ermöglichen heute auch in industriellen Umgebungen einen effizienten Einsatz. In der Fertigung kann VR bspw. für die Visualisierung von Daten, zur Teamarbeit über physische Grenzen hinweg, zur Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen, als Entwicklungs- und Designtool und für die Weiterbildung von Arbeitnehmer:innen verwendet werden [Ju18]. Durch die stete Weiterentwicklung von Computertechnologien und die Möglichkeiten des vernetzten Lernens werden kontinuierlich neue Wege geschaffen, um Lernumgebungen zu gestalten, die realistisch und authentisch sind und durch ihre Modernität die Anwender:innen zur Verwendung motivieren [KK05]. Diese Faktoren lassen die Technologie zunehmend als geeignet erscheinen, um bestehenden Limitationen von Lernfabriken zu begegnen und das Konzept der Lernfabriken in nutzbringender Weise zu ergänzen.

Für eben diesen Einsatz von VR bedarf es jedoch eines einfachen, strukturierten Vorgehens, das auch wenig erfahrenen Lernfabrikentwickler:innen die Einführung virtueller oder hybrider Lehr-Lern-Konzepte (LLK) in Lernfabriken ermöglicht. Die im Rahmen dieser Forschungsarbeit durchgeführte Betrachtung bestehender Gestaltungsansätzen zeigt jedoch, dass ein solches Vorgehen bis dato nicht existiert bzw. die Besonderheiten der Technologie VR in den bislang verwendeten Ansätzen nicht in hinreichendem Maße berücksichtigt werden. Diese Lücke der wissenschaftlichen Betrachtung wird im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit geschlossen. Unter Berücksichtigung bewährter Gestaltungsansätze wird eine Methodik zur Gestaltung und Implementierung von virtuellen LLK in Lernfabriken entwickelt und beschrieben.

ben, die Lernfabrikentwickler:innen bei der Konzeptionierung von virtuellen LLK unterstützen soll. Hieran knüpft die erste Forschungsfrage als Grundlage für die vorliegende Arbeit an:

Forschungsfrage 1:

Nach welchem strukturierten Vorgehen können virtuelle LLK für Lernfabriken gestaltet und implementiert werden?

In der vorliegenden Forschungsarbeit wird weitergehend untersucht, in wie weit die entwickelte Methodik in der Lage ist, LLK hervorzubringen, die effektiv zur Kompetenzentwicklung für die Produktion eingesetzt werden können. Dies führt zur zweiten Forschungsfrage:

Forschungsfrage 2:

Sind die im Rahmen der Methodikanwendung gestalteten LLK in der Lage, die Kompetenzentwicklung effektiv zu unterstützen?

1.3 Aufbau der Arbeit

Anschließend an die Einleitung in diesem Kapitel wird in Kapitel 2 der Stand der Forschung und Praxis dargestellt. Dabei wird neben Theorien, Modellen und Methoden auch auf den Stand der für diese Arbeit relevanten Technologien eingegangen. Maßgebliche Bereiche der Wissenschaft und Praxis sind hierbei vor allem die Gebiete der Kompetenzen, der Lernfabriken wie auch der VR. Als Einstieg in diese Bereiche wird zunächst auf den Kompetenzbegriff sowie die Messung von Kompetenzen (Abschnitt 2.1) eingegangen. Im Anschluss wird das Konzept der Lernfabriken eingeführt (Abschnitt 2.2). Die Erläuterungen zum Themenkomplex Lernfabriken werden insbesondere zur Herleitung der Forschungslücke verwendet. Zudem dienen die dort dargestellten Theorien und Vorgehensweisen zur Gestaltung von physischen Lernfabriken als Ausgangspunkt für die weiteren Überlegungen dieser Forschungsarbeit. Zuletzt wird der wissenschaftliche und technologische Stand im Bereich VR dargestellt (Abschnitt 2.3). Hierbei wird gezielt auf aktuelle Einsatzgebiete sowie Trends und Entwicklungspotentiale eingegangen. Das Kapitel wird durch ein Zwischenfazit abgeschlossen (Abschnitt 2.4).

In Kapitel 3 wird die Zielsetzung und Forschungskonzeption beschrieben. Hierbei wird zunächst auf Basis der im vorherigen Abschnitt dargestellten Rahmenbedingungen die Zielsetzung (Abschnitt 3.1) dieser Arbeit erarbeitet. Aus dieser wird anschließend die Forschungskonzeption (Abschnitt 3.2) abgeleitet. Aufbauend hierauf werden inhaltliche und formale Anforderungen an die Methodik definiert (Abschnitt 3.3) sowie eine Abgrenzung des Untersuchungsreichs vorgenommen (Abschnitt 3.4).

Die Methodik zur Gestaltung und Implementierung wird in Kapitel 4 dargestellt. Hierzu wird zunächst auf die Entwicklung und übergeordnete Struktur der Methodik eingegangen (Abschnitt 4.1) sowie die flankierenden Methodikbausteine der Entwicklungsmethode und der Softwareentwicklung beschrieben (Abschnitt 4.2). Im Anschluss werden die drei zentralen Bausteine der Methodik detailliert. Es wird zunächst der erste Methodikbaustein zur Aufnahme der Rahmenbedingungen (Abschnitt 4.3) dargestellt. Im Anschluss erfolgen die Beschreibungen des zweiten Methodikbausteins zur kompetenzorientierten Gestaltung (Abschnitt 4.4) sowie des dritten Methodikbausteins zur Integration des LLK (Abschnitt 4.5). Das Kapitel wird durch ein Zwischenfazit abgeschlossen (Abschnitt 4.6).

Kapitel 5 zeigt die Anwendung und Evaluation der Methodik in der Praxis. Die Methodik wurde dabei in einem universitären Anwendungsfall erprobt (Abschnitt 5.1). Im Rahmen der Erprobung wurde ein virtuelles LLK für den Lerninhalt der Wertstromanalyse für eine bestehende Lernfabrik entwickelt und umgesetzt. Im Anschluss werden die Ergebnisse der Evaluation in Abschnitt 5.2 beschrieben und in Abschnitt 5.3 diskutiert.

Die Arbeit schließt in Kapitel 6 mit einer Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse der vorliegenden Forschungsarbeit (Abschnitt 6.1) sowie einem Ausblick auf mögliche anschließende Forschungsarbeiten (Abschnitt 6.2).

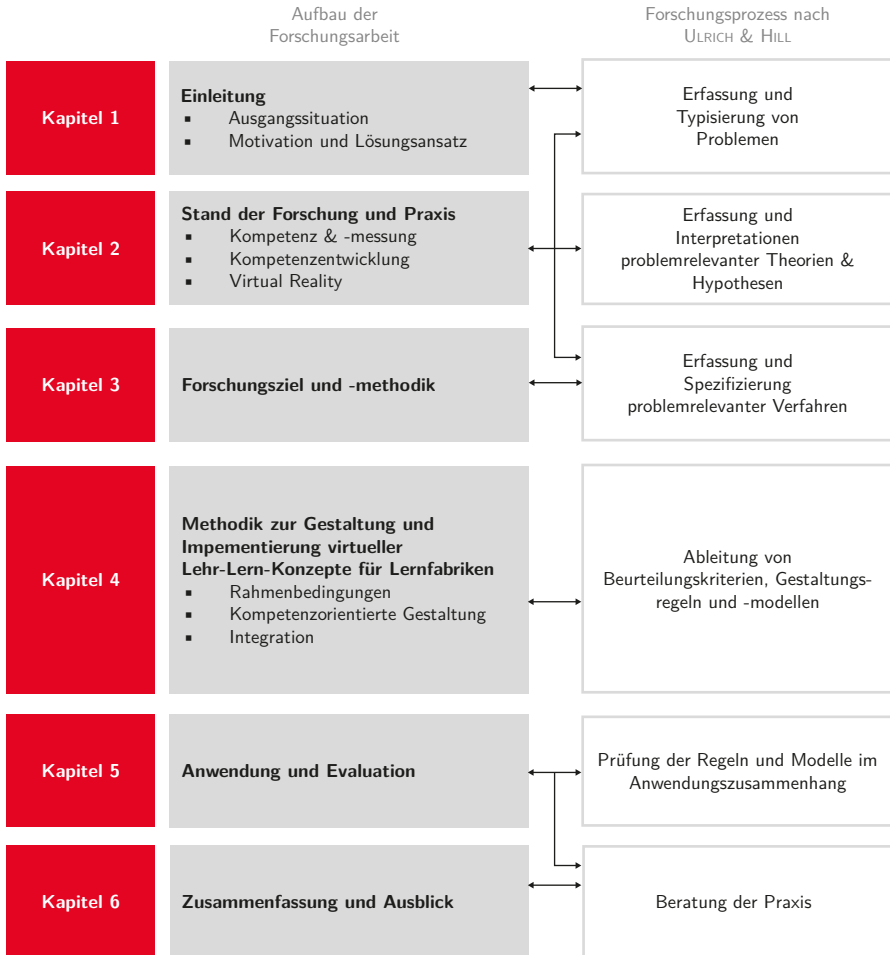


Abbildung 1.2: Aufbau der Forschungsarbeit, eigene Darstellung in Anlehnung an ULRICH & HILL [UH76].

2 Stand der Forschung und Praxis

Die zu entwickelnde Methodik zur Gestaltung und Implementierung von virtuellen LLK für Lernfabriken fundiert auf unterschiedlichen Forschungsfeldern. Die relevanten Grundlagen aus diesen werden im Folgenden dargestellt und begründen die Forschungslücke sowie die eigene Forschungsleistung im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit. Zunächst wird auf die für den weiteren Verlauf wichtigen Begriffe der *Kompetenzen* und der *Kompetenzmessung* sowie mit diesen beiden Begriffen verknüpfte Konzepte eingegangen (Abschnitt 2.1). Anschließend werden die Grundlagen zur Kompetenzentwicklung für die Produktion und das damit in Zusammenhang stehende Konzept der *Lernfabriken* vorgestellt (Abschnitt 2.2). Abschließend wird das Themenfeld der *Virtual Reality* aufgearbeitet und dargestellt (Abschnitt 2.3).

2.1 Kompetenzen und Kompetenzmessung

Die Entwicklung von Kompetenzen ist für moderne Unternehmen ein wichtiger Baustein und Wettbewerbsfaktor. Dies begründet sich mit sich rasch verändernden Marktbedingungen, kurzen Produktlebenszyklen und einem hohen Anpassungsdruck. Dabei sollen Arbeitnehmer:innen zunehmend in der Lage sein, proaktiv prozessübergreifende Potentiale zu erkennen [AR11]. Der Kompetenzbegriff wird aus diesem Grund mit seinen Bestandteilen im Folgenden erläutert. In diesem Zusammenhang wird ergänzend auf die verknüpften Begriffe von *Wissen* und *Qualifikation* eingegangen.

2.1.1 Wissen

Wissen bildet nach weitläufigem Verständnis die Grundlage für eine Vielzahl von Lernprozesse [Te11]. Obwohl der Begriff umgangssprachlich eine vermeintlich einfache Bedeutung suggeriert, liegen ihm verschiedenste Theorien und Konzepte zu Grunde. Wissen kann zunächst vereinfacht als Ergebnis der Aufnahme von Informationen durch Lernen verstanden werden [Eu08]. Wird ergänzend die Wissenstreppe nach NORTH (s. Abbildung 2.1) betrachtet, ist zu

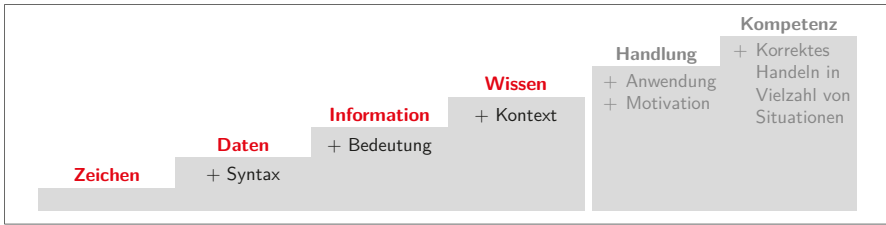


Abbildung 2.1: Wissenstreppe nach NORTH, eigene Darstellung in Anlehnung an [No11].

erkennen, dass Wissen auf der stufenweisen Aggregation vorgelagerter Konzepte aufbaut. So sind *Zeichen*, *Daten* und *Information* dem Wissen zugrundeliegende Konstrukte, die durch Anreicherung in das jeweils übergeordnete Konstrukt überführt werden können [No11]. Wissen besteht nach diesem Verständnis aus kontextualisierten Informationen [Bl56; Ma13].

Wissen lässt sich weiter systematisieren und in verschiedene Arten unterteilen. Es ist im Kontext von Kompetenzen vor allem das sogenannte *handlungsbezogene Wissen* von Bedeutung, das Individuen zur autonomen Ausübung von Handlungen befähigt [HTM15]. Im *konstruktivistischen Modell* nach RENKL wird Wissen in vier Arten unterschieden [Re94; Te11]: das *konzeptuelle*, das *prozedurale*, das *deklarative* und das *konditionale Wissen*. Die vier Wissensarten befinden sich auf unterschiedlichen Ebenen und zeichnen sich durch einen abnehmenden Abstraktions- bzw. zunehmenden Konkretisierungsgrad aus (s. Abbildung 2.2). [Re94; Te11]

Spätere Arbeiten, die zumeist auf RENKL basieren, wählen zum Teil andere Begriffe. So führt PITTICH den Begriff des *Professionswissen* ein [Pi14].

Für die kompetenzorientierte Lernfabrikforschung haben sich die Begriffe des *konzeptuellen Wissens* und des *Professionswissens* etabliert [Ab17; Gl21; Me18b; Ti16].

2.1.2 Qualifikation, Handlung & Performanz

Der Begriff der *Qualifikation*, im Sinne von Handlungsfähigkeit, bildet nach Wissen den nächsten Schritt zur Annäherung an den Kompetenzbegriff. Dabei wird die oberflächlich wahrnehmbare Struktur des menschlichen Handelns

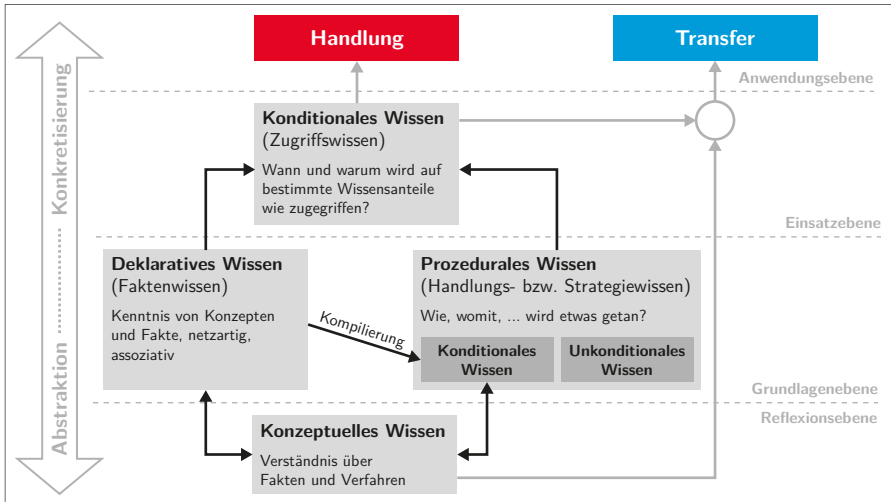


Abbildung 2.2: Wissensarten nach RENKL [Re94; Te11].

als Performanz bezeichnet [Ju14]. Qualifikationen werden jedoch nicht erst im selbstorganisierten Handeln sichtbar, sondern lassen sich bereits in abgegrenzten und normierbaren Situationen erkennen [Er17; Ju14]. Der Begriff der Qualifikation beschreibt ein Konstrukt, das zwar ein Handeln in abgegrenzten, vorgegebenen Situationen erlaubt, jedoch nicht zum Handeln in neuartigen, unbekanntem Situationen befähigt [Ju14]. Hierzu fehlt es an der dafür notwendigen *Selbstorganisationsfähigkeit* [Er17]. Eine Qualifikation lässt sich insofern als Zusammenfassung oder Positionsbestimmung aktuell vorhandenen Wissens, Fähigkeiten sowie Fertigkeiten verstehen und lässt sich in Prüfungssituationen überprüfbar beziehungsweise messbar machen [Er17]. Qualifikationen werden dementsprechend vornehmlich anforderungs- bzw. herausforderungsorientiert eingesetzt [Ju14].

2.1.3 Kompetenz

Der *Kompetenzbegriff* ist einer der zentralen Begriffe, wenn die Weiterentwicklung von Arbeitnehmer:innen betrachtet wird [KL06]. Wie bei vielen anderen Konzepten existiert auch für den Kompetenzbegriff keine allgemeingültige wissenschaftliche Definition [Ma13; Sh00; Ti16].

Die EUROPÄISCHE KOMMISSION definiert Kompetenzen als »nachgewiesene Fähigkeit, Wissen, Fertigkeiten sowie persönliche, soziale und/oder methodische Fähigkeiten in Arbeits- oder Studiensituationen und in professioneller und/oder persönlicher Entwicklung zu nutzen« und beschreibt diese im europäischen Qualifikationsrahmen im Sinne von *Verantwortlichkeit* und *Autonomie* [Eu08].

Die allermeisten weiteren Kompetenzdefinitionen sind im linguistischen oder psychologischen Bereich verwurzelt. Einfache Definitionen aus diesem Bereich verstehen Kompetenzen als effektive Interaktion eines Individuums mit seiner Umwelt [Wh59] oder als realisierte Fähigkeiten [CSG03]. Derartige Konzepte reichen für die vorliegende Arbeit jedoch nicht aus. Weitere Erklärungsansätze finden sich im Kontext des *verhaltensbasierten Kompetenzverständnisses* [Go94] sowie des *generischen* und des *holistischen Kompetenzverständnisses* [Ab17; EK08; Ma13]:

- *Verhaltensbasiertes Kompetenzverständnis:*
In diesem Verständnis werden Kompetenzen als einzelne Performanz in der Bearbeitung spezifischer Problemsituationen verstanden. [Go94]
- *Generisches Kompetenzverständnis:*
In diesem Verständnis werden generelle Attribute eines Individuums und deren Einfluss auf die effektive Performanz betrachtet. Dabei spielen Attribute wie Wissen oder Fähigkeit zum kritischen Denken eine Rolle. Kompetenzen können in diesem Verständnis unabhängig vom Kontext angewendet werden. [Go94]
- *Holistisches Kompetenzverständnis:*
In diesem Verständnis werden die beiden zuvor genannten vereinigt. Kompetenzen werden als Gefüge von Wissen, Fertigkeiten, Fähigkeiten, Einstellungen und Performanzen in spezifischen Kontexten verstanden. Es findet eine Verknüpfung mit der zu bearbeitenden Aufgabe sowie dem speziellen Kontext statt. [Ab17; EK08]

Für den weiteren Verlauf soll, vor allem wegen seiner Relevanz im Feld der Lernfabrikforschung, auf das Kompetenzverständnis nach ERPENBECK & ROSENSTIEL zurückgegriffen werden [Gl21; Kr22; Ti18]. In diesem werden Kompetenzen als geistige oder physische Selbstorganisationsdispositionen verstanden, welche die Fähigkeiten enthalten, selbstorganisiert und kreativ zu han-

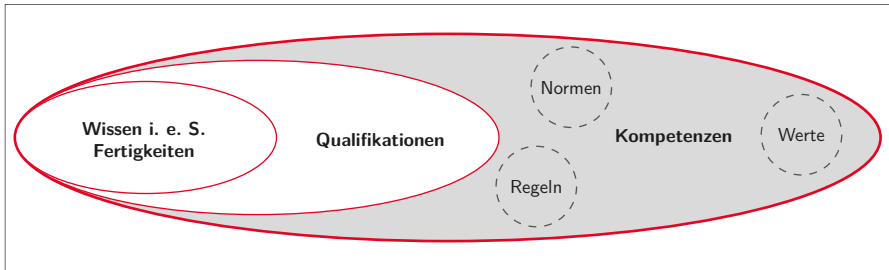


Abbildung 2.3: Verhältnis zwischen Wissen, Qualifikationen und Kompetenzen [Er17; HE09].

deln sowie mit unscharfen oder gar fehlenden Zielvorstellungen sowie Unbestimmtheit in komplexen und dynamischen Situationen umzugehen [Er17].

In diesem Kontext wird, je nach Ziel des Handelns, zwischen zwei Kompetenztypen unterschieden, die nachfolgend kurz beschrieben werden sollen [Er17]:

- Selbstorganisierte Handlungsfähigkeiten, die zum Ansteuern und Erreichen eines mehr oder weniger klar umrissenen Zieles notwendig sind
- Selbstorganisierte Handlungsfähigkeiten, die zum selbstorganisierten und kreativen Bewältigen von neuen und unvorhersehbaren Situationen genutzt werden

Gleichzeitig lassen sich Kompetenzen nach ERPENBECK & ROSENSTIEL sowie TENBERG in vier verschiedene *Kompetenzklassen* einteilen. Diese lauten, wie in Abbildung 2.4 dargestellt: *fachlich-methodische Kompetenzen*, *personale Kompetenzen*, *sozial-kommunikative Kompetenzen* sowie *aktivitäts- und umsetzungsorientierte Kompetenzen* [Ab17; Ca12; Te11]. Bei den sogenannten *Gradientstrategien* dominieren fachlich-methodische Kompetenzen die personalen, die sozial-kommunikativen sowie die aktivitäts- und umsetzungsbezogenen Kompetenzen. Bei *Evolutionstrategien* kehrt sich dieser Zusammenhang um, sodass die drei genannten Kompetenzen die fachlich-methodischen Kompetenzen dominieren. [Te11]

Abschließend muss in Zusammenhang mit Kompetenzen der Vollständigkeit halber auf die Konstrukte der *Regeln*, *Werte* und *Normen* eingegangen werden. Diese stehen in engem Zusammenhang mit dem vorgestellten Kompetenzverständnis nach ERPENBECK & ROSENSTIEL (s. Abbildung 2.3). Insbesondere

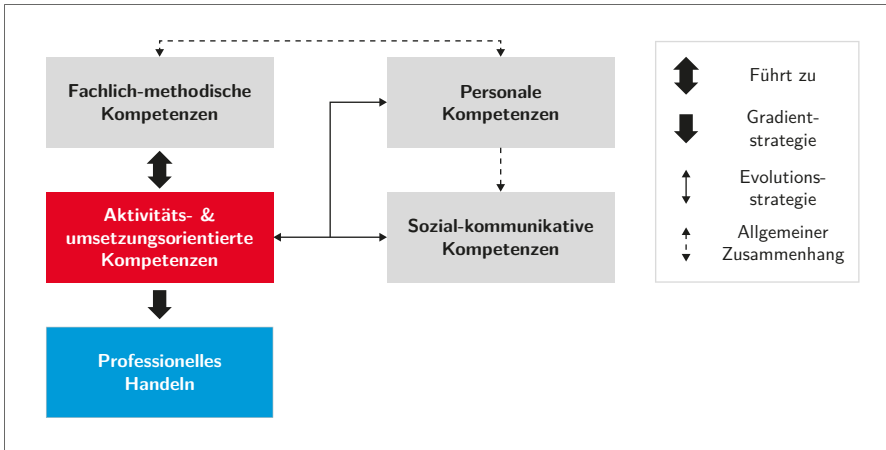


Abbildung 2.4: Kompetenzmodell nach TENBERG [Ca12; Te11].

bei selbstorganisierten Handlungen, bei denen das Individuum weitgehend frei über den Lösungsweg entscheiden kann, wirken sich diese moderierend auf das jeweilige Individuum aus. Entscheidungen werden so durch individuelle Wertvorstellungen sowie internalisierte Regeln und Normen beeinflusst. [Er17; Gl21; Ju14]

2.1.4 Kompetenzmessung

Nachdem in den vorherigen Abschnitten der Kompetenzbegriff hergeleitet wurde, soll innerhalb dieses Abschnitts in kompakter Form auf den Themenkomplex der Kompetenzmessung eingegangen werden. Da sich die Verwendung der Kompetenzmessung im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit auf die Anwendung beschränkt, soll primär auf das für die Evaluation gewählte Kompetenzmessverfahren eingegangen werden. Eine detaillierte Betrachtung verfügbarer Verfahren erfolgt nicht, kann jedoch in der einschlägigen Literatur nachgeschlagen werden [CSG20; Er17].

Kompetenzen können nicht direkt sichtbar gemacht werden, sodass nur indirekt auf sie geschlossen werden kann. Dies bedingt, dass auch eine Messung des Kompetenzniveaus nur indirekt möglich ist [Ti13]. Über die mit der zu messenden Kompetenz zusammenhängenden Wissens Elemente sowie Hand-

lungen kann jedoch eine Quantifizierung des vorliegenden Kompetenzniveaus erfolgen [Gl21; Ha16; Ha95; Hé13].

Dieser Sachverhalt begründet sich auf dem Konzept, das menschliches Handeln in zwei Ebenen eingeteilt werden kann. Es lässt sich unterteilen in eine *Tiefenstruktur* und eine nach außen wahrnehmbare *Oberflächenstruktur*. Die Tiefenstruktur ist mit dem Kompetenzbegriff verknüpft und die Oberflächenstruktur mit dem Begriff der *Performanz*. Performanzen sind Handlungen, die auf Kompetenzen schließen lassen. Als *Disposition* wird die Fähigkeit zu Handeln verstanden. Zwischen den beiden genannten Ebenen lassen sich Transformationen in jeweils beide Richtungen vollziehen (s. Abbildung 2.5). [Ju14]

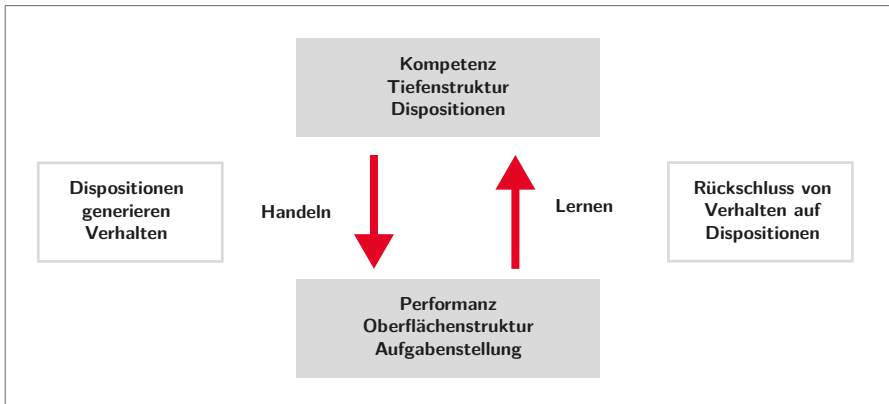


Abbildung 2.5: Generatives Verhältnis: Handeln und Lernen als Transformationsprozesse [Ju14].

In der vorliegenden Forschungsarbeit soll im weiteren Verlauf das Kompetenzmessverfahren nach GLASS Anwendung finden, da dieses explizit für die Messung fachlich-methodischer Kompetenzen im Produktionskontext entwickelt wurde. Die allermeisten verfügbaren Kompetenzmessverfahren haben ihren Ursprung im Bereich der Pädagogik und Psychologie [Er17]. Im Rahmen der Betrachtungen von GLASS wird erstmals die Verbindung in die ingenieurwissenschaftliche und produktionstechnische Domäne hergestellt [Gl21]. Das Messverfahren begründet sich auf der Annahme, dass auf Kompetenzen über die Aspekte *Motivation*, *Wissen* und *Handeln* geschlossen werden kann

[Gl21; GM20]. Die drei Aspekte sowie die dazugehörigen Betrachtungen und Berechnungen werden im Folgenden erläutert.

Kompetenzwert

Der Kompetenzwert (K) wird als gerichtetes arithmetisches Mittel der berechneten Werte für Motivation (M_{norm}), Wissen (W_{norm}) und Handeln (H_{norm}) unter Verwendung standardisierter Gesamteffekte der drei genannten Konstrukte berechnet. Der berechnete Kompetenzwert errechnet sich nach Gleichung (2.1) bzw. (2.2) [Gl21; GM20]:

$$K = \frac{T_{\xi_1, \eta_2} \cdot M_{norm} + T_{\eta_1, \eta_2} \cdot W_{norm} + T_{\eta_3, \eta_2} \cdot H_{norm}}{T_{\xi_1, \eta_2} + T_{\eta_1, \eta_2} + T_{\eta_3, \eta_2}} \quad (2.1)$$

$$K = \frac{0,166 \cdot M_{norm} + 0,512 \cdot W_{norm} + 0,515 \cdot H_{norm}}{1,193} \quad (2.2)$$

Für die standardisierten Gesamteffekte der drei Konstrukte werden für die Anwendung im Rahmen dieser Arbeit die Werte nach GLASS übernommen ($T_{\xi_1, \eta_2} = 0,166$; $T_{\eta_1, \eta_2} = 0,512$; $T_{\eta_3, \eta_2} = 0,515$). Diese wurden im Rahmen einer Kompetenzmessung für die Wertstromanalyse 4.0 (WSA 4.0) erstellt, die einer herkömmlichen Wertstromanalyse (WSA), welche den späteren Evaluationskontext bildet, im Hinblick auf Handlung, Wissen und Motivation nahezu identisch ist. Für Anwendungen in einem anderen Kontext müssen gegebenenfalls eigene Effekte zur Gewichtung der Variablen berechnet werden. [Gl21; GM20]

Motivations-, Wissens- und Handlungswert

Der **Motivationswert** wird mittels eines Fragebogen bestehend aus zwölf Fragen in den drei Bereichen Interesse, Erfolgsaussichten und Herausforderung in Anlehnung an einen Fragebogen von RHEINBERG UND VOLLMEYER [RVB01] ermittelt. Der normierte Wert für Motivation (M_{norm}) kann gemäß Gleichung (2.3) berechnet werden [Gl21; GM20]:

$$M_{norm} = \frac{\sum m_{i, Interesse} + \sum m_{i, Erfolg} + \sum m_{i, Herausforderung}}{M_{max}} \quad (2.3)$$

Für die Bewertung des Aspekts **Wissen** wird eine Wissensabfrage verwendet, die aus Fragen in Bezug auf das kompetenzrelevante Fach- und Prozesswissen besteht. Die Wissensfragen können hierbei bspw. aus der Matrix der intendierten Kompetenzen des LLK abgeleitet werden [Gl21; GM20]. Der normierte Wert für Wissen (W_{norm}) kann gemäß Gleichung (2.4) berechnet werden [Gl21; GM20]:

$$W_{norm} = \frac{\sum w_{i,Fachwissen} + \sum w_{i,Prozesswissen}}{\sum_{i=1}^z w_{i,max}} \quad (2.4)$$

Der Wert für **Handlung** wird über eine Beobachtung der Teilnehmer:innen gewonnen. Hierzu wird eine allgemeine Einschätzung der Beobachter:innen, die Fehlerquote sowie die Unabhängigkeit der Handlung erhoben. Der normierte Wert für Handlung (H_{norm}) kann gemäß Gleichung (2.5) berechnet werden [Gl21; GM20]:

$$\begin{aligned} H_{norm} = & \frac{1}{12m} \left(\sum_{i=1}^m \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l H_{ijk,Allgemein} \right. \\ & + \frac{1}{12m} \left(\sum_{i=1}^m \frac{1}{k} \sum_{j=1}^n \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l H_{ijk,Eigenständigkeit} \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{12m} \left(\sum_{i=1}^m \frac{1}{k} \sum_{j=1}^n \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l H_{ijk,Fehlerrate} \right) \right) \right) \quad (2.5) \end{aligned}$$

Exemplarische Erhebungsbögen, wie sie im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit für die Quantifizierung der einzelnen Aspekte verwendet wurden, finden sich im Anhang (Abschnitt A.1). Eine detaillierte Beschreibung und Herleitung des Verfahrens kann der Literatur entnommen werden [Gl21; GM20].

2.2 Kompetenzentwicklung für die Produktion

In diesem Abschnitt wird der aktuelle Stand der Forschung zum Bereich der Kompetenzentwicklung für die Produktion dargestellt. Hierzu werden zunächst die Grundlagen zum Lernen (Abschnitt 2.2.1) und das Konzept der

Lernfabriken (Abschnitt 2.2.2) erläutert sowie vorhandene Gestaltungsansätze dargestellt (Abschnitt 2.2.3). Im Weiteren wird auf aktuelle Anwendungsfälle zur Digitalisierung und Virtualisierung von Lernfabriken (Abschnitt 2.2.4) sowie auf Grundlagen zu virtuellen Lehr-Lern-Welten (Abschnitt 2.3.3) eingegangen.

2.2.1 Grundlagen des Lernens

Obwohl in Weiterbildungsformaten die gesellschaftliche Tendenzen zur Konsumorientierung und Sammlung von Sekundärerfahrungen in der Vergangenheit vorherrschten, sollte nach GUDJONS auf pädagogischer Ebene eine Entwicklung hin zu Primärerfahrungen und Eigentätigkeit angestrebt werden [Gu08]. Zentral ist vor allem der Aspekt der Selbstbestimmung. Nach DECI & RYAN postuliert die Selbstbestimmungstheorie drei Bedürfnisse des Menschen, die für Motivation relevant sind [DR13]. *Kompetenz* oder *Wirksamkeit* [Wh59], *Autonomie* bzw. *Selbstbestimmung* [De83], sowie *soziale Eingebundenheit* bzw. *soziale Zugehörigkeit* [Ha58]. Die genannten Bedürfnisse zeigen, welche grundlegende Relevanz das Erleben von Kompetenz und Autonomie auf die Motivation von Menschen hat.

Lerntheorien können allgemein in ein *behavioristisches*, ein *kognitivistisches* und ein *konstruktivistisches Verständnis* untergliedert werden. In der neueren Lerntheorie wird im Hinblick auf das digitale Zeitalter die Theorie des *konnektivistischen Verständnisses* ergänzt [Si05a]. Zu den genannten Verständnisarten soll im Folgenden eine kurze Einordnung vorgenommen werden [Ab17; Te11]:

- *Behavioristische Lerntheorie:*

Bei dieser Theorie wird zu Grunde gelegt, dass menschliches Verhalten weniger von internen kognitiven Prozessen, sondern vielmehr von Handlungskonsequenzen beeinflusst wird. Es lassen sich drei Arten von Lernprozessen unterscheiden: klassische Konditionierung, wobei Reize mit Reaktionen verknüpft sind, wirksame Konditionierung, bei der Belohnung und Bestrafung eine lernantreibende Rolle einnehmen, sowie die Modellierung, bei der die Beobachtung anderer eine zentrale Rolle einnimmt [Sk78]. TENBERG versteht Lernen im behavioristischen Sinne als »Einschleifen und Festigen durch Wiederholen« [Te11].

- *Kognitivistische Lerntheorie:*

In kognitivistischer Perspektive stehen Denk- und Problemlösungsprozesse im Vordergrund. Die zugrundeliegende Lerntheorie versucht diese zu erkennen und zu erklären, wobei vor allem die Begriffe Wahrnehmen, Problemlösen, Entscheidungsprozesse, Informationsverarbeitung und Verständnis von zentraler Relevanz sind [Co93]. Lernen versteht sich vor allem unter den Begriffen des »Erarbeitens, Verstehens, Assoziierens, Zuordnens und Transferierens« [Te11].

- *Konstruktivistische Lerntheorie:*

Im Gegensatz zu den zuvor genannten Theorien (zusammenfassend als *objektivistische Lerntheorien* bezeichnet) versteht die konstruktivistische Lerntheorie Lernen weniger als Geistesprozess sondern sondern als erfahrungsbasierten Prozess, in dem die Erfahrungen die Realität bestimmen [Jo91]. Lernen in diesem Verständnis lässt sich durch die begriffe des »Entdeckens, Einordnens, Verknüpfens und Erweiterns beschreiben« [Te11].

- *Konnektivistische Lerntheorie:*

Diese Theorie im Kontext der technologischen Entwicklung und zunehmenden Digitalisierung geprägt. SIEMENS argumentiert, dass die drei zuvor genannten Theorien in diesem Umfeld nicht mehr hinreichend seien. Der Konnektivismus akzentuiert dabei Lernen als Vernetzungsprozess über sogenannte Knoten und Verbindungen. [Si05a; Si05b]

Die verschiedenen Theorien schließen sich nicht gegenseitig aus, sondern ergänzen sich je nach Blick auf den Lernprozess kontextspezifisch [Ab17]. Diesen Umstand systematisiert der Lernzyklus nach PFEIFFER & BALLEW [PB88; TMK16].

Über die letzten Jahrzehnte hat sich die Antwort auf die Frage, ob und vor allem wie produktionsrelevante Kompetenzen vermittelt werden, stetig weiterentwickelt, sodass heute verschiedene Ansätze zur Verfügung stehen [Ab17]. Allgemein kann zwischen *impliziten Lernprozessen*, die arbeitsgebunden während der Arbeit stattfinden, und *expliziten Lernprozessen*, die zwar arbeitsbezogen aber prinzipiell losgelöst vom Arbeitsort stattfinden, unterschieden werden [SSJ98].

Beim *arbeitsbezogenen Lernen* können wiederum drei Formen in Abhängigkeit des Lernortes unterschieden werden [De93; DS17; S SJ98]:

- Das *arbeitsgebundene Lernen*, bei dem der Arbeitsort gleichzeitig der Lernort ist, das Lernen jedoch durch didaktische und organisatorische Maßnahmen kanalisiert wird.
- Das *arbeitsverbundene Lernen*, bei dem die Verbindung zwischen Arbeitsplatz und Lernen bereits gelockert wird, eine räumliche und organisatorische Verbindung jedoch bestehen bleibt.
- Das *arbeitsbasierte Lernen*, bei dem Arbeits- und Lernort räumlich und organisatorisch voneinander getrennt werden und das Lernen in Aus- und Weiterbildungsinstitutionen stattfinden.

Insbesondere beim *arbeitsbasierten Lernen* ist der Anspruch an die Qualität der Lernumgebungen hoch, um effektiv Kompetenzen entwickeln zu können. Im Kontext der gewählten Kompetenzdefinition finden sich nach ERPENBECK UND SAUTER Anforderungen an Lernumgebungen zur bestmöglichen Entwicklung von Kompetenzen. Hierzu werden reale, offene und neuartige Lernsituationen benötigt, welche den Teilnehmer:innen die kreative Lösung von Problemen ermöglichen [ES13]. Eine realitäts- bzw. praxisnahe Umgebung, welche den Teilnehmer:innen authentische Problemstellung zur selbstorganisierten Lösung bietet, ist somit für den Kompetenzerwerb zuträglich [De93; JR99; S SJ98]¹. Wichtig ist weiterhin ein Wechsel zwischen *selbst-* und *fremdgesteuertem Lernen*, der den Lernenden auf der einen Seite eine aktive Rolle im Lernprozess durch eigenes Handeln und auf der anderen Seite die Wissensvermittlung zur Aktivierung der kognitiven Fähigkeiten ermöglicht [Di09; JJS91]. Zu guter Letzt muss Teilnehmer:innen nach neueren Erkenntnissen ein hoher Grad an Autonomie während des Lernens zugestanden werden. Dieser kann sich neben der Reihenfolge der zu lösenden Aufgaben auch auf Zeit und Ort sowie die Hilfestellungen beziehen [Bi00]. Der Autonomieaspekt adressiert vor allem die Selbstregulierung und -steuerung der Teilnehmer:innen im Lernprozess [Ga97].

Der Kompetenzerwerb kann in LLK durch eine Kombination von theoretischer Wissensvermittlung und praktischer Handlungsmöglichkeiten gefördert werden. Hierfür eignen sich drei verschiedene Herangehensweisen, welche für

¹Weitere wissenschaftliche Betrachtungen finden sich hierzu in [BF97; DJ92; FK87].

den späteren Verlauf der vorliegenden Arbeit Aufschluss darüber geben können, in welche Richtung virtuelle LLK ausgerichtet werden können. Eine kurze Beschreibung der Herangehensweisen *Theory-Push*, *Problem-Pull* und *Reflexion-First* [Ha16; Ti16]:

- *Theory-Push*:
Beim sogenannten Theory-Push werden im ersten Schritt die theoretischen Grundlagen im Rahmen eines Vortrags geschaffen. Im Anschluss wird durch die Teilnehmer:innen ein Problemlösungsszenario bearbeitet. Die Ergebnisse werden abschließend in der Gruppe besprochen, um Raum für Feedback und Reflexion zu ermöglichen. Besonders geeignet ist diese Strategie bei wenig oder geringer Vorerfahrung der Teilnehmer:innen.
- *Problem-Pull*:
Hier wird über eine Problemsituation der inhaltliche Ausgangspunkt für das Training geschaffen. Die Teilnehmer:innen müssen das Problem erkennen und können zudem erste Verbesserungsversuche unternehmen. Anschließend folgt eine Systematisierung mittels eines Theorievortrags. Im Anschluss durchlaufen die Teilnehmer:innen erneut eine Problemsituation, welche durch eine Diskussions- und Feedbackrunde in der Gesamtgruppe reflektiert wird. Geeignet ist diese Strategie bei bestehender Problemerkennung der Teilnehmer:innen.
- *Reflexion-First*:
In der Reflexion First Strategie wird auf Basis der Reflexion vorhandener Erfahrungen gestartet und im Anschluss eine der beiden zuvor genannten Strategien durchgeführt. Geeignet ist diese Strategie bei bestehender Problemlösungserfahrung der Teilnehmer:innen.

Für unterschiedliche Teilnehmer:innen können sich je nach bereits vorhandenem Erfahrungsniveau unterschiedliche Strategien anbieten, die Anwendung finden können.

2.2.2 Begriff und Konzept der Lernfabriken

Lernfabriken haben sich in den vergangenen Jahren insbesondere im industriellen Umfeld als Werkzeug zur Kompetenzentwicklung etabliert. Dies ist

auch erkennbar an der Tatsache, dass die wissenschaftliche Betrachtung von Lernfabriken über die Zeit stetig zugenommen hat [AMT18; TM17].

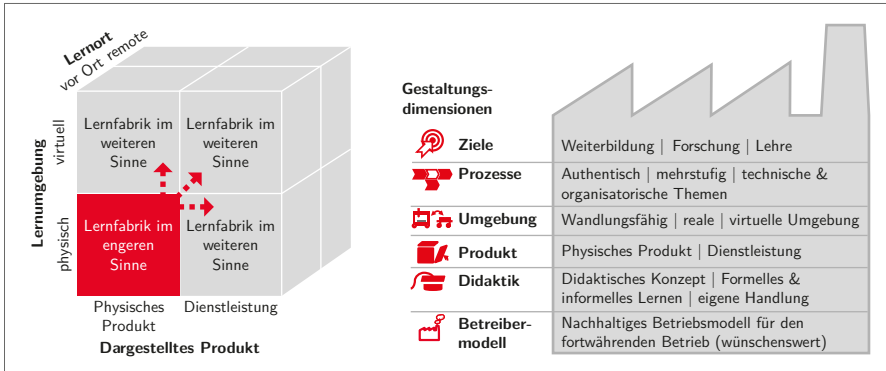


Abbildung 2.6: Ausprägungen und Unterteilungen von Lernfabriken, eigene Darstellung in Anlehnung an ABELE ET AL. und KRESS [Ab15; Kr22].

Zunächst muss eine Definition des Begriffs für den weiteren Verlauf dieser Arbeit vorgenommen werden. Hierzu wird die Definition von ABELE ET AL. aufgegriffen, die Lernfabriken als Umgebungen zur Kompetenzentwicklung verstehen, welche in einer realistischen Fabrikumgebung betriebliche Prozesse abbilden [Ab15].

Lernfabriken können im Rahmen dieser Definition und im Zusammenhang der Erläuterungen des vorherigen Abschnitt 2.2.1 somit in die Konzepte zum *arbeitsbasierten Lernen* eingeordnet werden. Das Lernen findet in einer Umgebung statt, die zwar eine realen Fabrikumgebung mit den dazugehörigen Produktionsprozessen nachbildet, jedoch sowohl räumlich als auch organisatorisch losgelöst vom tatsächlichen Arbeitsplatz der Teilnehmer:innen verortet ist [Ab17].

In der Vergangenheit wurde der Begriff der Lernfabrik sukzessive systematisiert, sodass zwischen *Lernfabriken im engeren Sinne* und *Lernfabriken im weiteren Sinne* unterschieden wird. Im Rahmen dieser Unterscheidung wird in eine Lernfabrik in die Dimensionen Umgebung, Lernort und abgebildetes Produkt eingeordnet. Dementsprechend zeichnen sich Lernfabriken im enge-

ren Sinne durch die Produktion eines physischen Produkts in einer realen Lernumgebung vor Ort aus. Lernfabriken im weiteren Sinne können dagegen auch Dienstleistungen als Produkt abbilden und/oder remote durchgeführte Veranstaltungen anbieten und/oder in einer virtuellen Umgebung abgebildet werden (s. Abbildung 2.6). [Ab15] Neuere Diskussionen in der Lernfabrikforschung lösen diese Einordnung auf und empfehlen Lernfabriken, zunächst im engeren Sinne aufzubauen und anschließend das eigene Konzept auf Basis der individuellen Anforderungen in die verschiedenen Dimensionen weiterzuentwickeln. Hierbei sind auch hybride Lernfabrikkonzepte denkbar, wie sie im späteren Verlauf dieser Forschungsarbeit vorgestellt werden [Ri21b; RM22b; Sc18].

Gestaltungsdimensionen & Morphologie

In Abbildung 2.6 werden Gestaltungsdimensionen dargestellt, welche Lernfabrikkonzepte im engeren und weiteren Sinne weiter konkretisieren. Nach Definition der INTERNATIONAL ASSOCIATION OF LEARNING FACTORIES (IALF) sowie der INTERNATIONAL ACADEMY FOR PRODUCTION ENGINEERING (CIRP) zeichnen sich diese durch die in Tabelle 2.1 dargestellten Gestaltungsfestlegungen aus [LR14].

Tabelle 2.1: Gestaltungsdimensionen von Lernfabriken im engeren Sinne nach IALF und CIRP [LR14].

Dimension	Elemente
Ziele	Training, Weiterbildung und/oder Forschung
Prozesse	authentisch, mehrere Stationen und technische wie auch organisatorische Aspekte
Umgebung	real und veränderbar
Produkt	physisch
Didaktik	konzeptbasiert, formales, non-formelles und informelles Lernen, eigene Handlungen vor Ort

Fortgesetzt auf nächster Seite

Tabelle 2.1 – fortgesetzt von vorheriger Seite

Dimension	Elemente
Betrieb	nachhaltiges Betriebsmodell zum kontinuierlichen Betrieb [Ti15b]

Die bestehenden Gestaltungsdimensionen von Lernfabriken wurden im Rahmen der Weiterentwicklung des morphologischen Modells nach TISCH ET AL. durch KRESS ET AL. durch verschiedene Gestaltungselemente konkretisiert, anhand derer Lernfabriken beschrieben werden können [Kr23; Ti15b; Ti18]. Das gesamte morphologische Modell findet sich im Anhang (Abschnitt A.3.1)².

Lernfabriken können außerdem in einen *Lebenszyklus* unterteilt werden, welcher die Phasen der *Planung, Entwicklung, Aufbau, Vertrieb/Beratung/Verkauf, Nutzung* und *Umgestaltung* einordnen lässt [Ti18].³ Zur weiteren Einordnung und Bewertung von Lernfabriken kann das von ENKE entwickelte Reifegradmodell herangezogen werden [EGM17; En20a].

Potentiale und Limitationen

Das Konzept der Lernfabriken bieten eine Vielzahl an Potentialen, insbesondere im Hinblick auf die in Abschnitt 2.2.1 vorgestellten Anforderungen an Lernprozesse. Demgegenüber stehen jedoch auch diverse Limitationen. TISCH & METTERNICH haben diese Potentiale und Limitationen in der Vergangenheit aufbereitet [TM17]. Auf die Ergebnisse soll im Folgenden eingegangen werden.

Im Hinblick auf die Potentiale lassen sich die Erfolgsfaktoren zur Kompetenzentwicklung mit dem Modell der Lernfabriken verknüpfen. Durch diese direkte Gegenüberstellung wird ersichtlich, dass Lernfabriken alle genannten Erfolgsfaktoren konzeptuell aufgreifen (s. Tabelle 2.2).

²Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit sind nahezu alle Gestaltungsdimensionen direkt oder indirekt relevant.

³Die vorliegende Arbeit adressiert dabei vor allem die Phasen der Entwicklung, des (virtuellen) Aufbaus sowie der (virtuellen) Umgestaltung.

Tabelle 2.2: Gegenüberstellung der Erfolgsfaktoren der Kompetenzentwicklung und der Umsetzung in Lernfabriken nach TISCH & METTERNICH [TM17].

Dimension	Elemente
Kontextualisierung, situierter Kontext [JR99; LW91]	Abbildung einer realen Fabrik
Aktivierung der Teilnehmer:innen [BE91; JJS91]	Generierung und aktive Anwendung des Wissens in der Lernfabrik
Problemlösung [BF97]	Lösen von realen, praxisnahen Problemsituationen in der Lernfabrik
Motivation der Teilnehmer:innen [De91]	Motivation durch den Realitätscharakter und die eigenen Handlungsmöglichkeiten
Kollektivierung [GCR96]	Selbstorganisiertes Lernen in Gruppen
Integration von Denken und Handeln [Ae94]	Wechsel von Praxis- und Theorie- bzw. Systematisierungsphasen
Selbstregulierung [Sc90] und Selbstausrichtung [Ga97]	Fremd- und selbstgesteuerte Lernprozesse werden ermöglicht

Trotz der genannten Potentiale bestehen für das Konzept der Lernfabriken auch Limitationen. Diese stellen für im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit einen zentralen Anknüpfungspunkt für die Einführung von virtuellen LLK dar. TISCH UND METTERNICH identifizieren die folgenden Limitationen für Lernfabriken [TM17]:

- *Ressourcen:*
Lernfabriken sind ein ressourcenintensives Konzept. Dabei ist nicht nur der initiale Aufwand für den Aufbau der Lernfabrik zu berücksichtigen, sondern auch die laufenden Aufwendungen im Betrieb. [AMT18]
- *Abbildungsfähigkeit*
Ein physisches Lernfabrikkonzept bedingt, dass sich unter gegebenen Restriktionen (v. a. finanzielle Ressourcen, verfügbare Fläche etc.) auf die Abbildung zuvor definierter Produkte und Prozess sowie Inhalte

beschränkt werden muss (sog. *platz- und kostenbedingte Abbildungsfähigkeit*). Dementsprechend findet eine Fokussierung auf die ausgewählten Schulungs- und Forschungsinhalte statt (sog. *inhaltliche und objektbezogene Abbildungsfähigkeit*). Weiter sollen die Teilnehmer:innen möglichst direktes Feedback auf ihre Handlungen erhalten. Bei Lernmodulen mit kurzer Dauer führt dies zu sog. zeitbedingten Abbildbarkeits-einschränkungen. Zu guter Letzt führen die in Lernfabriken vorgesehenen ad-hoc Implementierungen von Lösungsansätzen durch die Teilnehmer:innen zu sog. lösungsbezogenen Abbildbarkeitseinschränkungen. [AMT18] Oftmals sind diese Beschränkungen nur unter sehr hohem Aufwand zu verändern. Eine Wandlungsfähigkeit muss zumeist von Beginn an mitgedacht werden [Kr22; Wi07].

- *Skalierbarkeit:*

Insbesondere aufgrund der aktiven Elemente von Lernfabriktrainings ist die Skalierbarkeit meist nur eingeschränkt oder unter Abstrichen bei der Veranstaltungsqualität möglich.

- *Mobilität:*

Auch die Mobilität ist bei Lernfabriken in vielen Fällen nicht gegeben. Das Gebäude als Immobilie wie auch die meist verwendeten nichtbeweglichen Maschinen und Anlagen schränken die Mobilität ein. Neuere Konzepte lösen diese Limitation teilweise auf [Kr19; MRD14].

- *Effektivität:*

Die Effektivität von Lernfabriken kann eingeschränkt sein, wenn Primärziele der Lernfabrik nicht im hinreichenden Maße berücksichtigt werden.

Innerhalb dieser Rahmenbedingungen sind Lernfabriken auf die Anforderungen des jeweiligen Trainingsinhalts zugeschnitten. Zielsetzung ist, dass die Lernfabrik die theoretisch vermittelten Lerninhalte für die Teilnehmer:innen kompetenzorientiert gestaltet. Eine Lernfabrik befindet sich demzufolge stets im Zielkonflikt zwischen Notwendigkeit der Ausstattung und der zu erzielenden Wirtschaftlichkeit. [Ab15; Ab17] Meist stellen Lernfabriken somit vereinfachte Abbildungen von realen Produktionsumgebungen dar, obwohl nach GOERKE, SCHMIDT ET AL. gerade Lernfabriken der schlanken Produktion die gesamte Wertschöpfungskette nach PORTER abbilden sollten. Stattdessen fokussieren sich Lernfabriken in der Regel auf die direkten Herstellungs- und

Montageprozesse. Indirekte Prozesse werden meist nicht abgebildet. [Go15] Aufgrund der Ausrichtung als Trainingsumgebung, die auf die zu erzielenden Verbesserungsmaßnahmen ausgelegt ist, weiß eine Lernfabrik keine gänzlich unbekannte Struktur auf. Welche Verbesserungsmaßnahmen möglich sind und welche nicht, ist in der Regel im Vorfeld definiert. [Ab17] So gesehen kennen Lernfabriken dementsprechend nur zwei Zustände: einen Ausgangszustand, der von den Teilnehmer:innen verbessert werden soll, und einen verbesserten Zielzustand [Ti16].

In diesem Limitationskontext werden von TISCH & METTERNICH erste Ansatzpunkte vorgeschlagen, um den aufgezeigten Limitationen zu begegnen. Folgende Ansätze werden genannt [TM17]:

- Die *Digitalisierung und Virtualisierung* von Lernfabriken hilft, die Ausbildungsfähigkeit zu verbessern. Denkbar sind dabei auch hybride Konzepte, wie sie in der Vergangenheit bereits vorgestellt wurden [GUT17; HČ18; Ri21b; Sc18; SNT21]⁴.
- *Netzerwerkbildung* zu Lernfabriknetzwerken unterstützt dabei, Einschränkungen einzelner Lernfabriken im Verbund zu überwinden. Hierzu existieren bereits Konzepte, die mehrere Lernfabriken synergetisch nutzen [En20b; Sc23; We16].
- *Blended-Learning- und eLearning-Ansätze* können insbesondere in theorielastigen Lerneinheiten die Skalierbarkeit des Konzepts erleichtern [La16].
- Durch *Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT)* können Verbesserungen der räumlichen Flexibilität erreicht werden, wie sie bereits im Rahmen des Konzepts der *Teaching Factory* erprobt werden [Ma13; MGC18; Mo18b; RMC15].
- Der Einsatz *innovativer Medien* kann zudem zur Unterstützung des Lernprozesses eingesetzt werden [TMK16]. Hier ist bspw. die Anwendung von VR-unterstützten Formaten zu nennen.
- *Systematische Gestaltungsansätze* helfen, die genannten Einschränkungen hinreichend zu berücksichtigen und adäquate Lösungen zu entwickeln [Kr22; Ti16; Ti18; Ul19].

⁴Weitere Ansätze in [An16; FS21; GUB17; Ha14; Ju18; KSP21; NW21; Ti14; TMK16; Tv20].

- Die kompetenzorientierte *Messung des Lernerfolgs* unterstützt dabei, die Effektivität von Lernfabriken zu verbessern [Ti15a]. Auf das hierzu anwendbare Kompetenzmessverfahren nach GLASS wurde bereits in Abschnitt 2.1.4 eingegangen [Gl21; GM20].
- Durch *Mini- und Low-Cost-Lernfabriken* können die finanziellen Belastungen gesenkt und zusätzlich die Mobilität des Lernfabrikkonzepts gesteigert werden [Kr19; MRD14].

In dieser Forschungsarbeit wird der primäre Fokus auf die Virtualisierung von Lernfabriken gelegt. Sekundär werden die Aspekte des IKT-Einsatzes sowie der Einsatz innovativer Medien und systematischer Gestaltungsansätze tangiert. Die Messung des Lernerfolgs ist als Werkzeug innerhalb der Methodik und des Evaluationskonzepts eingebunden.

2.2.3 Gestaltungsansätze für Lernfabriken

In diesem Abschnitt soll auf vorhandene Gestaltungsansätze für Lernfabriken eingegangen werden. In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl an Gestaltungsansätzen entwickelt, welche teilweise für die Gestaltung einer oder mehrerer Lernfabriken verwendet wurden [AMT18; Kr22; KWM21]. Der Fokus liegt in diesem Abschnitt vor allem auf dem Gestaltungsansatz nach TISCH, da dieser grundlegend für das Verständnis des weiteren Verlaufs der vorliegenden Arbeit ist. Abgrenzend werden jedoch auch andere Ansätze in kompakter Form dargestellt.

Gestaltungsansatz nach Tisch

Der Gestaltungsansatz nach TISCH basiert auf den Vorarbeiten von ABELE ET AL. [AMT18]. Das Vorgehen teilt den Gestaltungsprozess vertikal in insgesamt drei *Gestaltungsebenen* ein, die vom jeweiligen Betrachtungsrahmen zunehmend ins Detail gehen (s. Abbildung 2.7) [Ti16]:

- die *Makro-Ebene*, auf welcher die Infrastruktur und das Curriculum der gesamten Lernfabrik (inkl. der Produktionsumgebung und grundlegender Gestaltungsparameter des LLK) festgelegt werden.

- die *Meso-Ebene*, auf der einzelne Lehr-Lern-Lern-Module (inkl. Sub-Kompetenzen und Lehr-Lern-Folgen) für das Curriculum definiert werden.
- die *Mikro-Ebene*, in der einzelne Lernsituationen innerhalb der jeweiligen Lehr-Lern-Module beschrieben werden.

In horizontaler Richtung werden die drei Gestaltungsebenen jeweils durch zwei *didaktische Transformationen* unterteilt, anhand derer bestimmte Fragestellungen im Hinblick auf die Ausrichtung des LLK beantwortet werden [Ti16; Ti18]:

- Innerhalb der *ersten didaktischen Transformation* wird definiert, welches die relevanten Inhalte, Schwerpunkte und Lernziele für die Zielgruppe sind. Hierzu werden neben den organisationalen Rahmenbedingungen und Zielen auch die Zielgruppen betrachtet. Aus diesen Betrachtungen werden die intendierten Kompetenzen abgeleitet.
- Die *zweite didaktische Transformation* adressiert die Fragestellung, wie diese Lernziele und Lerninhalte in der Lernfabrik umgesetzt werden können.

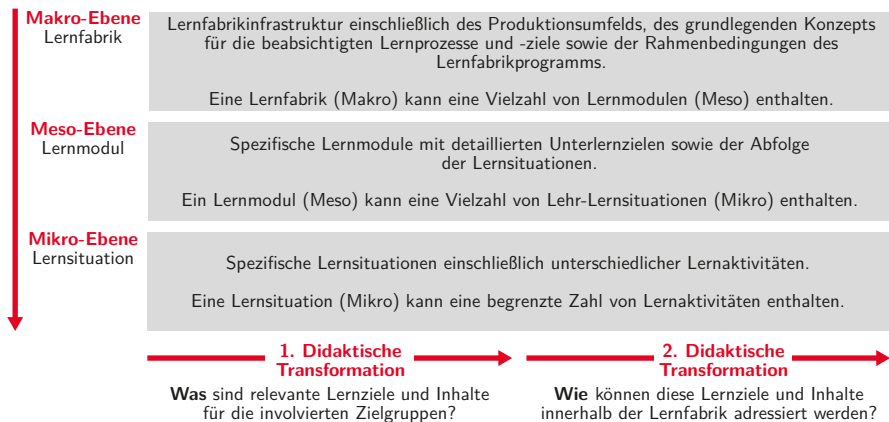


Abbildung 2.7: Ebenen-Modell zur Gestaltung von Lernfabriken nach TISCH [Ti16].

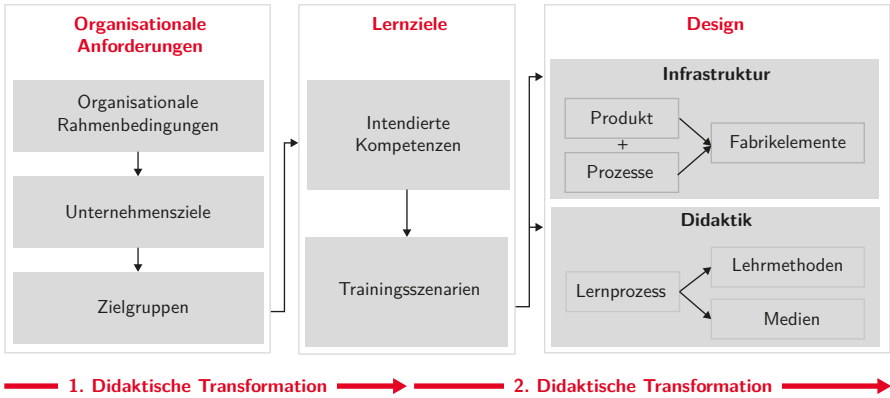


Abbildung 2.8: Vorgehen zur kompetenzorientierten Gestaltung von Lernfabriken nach TISCH und KRESS [Kr22; Ti18].

Die beiden didaktischen Transformationen sind in Abbildung 2.7 sowie Abbildung 2.8 dargestellt. Der Ansatz nach TISCH wurde in den vergangenen Jahren am häufigsten verwendet sowie immer wieder weiterentwickelt und erweitert [KWM21].⁵

Weitere Gestaltungsansätze

Die Vorstellung der weiteren Gestaltungsansätze basiert im Wesentlichen auf den Gestaltungsansatzübersichten von KRESS und ABELE ET AL. [AMT18; Kr22; KWM21]. Neben dem Gestaltungsansatz nach TISCH wurden u. a. die Gestaltungsansätze nach WAGNER ET AL. und KÜSTERS in mehr als einem Anwendungsfall zum Aufbau einer Lernfabrik angewendet. Für die verbleibenden Ansätze findet sich in der Literatur bis zum Jahre 2021 kein Hinweis auf weitere Anwendungen abgesehen von der Anwendung durch die Autoren selbst [KWM21].

- KÜSTERS fokussiert sich im vorgestellten Ansatz auf Lernfabriken zur digitalen Transformation. Der Ansatz referenziert umfangreich auf den

⁵Relevante Anwendungen und Erweiterungen des Ansatzes bis zum Jahre 2022 finden sich basierend auf KRESS [Kr22] in folgenden Publikationen: [Ab16; AFS17; AKR19; En20b; GPP16; Kr19; Kü18; La15; LFZ20; Mä19; Me18a; Og17; Pe19; Ri20b; Ri21a; Ri21b; Ri21c; RM22b; SHR20; SSK20; We20; We21; WHR19].

zuvor beschriebenen Ansatz nach TISCH und besteht aus insgesamt fünf Schritten. Nach einer Beschreibung der Ziele und des Umfangs folgt im zweiten Schritt die Ableitung der Schulungsinhalte und des Curriculums. Im dritten Schritt wird die Infrastruktur der Lernfabrik geplant. In den beiden letzten Schritten werden der Standort ausgewählt und das Gebäude detailliert sowie die Organisationsstruktur und Wirtschaftlichkeit betrachtet. [Kü18]

- WAGNER ET AL. beschreiben einen Produktgestaltungsansatz für Lernfabriken mit dem Schwerpunkt auf dem Themenkomplex der Wandlungsfähigkeit. Auch dieser Gestaltungsansatz besteht aus fünf Schritten. Zu Beginn werden auch die Ziele und das technische System der Lernfabrik untersucht. Im zweiten Schritt werden Anforderungen an das zu entwickelnde System definiert. Passend zu diesen Anforderungen werden im dritten Schritt realisierbare Produkte ermittelt sowie im vierten Schritt bewertet und ausgewählt. Im letzten Schritt wird der dazugehörige technische Prozess geplant. [Wa15]
- REINER fundiert seinen Ansatz auf Basis didaktischer Prinzipien und bereitet damit die Basis für die später folgenden Gestaltungsansätze. Ein strukturiertes Vorgehen wird von REINER jedoch nicht vorgeschlagen. [Re09]
- RIFFELMACHER fokussiert ähnlich wie WAGNER ET AL. die Wandlungsfähigkeit und schlägt ein Vorgehen zur Planung von Montagesystemen für Lernfabriken vor. Als einer der wenigen Ansätze betrachtet dieser rudimentär die Gestaltung einer digitalen beziehungsweise virtuellen Lernumgebung. [Ri13]
- DOCH ET AL. beschreiben mit ihrem dreischrittigen Vorgehen die Gestaltung von Lernmodulen für Lernfabriken. Dabei wird im ersten Schritt eine Bedarfsanalyse durchgeführt, im zweiten Schritt die Konzeption erstellt und zuletzt die Ausgestaltung und Umsetzung vorgenommen. [Do15]
- PLORIN schlägt ein Gestaltungsmodell bestehend aus acht Phasen mit Schwerpunkt auf der Analyse der Ausgangssituation und zielgruppenorientierten Gestaltung sowie Beschreibung des zu entwickelnden Lernmoduls vor. [P116]

- BAENA ET AL. beschreiben in ihrem vierschrittigen Vorgehen die Auswahl von Produkt und Wertschöpfungskette sowie den Einsatz von IKT sowie die Integration des Industrie-4.0-Ansatzes. [Ba17]
- KARRE ET AL. stellen einen Gestaltungsansatz bestehend aus fünf Schritten vor, um bestehende Lernfabriken um Elemente der Industrie 4.0 zu erweitern. [Ka17]
- SADAJ ET AL. postulieren einen dreiphasigen Ansatz, der Lernfabriken im weiteren Sinne in den Fokus der Betrachtung rückt. [SHR20]
- TISCHANDL ET AL. beschreiben in vier Schritten die Analyse, Konzeptionierung, Validierung und das Design im Kontext von digitaler Transformation und Industrie 4.0 in Lernfabriken. [TMS20]
- GLASS beschreibt in seiner Methodik einen Vorgehen zur Überarbeitung von (Lernfabrik-)Schulungen auf Basis der Ergebnisse eines selbst entwickelten Kompetenzmessverfahrens. Das Verfahren baut in wesentlichen Elementen auf dem Vorgehen nach TISCH auf. [Gl21]
- KRESS beschreibt in seinem Vorgehen die Konfiguration der Lernfabrikinfrastruktur auf Basis eines Optimierungsmodells. der Gestaltungsansatz besteht aus insgesamt vier Schritten bestehend aus der Anforderungsermittlung, der Ermittlung von Konfigurationsalternativen, der Bewertung der derselben sowie der Optimierung und Analyse. Dieser baut auf dem Gestaltungsansatz nach TISCH auf. [Kr19; Kr22; Ti18]
- THIEDE ET AL. beschreiben einen Gestaltungsansatz für hybride multi-user Lernerfahrungen zur Ergänzung physischer Lernfabriken durch interaktive 3D-Umgebungen. Der dargestellte Ansatz adressiert jedoch vor allem den Aspekt der technischen Implementierung im Hinblick auf IT-Komponenten und didaktische Integrationsformen. [Th22]

Bewertung der Gestaltungsansätze

Die vorgestellten Gestaltungsansätze adressieren in Summe eine Vielzahl an Fragestellungen und Aspekten der Lernfabrikgestaltung. Dabei beschreiben einige Ansätze die Gestaltung von Lernfabriken für die schlanke Produktion [Do15; Ka17; Kr22; Re09; Ti18]. Nur wenige Ansätze beinhalten die kompetenzorientierte Gestaltung von Lernfabriken, wie sie im Ansatz nach TISCH im Fokus der Betrachtung steht [Kr22; Ti18]. Vorallem jüngere Gestaltungs-

ansätze betrachten die Einbindung von Industrie-4.0-Ansätzen sowie die Verwendung von IKT an geeigneten Stellen im Konzept. Obwohl VR im weiteren Verständnis zu den IKT gezählt werden kann, fokussiert lediglich einer der Ansätze die Verwendung dieser Technologie. Dieser adressiert jedoch primär die technische Integration. Die weiteren verfügbaren Ansätze beschreiben vornehmlich die Gestaltung von physischen, wenn auch digitalisierten, Lernfabriken. Bis dato existiert somit kein Ansatz, der die Gestaltung und Implementierung von virtuellen LLK für Lernfabriken hinreichend beschreibt.

2.2.4 Digitalisierung und Virtualisierung in Lernfabriken

Obwohl im vorhergehenden Abschnitt 2.2.3 festgestellt werden konnte, dass bisher keine geeigneten Ansätze zur Gestaltung und Implementierung von virtuellen LLK für Lernfabriken existieren, können Digitalisierungs- und Virtualisierungsmaßnahmen einen hohen Mehrwert in Lernfabriken generieren. Dementsprechend existieren hierzu in diversen Lernfabriken bereits Anwendungsfälle. Hiermit ist jedoch nicht zwingend die Verwendung von AR- oder VR-Systemen verbunden. Auch die Verwendung von Projektionstechnologien oder ähnlichem kann Lernfabrikkonzepte in dieser Hinsicht anwendungsbezogen sinnvoll ergänzen [Bü20]. Zunächst soll in diesem Kapitel eine Unterscheidung der verschiedenen Begriffe stattfinden, im Anschluss wird auf exemplarische Anwendungsfälle eingegangen.

Begriffe der Digitalisierung und Virtualisierung in Lernfabriken

Lernfabriken können in unterschiedlichen Arten und Weisen digitalisiert beziehungsweise virtualisiert werden. Denkbar sind Konzepte von der rein physischen Lernfabrik über hybride Lernfabriken, die sowohl virtuelle als auch physische Elemente in unterschiedlichem Umfang nutzen, bis hin zu rein virtuellen Lernfabrikkonzepten. Dabei ist in Anlehnung an das *Virtuality Continuum* nach MILGRAM & KISHINO ein vergleichbarer Gradient für den Kontext der virtualisierten Lernfabriken denkbar, der dabei unterstützt, den Grad der Virtualisierung individuell und konzeptbezogen zu bestimmen (s. Abbildung 2.9) [Ju18; MK94].

Eine ähnliche Unterscheidung findet sich bereits in ABELE ET AL., wo zwischen den Begriffen der *physischen*, *digitalen*, *hybriden* sowie *virtuellen Lern-*

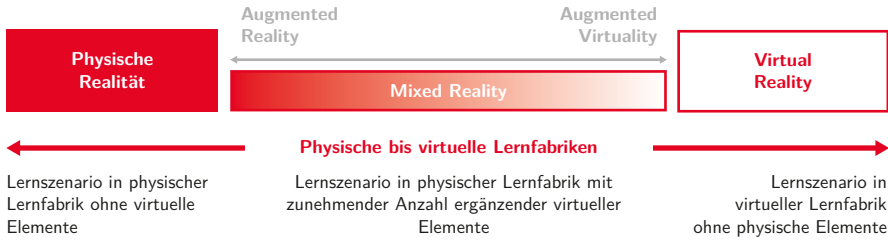


Abbildung 2.9: Lernfabrikvirtualisierungsgradient nach JURASCHEK ET AL. basierend auf MILGRAM & KISHINO [Ju18; MK94].

fabriken unterschieden wird (s. Abbildung 2.10) [Ab17]. Dieses Konzept beinhaltet jedoch auch andere Digitalisierungslösungen und fokussiert sich nicht rein auf den Einsatz von Virtual und Augmented Reality. Führt man die beiden genannten Systematisierungsansätze zusammen, so lässt sich eine annähernd belastbare Abgrenzung treffen, die auch für den weiteren Verlauf dieser Arbeit anwendbar ist. Diese soll, ausgehend von den Begriffen nach ABELE ET AL. im folgenden erläutert und abgegrenzt werden [Ab17]:

- *Physische Lernfabriken*

Unterscheiden lassen sich bei den physischen Lernfabriken rein physische Lernfabriken, in denen die Teilnehmer:innen sowohl Planung als auch Ausführung der Handlung physisch durchführen, und Ansätze mit ersten Digitalisierungsinhalten, in denen digitale Daten und Werkzeuge im Planungsprozess verwendet werden [Ab17]. Im Rahmen des Gradienten wird bei physischen Lernfabriken von Lernfabriken gesprochen, die gänzlich ohne virtuelle Elemente auskommen [Ju18].

- *Digitale Lernfabriken*

In diesem Konzept interagieren die Teilnehmer:innen mit digitalen Daten für Planungsprozesse [Ab17]. Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit kann dieses Konzept vernachlässigt werden.

- *Hybride Lernfabriken*

In diesem Konzept werden physische Lernfabriken durch virtuelle Repräsentationen basierend auf digitalen Datensätzen erweitert [Ab17]. Im Rahmen des Gradienten werden unter hybriden oder Mixed-Reality-Lernfabriken solche verstanden, bei denen ein Lernszenario in einer phy-

sischen Lernfabrik durch zunehmende Anzahl virtueller Elemente unterstützt wird [Ju18]. Fasst man das Verständnis der hybriden Lernfabriken weiter, so kann, in Anlehnung an die Definition der Lernfabriken im engeren und weiteren Sinne, auch in den Dimensionen des Lernortes und/oder des dargestellten Produkts ein hybrides Lernfabrikkonzept entwickelt werden.

- *Virtuelle Lernfabrik*

In virtuellen Lernfabriken findet die Planung und Handlung im virtuellen Raum statt [Ab17]. Im Kontext des Gradienten lassen sich hier insbesondere Lernfabriken verstehen, welche gänzlich virtuell gestaltet sind und ohne physische Elemente auskommen [Ju18].

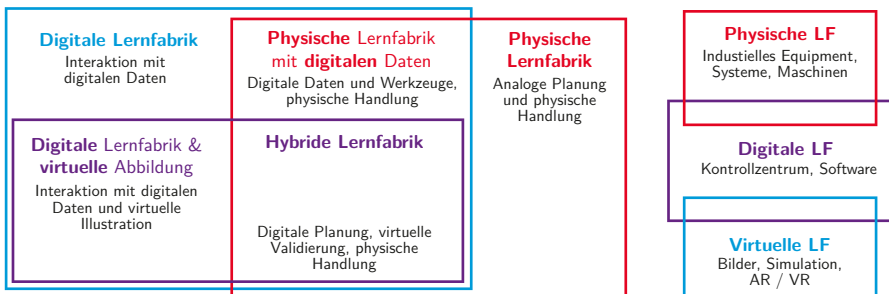


Abbildung 2.10: Unterscheidung zwischen physischen, digitalen, hybriden und virtuellen Lernfabriken nach ABELE ET AL. [Ab17].

Im Kern dieser Arbeit soll der Fokus primär auf *hybriden* und *virtuellen Lernfabriken* liegen. In Abgrenzung zu diesen beiden Konzepten ist auch der Begriff der *physischen Lernfabrik* relevant.

Exemplarische Anwendungsfälle im Bereich der Lernfabrikvirtualisierung

Die Intensität der Anwendung von VR im Verständnis dieser Arbeit ist in Lernfabriken bislang vergleichsweise gering. Eine Vielzahl an Lernfabriken experimentieren mit Systemen basierend auf Augmented- oder Mixed-Reality-Systemen. Ein kurzer Überblick über allgemeinen Virtualisierungsansätze, der die Vielfalt der Ansätze aufzeigen kann, soll im Folgenden gegeben werden:

- Die Lernfabrik der **Technischen Universität Braunschweig** wurde durch insgesamt drei Augmented-Reality-Anwendungen erweitert, welche dabei unterstützen, die Energie- und Ressourcenverbräuche einzelner Produktionsprozesse besser darstellen zu können. [SD21] Der erste Anwendungsfall bildet den Lackierprozess für ein reales Produkt innerhalb einer maßstabsgetreuen Produktionsanlage virtuell ab. Hierzu werden insgesamt drei Prozessschritte visualisiert: *Grundieren*, *Färben* und *Klarlackieren*. Der virtuelle Lackiervorgang, welcher mittels Projektionstechnik auf die Oberfläche des Produkts projiziert wird, kann durch die Anzeige des Energieverbrauchs und des Lackvolumens ergänzt werden. [Bü20]

Der zweite Anwendungsfall beinhaltet eine augmented-reality-basierte Visualisierung prozessbezogener Energiebedarfe und Informationen. Die Informationen werden mittels Augmented-Reality-Brille ins Sichtfeld der Anwender:innen projiziert. Neben Energiedaten können so auch Informationen zu Prozesszuständen sowie zu Bedienung und Wartung eingeblendet werden. [Ju18]

- Auch die Lernfabrik der **Technischen Universität Graz** verwendet eine Augmented-Reality-Anwendung zur Darstellung von Prozessdaten. In diesem Anwendungsfall werden u. a. Maschinendaten⁶ sowie Bedienungs- und Produktinformationen mittels Augmented-Reality-Brille ins Sichtfeld der Anwender:innen projiziert. [Ed20]
- Die **Universität Bremen** betreibt im Rahmen der Experimental Modular Assembly Plant eine dezentralisierte Lernfabrik. In diesem Zuge wird ein Mixed-Reality-Konzept eingesetzt, in dem der Fokus auf dem Einsatz kollaborativer Roboter liegt. Anwender:innen werden in der Mixed-Reality-Umgebungen mehrere Optimierungsszenarien geboten. Zudem erhalten die Anwender:innen Zugang zu arbeitssicherheitskritischen Bereichen. [Si20; SNT21]
- Eine vergleichende Anwendung zwischen Augmented Reality und papierbasierter Montageassistenz wurde in der Lernfabrik der **Universität du Luxembourg** implementiert und erprobt. Die Augmented-Reality-Umgebung wird hier in einem Montagetraining eingesetzt. [Ko22; KSP21]

⁶z. B. Maschinenzustand, Produktionsstatus, Temperaturverläufe

- Ein Anwendungsfall der **FH Oberösterreich** beschreibt die Nutzung von VR im Bereich des Montagetrainings zum Einsatz in der Industrie und in Lernfabriken. Die Umgebung ist explizit auf das Training von Montageprozessen für komplexe Produkte ausgelegt und wird anhand der Montage eines Motorblocks illustriert. [NW21]
- An der **FH Bochum** wird ein Anwendungsfall zur Erweiterung der physischen Lernfabrik durch virtuelle Maschinen und Prozesse beschrieben. Die Lernfabrik kann so um Ausstattung und Inhalte erweitert werden, die im physischen Raum nicht zur Verfügung steht. [FS21]
- An der **Universität Potsdam** wird vom Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, Prozesse und Systeme eine Lernfabrik zum Themenkomplex Industrie 4.0 betrieben. Einzelne Prozesse werden über sogenannte Cubes abgebildet. Dies sind mit Bildschirmen versehene Würfel, auf denen verschiedene verschiedene Produkte und Prozesse angezeigt werden können. Die verwendeten Cubes können sowohl stationär als auch mobil eingesetzt werden. [Le23]
- Am **Singapur Institut für Fertigungstechnik**⁷ wird ein virtuelles Abbild der physischen Lernfabrik Modelfactory@SIMtech angeboten. Hierzu wurde eine bestehende VR-Tour um irrelevanten Informationen bereinigt und durch Gamification-Elemente ergänzt. [Ta22]

Die betrachteten Anwendungsfälle zeigen, dass in Lernfabriken bereits eine Vielzahl an Digitalisierungs- sowie Virtualisierungslösungen eingesetzt und erprobt werden. In der weltweiten Betrachtung setzten vor allem europäische Lernfabriken AR als Visualisierungs- und Unterstützungssystem ein. Eine Verwendung von ganzheitlichen virtuellen oder hybriden LLK findet, bis auf erste Ansätze an der FH Oberösterreich, nicht statt. Dies unterstreicht den notwendigen wissenschaftlichen Betrachtungsbedarf.

2.3 Virtual Reality

In diesem Abschnitt werden die relevanten Grundlagen im Kontext von *Virtual Reality* (VR) dargestellt. Der Begriff ordnet sich in das übergeordnete Konzept der *Extended Reality* (XR) ein, zu dem auch die Konzepte der *Aug-*

⁷Singapore Institute of Manufacturing Technology

mented Reality (AR), *Augmented Virtuality* (AV) und *Mixed Reality* (MR) gehören. Die verschiedenen Begriffe werden im Folgenden voneinander abgegrenzt und definiert. Im Anschluss wird auf den Begriff der VR im Detail eingegangen, da dieser maßgeblich für die weiteren Ausführungen dieser Forschungsarbeit ist.

2.3.1 Abgrenzung des Begriffs

Die eingangs erwähnten Konzepte lassen sich anhand ihres Virtualisierungsgrades entlang des sogenannten *Virtualitätskontinuum* nach MILGRAM & KISHINO einordnen (s. Abbildung 2.11) [MK94].

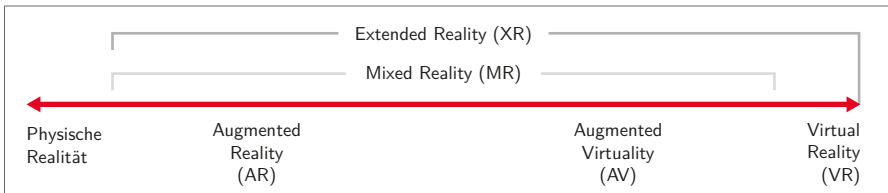


Abbildung 2.11: Virtualitätskontinuum, eigene Darstellung in Anlehnung an MILGRAM & KISHINO (1994) und WOHLGENANT ET AL. [MK94; WSS20].

Zum Verständnis der genannten Begriffe werden diese in ihrer übergeordneten Bedeutung nachfolgend jeweils kurz erläutert [Dö13; MK94]:

- *Physische Realität*
Rein physische Welt, wie sie vom Menschen wahrgenommen wird. Keine Ergänzung einzelner Aspekte oder gar gänzliche Ersetzung durch virtuelle Elemente.
- *Augmented Reality*
Kombination von physischer und virtueller Realität, welche eine Darstellung und Interaktionsfähigkeit in Echtzeit bereitstellt. Bei höheren Anteilen von realen Elementen wird von Augmented Reality gesprochen. [Dö13]

- *Augmented Virtuality*
Wie zuvor. Bei höheren Anteilen virtueller Elemente wird von Augmented Virtuality gesprochen. [Dö13]
- *Virtual Reality*
Rein virtuelle Welt. Keine Ergänzung bzw. Überlagerung durch Elemente der physischen Umgebung. Für dieses Konzept ist insbesondere der Aspekt der Immersion von Bedeutung, der im weiteren Verlauf dieser Arbeit beschrieben wird.
- *Mixed Reality*
Kontinuum welches sich zwischen physischer und virtueller Realität erstreckt, wobei der Realitätsanteil hin zur VR zunehmend abnimmt und die Virtualität sukzessive zunimmt. [Dö13] Die unter diesem Begriff verstandenen Realitäten sind jedoch weder gänzlich physisch noch gänzlich virtuell. [WSS20]
- *Extended Reality*
Ergänzend zum MR Begriff schließt der Begriff der Extended Reality auch gänzlich virtuelle Welten mit ein. [WSS20]

Wird der VR-Begriff im Detail betrachtet, lässt sich feststellen, dass sich VR zunächst dadurch auszeichnet, dass die Anwender:innen weitgehend von der physischen Welt abgeschirmt werden und eine rein virtuelle Welt, ohne Überlagerung mit realen Elementen wahrnehmen. Abgesehen von diesem vergleichsweise weit gefassten Verständnis existiert bis dato jedoch keine einheitliche Definition von VR im wissenschaftlichen Kontext [Dö13; WSS20]. Die folgenden Definitionen finden sich in der Literatur [WSS20]:

- VR als reale oder simulierte Umgebung in der die Anwender:innen Telepresenz erfahren [St92].
- VR verstanden als Technologien, die es den Anwender:innen ermöglichen, Welten jenseits der physischen Realität immersiv zu erleben [BV17].
- VR als computer-generierte digitale Umgebung, mit der interagiert werden kann, als wäre sie real [Je15].

In der vorliegenden Arbeit soll *VR* zusammenfassend als computergenerierte, echtzeitfähige Umgebung verstanden werden, welche unter Einsatz von

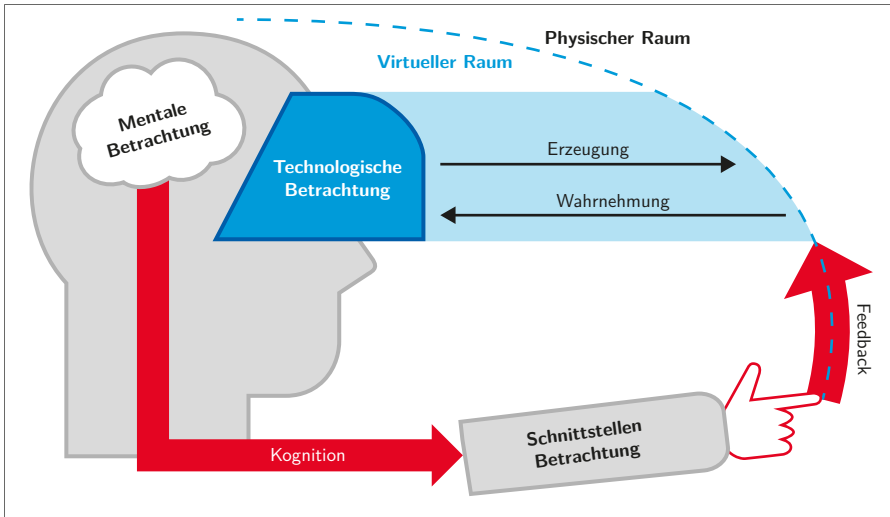


Abbildung 2.12: Kognitionszyklus der Virtual Reality basierend auf DÖRNER, BROLL ET AL. [Dö13; Kr20b].

Anzeige- und Interaktionsgeräten zugänglich gemacht wird [Br96b]. VR nutzt immersive Technologien, um interaktive virtuelle Umgebungen oder virtuelle Welten zu simulieren, in welche sich die Anwender:innen subjektiv einbezogen und in denen sie sich körperlich anwesend fühlen [WSS20].

Es lassen sich allerdings nach DÖRNER, BROLL ET AL. verschiedene Betrachtungswinkel einnehmen, die eine Charakterisierung beziehungsweise Differenzierung gegenüber herkömmlichen Mensch-Maschine-Schnittstellen erlauben. Diese sind in Abbildung 2.12 zusammenfassend dargestellt und sollen im Folgenden beschrieben werden [Dö13]:

- *Technologische Betrachtung:*

Aus technologischer Perspektive kann VR als eine Simulation von Umgebungen verstanden werden, die durch die Benutzung von geeigneten Endgeräten einen realitätsnahen und dreidimensionalen (3D) Eindruck sowie die Interaktion mit der dargestellten Umgebung ermöglicht. Die Umgebung besteht dabei aus computergenerierten Grafiken, die auf die Bewegungen der Anwender:innen reagieren. Die Technologie dient als

Werkzeug zur Raum- bzw. Illusionserzeugung und beeinflusst damit maßgeblich die Wahrnehmung. [Br96b; St92]

- *Mentale Betrachtung:*

Eine rein technologieorientierte Betrachtung ist aufgrund der Wahrnehmungsweise des Menschen nicht hinreichend. Letztendlich steht das individuelle Erleben der virtuellen Welt im Vordergrund. So muss die *wahrgenommene Umgebung* nicht der *physischen Umgebung* entsprechen. Die physische Umgebung wird über die menschlichen Sinnesorgane in ein durch das Bewusstsein erfassbares Bild übersetzt. Die Wahrnehmung der physischen Umgebung kann bedingt durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren verzerrt werden und somit von der mental erzeugten Umgebung abweichen. [Gi66] Je nach Qualität der Illusion kann somit ab einem gewissen Grad von den Anwender:innen nicht mehr zwischen Realität und Illusion unterschieden werden [St92]. Die Anwender:innen machen dann die Erfahrung an einem anderen Ort zu sein. [RKW95] Dieser Umstand führt auf die Begriffe der *Immersion* und der *Präsenz*⁸ [HD92; Sh92]. Erstere kann wiederum in *technische* und *mentale Immersion* unterschieden werden [SW97; WS98]. Das Gefühl der Immersion ist dabei nicht zwingend mit VR als Medium verknüpft: im Lauf der Zeit steigert sich die Immersionsfähigkeit der von Menschen verwendeten Medien. Begonnen mit Texten, wird durch das Radio die Komponente der Stimme ergänzt. Fernsehen und anderen visuelle Medien ergänzen visuelle Informationen, sogenannte 4D-Kinos erweitern die Erfahrung durch haptische Eindrücke. VR ist in dieser Entwicklung der nächste logische Schritt [Sc22]. Das Gefühl der Präsenz wird wiederum bedingt durch Immersion. Ein hoher Grad an Immersion führt zu einem Gefühl der Präsenz. Die beiden Konzepte lassen sich durch die Konzepte der *Ortsillusion*, der *Plausibilitätsillusion* und der *Involviertheit* weiter detaillieren (s. Tabelle 2.3) [Dö13; SW97].

⁸Das Gefühl der Präsenz liegt bspw. dann vor, wenn Anwender:innen auf die virtuelle Umgebung so reagieren, als ob es sich um eine reale Umgebung handelt [Dö13].

Tabelle 2.3: Präsenzaspekte nach DÖRNER, BROLL, ET AL. [Dö13].

Ortsillusion	Plausibilitätsillusion	Involviertheit
Der Körper und seine Bewegungen werden als im virtuellen Raum existent empfunden [S109].	Ereignisse und Zustände im virtuellen Raum werden als plausibel empfunden [S109].	Grad der Aufmerksamkeit und des Interesses der realen Anwender:innen an der virtuellen Welt [WS98].

- *Schnittstellenbetrachtung*

Im Rahmen der Schnittstellenbetrachtung steht die Darstellung von Informationen für die Anwender:innen im Fokus. Bei klassischen Personal Computern geschieht dies heute über WIMP⁹-basierte Bedienungskonzepte [Hi07]. Die Interaktion in VR stellt im Vergleich einen Paradigmenwechsel dar. Hier wird mittels Körpergesten und Bewegungen im Raum interagiert. Ein Definitionscharakter für VR ist in diesem Zusammenhang nach BRICKEN der Begriff der *Inklusion*, im Verständnis, dass VR die Anwender:innen innerhalb der Information platziert [Br90; RN95].

2.3.2 Virtual Reality als Hardwaresystem

Für ein ganzheitliches Verständnis von VR muss weitergehend eine Abgrenzung hinsichtlich des Hardwaresystems vorgenommen werden. Hierbei wird auf gängige Begriffe sowie technische Grundlagen eingegangen. Sogenannte CAVE-Systeme¹⁰ nicht Bestandteil dieser Arbeit. Auch smartphonebasierte Systeme sollen nicht im Detail erläutert werden, da diese lediglich für die Betrachtung von 360°-Bildern oder Videos verwendet werden können. Eine Interaktion ist nicht möglich.

Grundsätzlich wird in der Literatur zwischen *Eingabegeräten* und *Ausgabegeräten* unterschieden [Dö13]. KIND, FERDINAND ET AL. führen auch die

⁹WIMP steht für Windows, Icons, Menus, Pointer. Ein durch Microsoft geprägter und verbreiteter GUI-Stil [Hi07].

¹⁰Als CAVE-System werden Räume bzw. Würfel bezeichnet, in denen die Anwender:innen stehen und deren Seiten aus Displays (meist Rückprojektionen) bestehen [Cr92; Dö13].

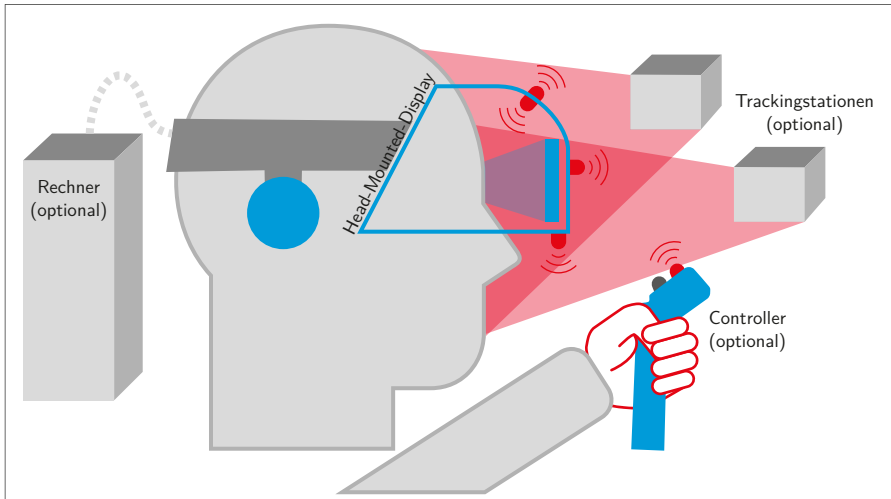


Abbildung 2.13: Hauptkomponenten von HMD-basierten VR-Systemen, eigene Darstellung basierend auf [RKM22].

technischen Komponenten der *Verarbeitung*¹¹ und *Verbreitung*¹² ein [Ki19]. Diese letztgenannten Komponenten sollen wegen ihres für die vorliegenden Arbeit nicht direkt relevanten Charakters nicht betrachtet werden.

Die zentralen Bestandteile des Systems sind, wie in Abbildung 2.13 dargestellt, das *visuelle Anzeigesystem*, das *Trackingsystem* sowie der *Controller*. Aufgrund des modularen Aufbaus vieler Systeme sind, je nach technischer Lösung, einige Systembestandteile optional. Dabei haben bestimmte Komponenten sowohl eine Ein- als auch Ausgabefunktion.¹³ Auf die einzelnen Bestandteile soll im Folgenden eingegangen werden.

Visuelle Anzeigesystem

Das *Head-Mounted Display* (HMD) stellt einen zentralen und obligatorischen Systembestandteil dar, der zur Darstellung der virtuellen Umgebung und so-

¹¹Verarbeitungssysteme sind z. B. Game-Engines zur Entwicklung der virtuellen Umgebungen.

¹²Verbreitungssysteme sind z. B. Distributionssoftware und -plattformen.

¹³Z. B. besitzt der Controller neben der Eingabefunktion auch die Funktion eines Ausgabegerätes.

mit zur Herstellung der Immersion zwingend benötigt wird [SS14]. Das HMD bildet die Schnittstelle zwischen Recheneinheit, Eingabe- und Ausgabegeräten. Es lässt sich über die Aspekte der *Systemklasse* und *Anzeigetechnologie* charakterisieren.

- *Systemklasse:*

HMD können in *rechnergebundene*¹⁴ und *eigenständige Systeme*¹⁵ unterschieden werden [Dö13; Ki19]. *Rechnergebundene Systeme* sind über ein Verbindungskabel mit einem externen Rechner (z. B. Desktopcomputer oder Notebook) verbunden. Sowohl die Stromversorgung als auch die Rechenleistung wird über den verbundenen Rechner bereitgestellt. [Dö13; Ki19] Für verschiedene Modelle sind sogenannte Wireless-Adapter verfügbar.¹⁶ Die Verbindung zum Rechner wird hier durch eine Funkverbindung hergestellt, die Stromversorgung des HMD wird über einen Akku gewährleistet. *Eigenständige Systeme* sind ohne externe Recheneinheit einsetzbar. Die Recheneinheit ist als *System on a Chip* (SOC)¹⁷ in das HMD integriert. Neuere eigenständige Systeme¹⁸ bieten einen zusätzlichen Modus an, um für leistungsintensive Anwendungen die Berechnungen auf eine angeschlossenen stationäre Recheneinheit auslagern zu können. [Dö13; Ki19]

- *Anzeigetechnologie:*

Für die Bildausgabe ist neben der Bildwiederholfrequenz auch die Auflösung und Farbtiefe von Bedeutung für die Immersion. Moderne HMD verwenden hochauflösende *LCD*-¹⁹, *OLED*-²⁰ oder *AMOLED-Displays*²¹. Die über das HMD ausgegebenen Bilder müssen im korrekten Abstand zueinander und gewölbt in das Auge projiziert werden, um eine stereoskopischen²² Wahrnehmung zu ermöglichen. Hierzu ist ein Linsensystem zwischen Augen und Displaypanel verbaut. Der Augenabstand bei

¹⁴engl. Fachbegriff: Tethered Systeme

¹⁵engl. Fachbegriff: Standalone Systeme

¹⁶HTC bietet für die Vive Pro Serie einen Wireless-Adapter an.

¹⁷Integration aller oder eines Teils der Funktionen eines Systems auf einen Chip [Ri11]

¹⁸z. B. Oculus Quest 2

¹⁹LCD: Liquid Crystal Display

²⁰OLED: Organic Light Emitting Diode

²¹AMOLED: Active Matrix Organic Light Emitting Diode

²²Der Begriff der Stereoskopie beschreibt Verfahren zur Aufnahme und Wiedergabe von raumgetreuen Bildern [Du23].

Menschen variiert, sollte die Linsenanordnung des HMD veränderbar sein [Do04]. Je nach Modell werden stufenlos verstellbare, nur in Stufen verstellbare und nicht verstellbare Linsensysteme angeboten. Bei verschiedenen Modellen ist auch der Linsenabstand zum Auge veränderbar und somit das Tragen einer Brille möglich.

Für ein immersives Erlebnis sollte das vom HMD abgedeckte Sichtfeld²³ möglichst dem natürlichen Sichtfeld der Anwender:innen entsprechen. Dieses beträgt bei Erwachsenen vertikal zwischen 120 und 150 Grad und horizontal circa 214 Grad [St20]. Gerade bei der horizontalen Abdeckung ergeben sich nach wie vor Unterschiede zwischen den angebotenen Modellen.

Aktustische Ausgabesysteme

Das Ziel akustischer Ausgabesysteme besteht darin, die auditiven Reize der virtuellen Umgebung möglichst realistisch wiederzugeben. Dies unterstützt die Immersion, aber auch die Orientierung der Anwender:innen im virtuellen Raum. Neben der Wiedergabe von akustischen Umgebungsreizen kann das akustische Ausgabesystem auch zur Übermittlung von akustischen Rückmeldungen genutzt werden. [Dö13] Im Kontext von HMD sind die Ausgabesysteme in der Regel in das HMD integriert und wahlweise durch Kopfhörer (z. B. HTC Vive Cosmo Elite [HT23b], HTC Vive Pro 2 [HT23e]) oder einen zentralen Lautsprecher im HMD (z. B. HTC Vive Focus 3 [HT23c]) umgesetzt. Manche Geräte verfügen zudem über einen Audioausgang zur Verbindung alternativer Kopf- bzw. Ohrhörer [HT23c].

Haptische Ausgabesysteme

Die haptischen Ausgabesysteme vermitteln den Anwender:innen fühlbare Eindrücke der virtuellen Umgebung. Hierunter ist die Wahrnehmung sensorischer und/oder motorischer Aktivitäten zu verstehen, die einen Rückschluss auf Objekteigenschaften geben können. Zu diesem Zweck werden heute üblicherweise Vibrationsmotoren in den Controllern verwendet (z. B. HTC Vive Controller [HT23a]). Die Forschung befasst sich zudem mit der Entwicklung von Haptikhandschuhen, welche realitätsnähere haptische Eindrücke vermitteln sollen [BG09; PV18].

²³engl. Fachbegriff: Field of View (kurz: FOV)

Trackingsysteme

Für die Bestimmung der Positionierung und Orientierung der Anwender:innen im Raum kommen sogenannte *Trackingsysteme* zum Einsatz, welche die relevanten Positionierungs- und Orientierungsdaten in Echtzeit erfassen. Jeder Körper kann sich im Raum prinzipiell in sechs Freiheitsgraden (DOF²⁴) bewegen: in drei translatorischen Freiheitsgraden in Richtung der drei räumlichen Achsen sowie in drei rotatorischen Freiheitsgraden um die Raumachsen herum. Das Tracking der Anwender:innen gestaltet sich vor allem deshalb als anspruchsvoll, da sich nicht nur der Körper als Ganzes sondern auch einzelne Extremitäten in diesen Freiheitsgraden bewegen können. [Dö13] Für die Raumpositionserfassung kommen die zwei Verfahren des *Outside-In-* sowie des *Inside-Out-Trackings* in Frage, die nachfolgend vorgestellt werden sollen:

- *Outside-In-Tracking:*

Bei diesen Verfahren ist die Sensorik außerhalb des zu messenden Systems angebracht. Verwendet werden zumeist optische Sensoren. Zu unterscheiden ist dabei zwischen *markerbasierten* und *markerlosen Verfahren*. Bei ersteren nochmals zwischen *aktiven* und *passiven Markern*. Aktive Marker senden selbst ein Signal aus, passive Marker reflektieren lediglich Signale aus der Umgebung. [Kl06; Me06]

- *Inside-Out-Tracking:*

Hier befindet sich die Sensorik am bewegten Körper. Diese nimmt Signale der Umgebung (z. B. Umgebungslicht, Infrarot-Licht, Magnetfelder oder von außen generierte Schallwellen) auf. Aus diesen Daten wird die Lage im Raum extrapoliert. Auch bei diesem Verfahren kann wiederum zwischen markerlosen und markerbasierten Verfahren unterschieden werden. Gängige kommerzielle Modelle nutzen heute entweder aktive Infrarotmarker (sog. Trackingstationen) im Raum oder verwenden kamerabasierte markerlose Verfahren, bei denen mehrere unterschiedlich ausgerichtete Kameras des HMD die Umgebung aufnehmen und rechnerisch die Position des HMD und der Controller im Raum bestimmt wird. [KMW07; MR20]

Moderne VR-Systeme verwenden oftmals ein hybrides Trackingverfahren, bei dem ein Teil der Sensorik im HMD, ein Teil im Controller und ggf. ein weiterer

²⁴DOF = Degrees of Freedom; dt. Freiheitsgrade

Teil in externen Trackingmodulen verbaut ist. Die verschiedenen Varianten unterscheiden sich in ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen. Für eine detaillierte Beschreibung wird auf die Literatur verwiesen [MR20]. Zudem wird für manche Systeme²⁵ eine Augentracking-Funktionalität²⁶ angeboten. Derartige Funktionen sind in den meisten Fällen kamerabasiert. Für eine detaillierte Beschreibung wird auf die Literatur verwiesen [HKR06].

Controller

Zu guter Letzt soll auf die wesentlichen Merkmale der Controller eingegangen werden. Wie eingangs erwähnt, verfügen Controller für VR-Systeme in der Regel über eine Eingabe- wie auch eine Ausgabefunktion. Die Eingabe erfolgt dabei über Tasten- oder Touchpads sowie Bewegungen im Raum, welche durch ein Trackingsystem erkannt werden. Die Ausgabefunktion besteht meist aus haptischem Feedback, das in Form von Vibrationen auf Eingaben und Berührungen im virtuellen Raum reagiert. [HT23a; Oc20; St23] Exemplarisch sind in Abbildung 2.14 drei gängige Controllervarianten dargestellt.



Abbildung 2.14: Verschiedene VR-Controllermodelle [HT23a; Oc20; St23].

²⁵z. B. HTC Vive Focus 3[HT23d]

²⁶sog. Eye-Tracking

2.3.3 Virtuelle Lehr-Lern-Welten

Für das Lernen und die Kompetenzentwicklung im virtuellen Raum bieten virtuelle Welten eine interaktive Lehr-Lern-Umgebung, welche Arbeitsfelder, Objekte und Räume der zu adressierenden Zielgruppen realitätsgetreu und mit räumlichem Eindruck abbilden kann [BK20]. Dementsprechend können diese Welten nach BÜHLER & KOHNE in sogenannte *Trainings-*, *Explorations-*, *Konstruktions-* und *Wahrnehmungswelten* klassifiziert werden [BK20]. Die einzelnen Typen werden im Folgenden vorgestellt:

- *Trainingswelten:*

In Trainingswelten steht das Erlernen von handlungsbezogenen Fertigkeiten und Abläufen im Vordergrund. Die virtuelle Welt dient dabei dem Zweck, den Anwender:innen detailliert die notwendigen Handlungsabläufe abzubilden. Die virtuelle Welt reagiert auf die Handlungen der Anwender:innen und gibt so eine Rückmeldung, ob Handlungen richtig oder falsch ausgeführt wurden. [BK20] Insbesondere in Trainingswelten kann dabei mit sogenannten *Gamification-Elementen* gearbeitet werden, welche durch die Darstellung von Levels, Abzeichen oder Highscores die Motivation der Anwender:innen verstärken [BK20]. Beispielhaft sind für diese Art von Welten eine Lernumgebung der Automobilhersteller OPEL zur Montageausbildung [Ko16] sowie BMW zur Lackierer- und Fertigungsausbildung [BK20].

- *Explorationswelten*

In Explorationswelten steht das eigenständige Erkunden und Erforschen der dargestellten Umgebung und deren Objekte im Vordergrund. Ziel dieser Welten ist die Vermittlung von Inhalten, Zusammenhängen und strukturellem Wissen. Die Anwender:innen haben die Möglichkeit, sich frei zu bewegen und die Umgebung selbstständig zu erkunden. [BK20] In der Produktion können solche Welten bspw. dafür verwendet werden, Verständnis für komplexe Prozesse und Zusammenhänge darzustellen.

- *Konstruktionswelten:*

In Konstruktionswelten können Anwender:innen eigene virtuelle Welten entwerfen oder diese mit selbstkonstruierten Objekten erweitern. Die Erschaffung von Objekten und die Umsetzung von Ideen stehen hier im Vordergrund. [BK20] In der Kompetenzentwicklung für die Produktion

können diese Welten bspw. für die Umsetzung in Trainings generierter Verbesserungsmaßnahmen oder neuer Produkte eingesetzt werden.

- *Wahrnehmungswelten:*

In der Kategorie der Wahrnehmungswelten steht die Wahrnehmung von in der physischen Realität nicht erreichbaren, zu kleinen oder zu schnellen Objekten im Vordergrund. Über die Veränderung von Größenverhältnissen oder physikalischen Grundsätzen können so Wahrnehmungen ermöglicht werden, die in der Realität nicht zugänglich sind. [BK20]

Für *Virtual Reality* konnten in Abschnitt 2.3.1 verschiedene Perspektiven aufgezeigt werden, die in der Betrachtung relevant sind. Zusammenfassend zeigt die Literatur, dass für den erfolgreichen Einsatz eine rein technische Perspektive, wie sie zum Beispiel das zuvor eingeführte VR-Kontinuum einnimmt (siehe Abschnitt 2.3.1), nicht hinreichend sind. Um die Technologie erfolgreich im Weiterbildungsbereich einzuführen, sind vielmehr die Eigenschaften der *Aufgabe, den Anwender:innen, Informationen, Interaktionen* und *Technologie* [DAI20; SD21] zu berücksichtigen. Die einzelnen Aspekte werden in Tabelle 2.4 dargestellt.

Tabelle 2.4: Aspekte für die erfolgreiche Virtual-Reality-Implementierung nach DALING, ABDELRAZEQ & ISENHARDT [DAI20; SD21].

Aspekt	Beschreibung
Aufgabe	Überarbeitung des Schwerpunkts: prozedurales vs. deklaratives Wissen, kognitive vs. körperliche Aktivität [DJR17].
Anwender:in	Berücksichtigung von Vorerfahrungen und Technologieaffinität der Anwender:innen [LN07].
Informationen	Arten und Dimensionalität von Objektinformationen (textbasiert, Bilder, 2D/3D-Visualisierung) [TP11]
Interaktion	Gestaltung von Mensch-Maschine-Interaktion und Benutzerschnittstellen (Sprache/Audio, visuell, haptisch) [Ma98].
Technologie	Hardware-/Software-Spezifikationen für VR [MK94]

2.3.4 Chancen und Herausforderungen

Die Literatur kennt Chancen und Herausforderungen, die VR im Allgemeinen und im Weiterbildungskontext im Speziellen bieten kann [Ki19; Ri20c]. Aufgrund der Ausrichtung der vorliegenden Arbeit soll primär auf die Chancen und Herausforderungen im Weiterbildungskontext eingegangen werden.

Chancen des Virtual-Reality-Einsatzes

VR eröffnet den Anwender:innen nicht nur neue Lehr- und Lernräume, sondern ermöglicht durch den immersiven Charakter auch neue Erfahrungs- und Darstellungsmöglichkeiten. Durch den Einsatz von VR können im schulischen, beruflichen und akademischen Kontext neue, interaktive Formate zur Wissensvermittlung angeboten werden. Diese können neben dem Training praktischer Fähigkeiten auch der Vermittlung von Wissen dienen [Ki19]. Durch die Portabilität der Systeme lässt sich ergänzend die Flexibilität der Formate im Hinblick auf Zeit und Raum erweitern [FO15]. Auch unterschiedliche Lerntypen können einfacher angesprochen werden [Ze18]. In Studien lässt sich der positive Einfluss des Virtual-Reality-Einsatzes auf die Aufmerksamkeit und Motivation der Anwender:innen belegen [HN15]. Dieser Umstand kann durch sogenannte Gamification-Elemente verstärkt werden [SD21]. Zudem werden die Anwender:innen dazu angeregt, den zurückliegenden Lernprozess zu reflektieren.

Auf organisatorischer Ebene kann der Einsatz von VR in den Bereichen der Fernbildung und der Adaptivität in Bezug auf die Anforderungen der Anwender:innen Potentiale bieten [Da15]. Dabei kann Adaptivität in vielfältiger Weise verstanden werden: Neben den Inhalten kann das LLK durch den Virtual-Reality-Einsatz auch adaptiv im Hinblick auf Anforderungen der Anwender:innen bezüglich Ort, Zeit und Raum der Durchführung werden [AAW11; VS08]. Es eröffnet sich zudem die Möglichkeit, den Anwender:innen Zugang zu Schulungsumgebungen zu ermöglichen, die andernfalls aus arbeitschutzrechtlichen Gründen oder aufgrund körperlicher Einschränkungen gar nicht oder nicht für alle Anwender:innen zugänglich sind [Br91]. Zu guter Letzt bietet VR die Möglichkeit auf ressourcenschonende Weise kollaborativ an verschiedenen Standorten zusammenzuarbeiten [SD21]. Dabei reduziert sich durch die virtuelle Darstellung auch der Konsum von Verbrauchsmaterialien, die in physischen, für den Trainingsbetrieb produzierenden Lernfabriken

normalerweise anfallen würden. So kann ein wesentlicher Beitrag zur Kosteneffizienz geleistet und das Konzept auch für kleinere Unternehmen attraktiv werden [AAW11; HN15]. Durch den Einsatz von VR wird zudem die Anzeige von Informationen und deklarativem Wissen simultan zur Ausführung und Erlangung prozeduralen Wissens möglich [SW13].

Herausforderungen des Virtual-Reality-Einsatzes

Dementgegen steht die Tatsache, dass die Literatur bisher nur wenige Erläuterungen zu notwendigen mediendidaktischen Konzepten kennt [Ke13]. Obwohl Konzepte bislang fehlen, steigen durch die Integration von digitalen oder virtuellen Medien in den Lehr- und Lernprozess gleichzeitig die Anforderungen an das Schulungspersonal [HČ18; Ze18]. Zudem besteht die Gefahr, dass die Anwender:innen durch die ungewohnten Eindrücke kognitiv überlastet werden. Dies kann möglicherweise auch mit der fehlenden Medienkompetenz im Kontext von VR zusammenhängen. Die Anwender:innen erleben möglicherweise eine Isoliertheit innerhalb des Systems [Ki19] und können durch das immersive Erlebnis in der ungewohnten Umgebung von den wesentlichen Aspekten des LLK abgelenkt werden [Ze18]. Obwohl die Virtual-Reality-Hardware in den letzten Jahren preislich erschwinglicher wurde, müssen nichtsdestotrotz Kosten für Hardware und vor allem die Softwareentwicklung berücksichtigt werden. Letztere sind insbesondere von der Komplexität der zu entwickelnden Umgebung abhängig [CR07; HS08]. Auch der Integrationsaufwand schafft für den institutionellen Einsatz neue Herausforderungen [SY08]. Insgesamt kann festgestellt werden, dass der Bereich der Softwareentwicklung diverse Herausforderungen für den VR-Einsatz beinhaltet [As20].

2.3.5 Trends und Entwicklungspotentiale

VR entwickelt sich als Technologie kontinuierlich weiter und auch der gesellschaftliche Umgang mit der Technologie ist einem stetigen Wandel unterworfen. Eine Umfrage des Branchenverbands BITKOM zeigt, dass mehr als die Hälfte der Befragten VR entweder bereits nutzen oder für sie eine zukünftige Nutzung zumindest vorstellbar ist (s. Abbildung 2.15) [Bi21].

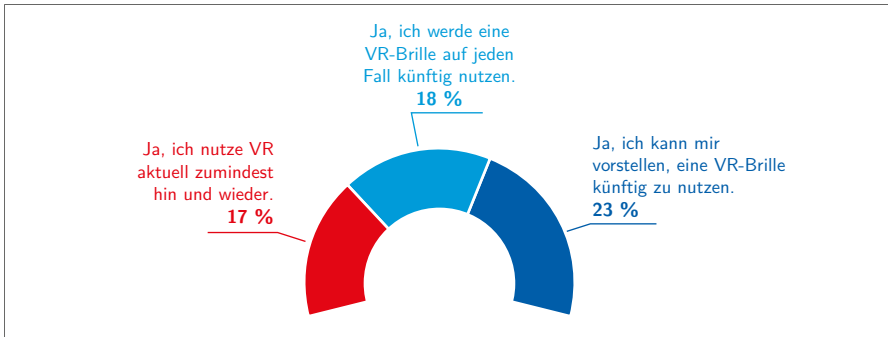


Abbildung 2.15: Interesse an Virtual-Reality-Nutzung im privaten Sektor in Anlehnung an BITKOM [Bi21].

KIND, FERDINAND ET AL. formulieren für die weitere Entwicklung im Bereich VR verschiedene Thesen zu den Entwicklungspotentialen, welche in nachfolgend ausschnittsweise und zusammengefasst dargestellt werden [Ki19]:

- Grundlegende *Entwicklungsvoraussetzungen* werden durch die Weiterentwicklung der Hardwarekomponenten gesetzt, hierzu zählen neben leistungsstarken Computerchips auch die Display- und Trackingtechnik sowie die digitale Infrastruktur zur schnellen Datenübertragung.
- Die *Erfahrungen* der Anwender:innen können zukünftig durch Verbesserung der Immersion erreicht werden. Aktuell werden primär das Sehen und Hören adressiert. Künftige Entwicklungen gehen in Richtung der haptischen Erfahrung und der Wahrnehmung der eigenen Positionierung im Raum [PV18]. In diesem Zusammenhang werden die Geräte künftig kleiner, zunehmend kabellos und ergonomischer. Dabei können auch Gehirn-Computer-Interfaces zukünftig eine Rolle einnehmen [Lé08]. Die Verbesserung der Technologie wird zusammen mit Gewöhnungseffekten zur Verminderung von Begleiterscheinungen wie Motion Sickness führen [Re15]. Zudem kann die Technologie zu besserer Toleranz und Integration führen [SS16].
- Zudem wird sich die *Anwendbarkeit und Verbreitung* in den verschiedenen Lebensbereichen weiter steigern. Kernaspekte des alltäglichen Lebens werden sich weiter in die digitale oder virtuelle Welt verlagern.

Räumliche Distanzen der realen Welt werden sich auflösen, da die Technologie ortsunabhängigen Zugang zu gemeinsamen Interaktionsräumen schaffen wird. Als Folge dieser Entwicklung wird sich die Interaktion zwischen Menschen und algorithmengesteuerten Agenten und Avataren in der virtuellen Realität zukünftig intensivieren und die Verhaltens- bzw. Kommunikationsweisen angleichen.

- Die Generierung der *Inhalte* der virtuellen Umgebungen wird künftig durch die Anwendung von künstlicher Intelligenz vorangetrieben. Dabei nehmen maschinelles Sehen²⁷ sowie maschinelles Lernen²⁸ eine zentrale Rolle ein. Jedoch sind auch offene Plattformen denkbar. Regulierende Kraft werden vor allem kommerzielle Anbieter mit proprietären Plattformen²⁹ sein. Die *Wertschöpfung* verschiebt sich dabei künftig von Hardware auf Inhalte. Durch die breite Anwendbarkeit der Technologie erschließen sich große Verwertungspotentiale.

Trotz dieser positiven Entwicklungspotentiale ergeben sich durch die VR auch Gefahren, die sich zum Teil auf Basis von Machtakkumulation bei einigen wenigen wirtschaftlichen Anbietern sowie fehlender Regulierung ergeben können [Ki19; Sc22]. Die vollständige Thesenliste findet sich im Anhang (Abschnitt A.2.2). Die verschiedenen Trends sind für die entwickelte Methodik vor allem im Hinblick auf den Weiterentwicklungsbedarf von Konzepten von Relevanz.

2.4 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde der Stand der Forschung zur Gestaltung und Implementierung von virtuellen LLK für Lernfabriken aufgezeigt. Zentrale Aspekte waren dabei neben den grundlegenden Theorien zu Lernen und Kompetenzen vor allem die Technologie VR sowie Lernfabriken als Werkzeug zur Kompetenzvermittlung für die Produktion. Lernfabriken haben sich dabei in den vergangenen Jahren zum etablierten Werkzeug zur Vermittlung produktionsrelevanter Kompetenzen entwickelt [Ab15]. Dieser Umstand hat sie in den

²⁷engl. Fachbegriff: Computer Vision

²⁸engl. Fachbegriff: Machine Learning

²⁹z. B. App Stores oder Streamingdienste

vergangenen Jahren in den Fokus der anwendungsnahen Forschung gerückt und die Entwicklung verschiedener Gestaltungsansätze bewirkt.

Gleichzeitig hat sich VR in den vergangenen Jahren zu einer attraktiven Technologie für den Einsatz in der Weiterbildung entwickelt. Moderne Systeme sind hinreichend leistungsfähig, um realitätsnahe Umgebungen abbilden zu können. Heutige Bedien- und Trackingkonzepte erlauben den Anwender:innen eine intuitive und natürliche Interaktion mit dem System und der abgebildeten Umgebung. Um das Potential der Technologie für Weiterbildungsformate nutzen zu können, bedarf es jedoch eines geeigneten Gestaltungsansatzes.

Die Betrachtungen in diesem Abschnitt haben verdeutlicht, dass bislang verschiedene Gestaltungsansätze für Lernfabriken existieren, die jeweils unterschiedliche Aspekte des Konzepts akzentuieren. Gleichwohl konnte festgestellt werden, dass keiner der existierenden Ansätze die kompetenzorientierte Gestaltung von virtuellen LLK betrachtet. Der relevanteste Ansatz nach TISCH [Ti18] berücksichtigt zwar die kompetenzorientierte Gestaltung, ausschließlich im Kontext physischer Lernfabriken. Auch wenn eine geringe Anzahl bestehender Gestaltungsansätze den Fokus auf Digitalisierung legt, so betrachtet keiner der Ansätze die Technologie VR oder virtuelle LLK im Speziellen. Auch wenn diese Ansätze prinzipiell geeignete virtuelle LLK hervorbringen können, erscheint es aufgrund der Eigenheiten von VR zumindest fraglich, ob vorhandene Potentiale bestmöglich ausgeschöpft werden können. Aus wissenschaftlicher und praktischer Perspektive ist es notwendig, die bestehenden Ansätze um konkrete Betrachtungen zu VR zu erweitern. Dies stellt sicher, dass technologiebezogene Potentiale bestmöglich genutzt und Limitationen im Konzept berücksichtigt werden.

3 Zielsetzung und Forschungskonzeption

Die in den bisherigen Kapiteln aufgezeigten Grundlagen sowie Forschungslücken bilden das Fundament für die weiteren Erläuterungen in diesem Kapitel. Es werden im Folgenden neben der Beschreibung des Forschungsziels (Abschnitt 3.1) und der Forschungskonzeption (Abschnitt 3.2) auch die formalen und inhaltlichen Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik dargestellt (Abschnitt 3.3). Zudem wird der Untersuchungsbereich der vorliegenden Forschungsarbeit abgegrenzt (Abschnitt 3.4).

3.1 Zielsetzung

Zur kompetenzorientierten Gestaltung und Implementierung von virtuellen LLK für Lernfabriken existiert bis dato keine Methodik, welche die Besonderheiten der Technologie VR hinreichend berücksichtigt. Bisherige Gestaltungsansätze fokussieren sich, wie in Abschnitt 2.2.3 dargestellt, vor allem auf die Entwicklung physischer Lernfabrikkonzepte. Die Besonderheiten von VR als Lehr- und Lernmedium werden nicht berücksichtigt. Diese Betrachtungslücke soll durch die vorliegende Arbeit geschlossen werden. Hierzu wird die in Abschnitt 1.2 formulierte erste Forschungsfrage, nach welchem strukturierten Vorgehen virtuelle LLK für Lernfabriken gestaltet werden können, beantwortet. Zur Beantwortung der Forschungsfrage wird auf bewährten Gestaltungsansätzen aufgebaut und an relevanten Stellen neue Betrachtungsaspekte ergänzt. Hierdurch wird insbesondere die Anwendbarkeit der Methodik sowohl für Entwicklungsvorhaben rein virtueller wie auch hybrider LLK ermöglicht. Die gesamte Methodik soll kompetenzorientiert gestaltet werden.

3.2 Forschungskonzeption

Die Forschungskonzeption definiert die Ausrichtung für den gesamten Forschungsprozess. Da sich die zu entwickelnde Methodik mit der Gestaltung und Implementierung befassen soll, muss ein Konzeptionsansatz gewählt wer-

den, der bestmöglich für die Ausrichtung der Forschungsarbeit geeignet ist. Aus diesem Grund wurde sich für die *Design Research Methodology* (DRM) als grundlegenden Gestaltungsansatz entschieden. Die DRM fokussiert sich auf die Forschung im Kontext von Gestaltungsprozessen und wird deshalb als geeignet angesehen. Das Forschungsvorhaben wird im Rahmen der DRM in insgesamt vier Phasen untergliedert. Diese werden nachfolgend kurz beschrieben und dabei parallel auf diese Forschungsarbeit und deren Inhalte übertragen [BC09]:

Die erste Phase der DRM fokussiert sich auf die Entwicklung von **Forschungszielen**. Dies soll im dargestellten Forschungsvorhaben vor allem auf Basis der zugrundeliegenden Literatur geschehen. [BC09] Das Forschungsziel, welches dieser Arbeit zu Grunde liegt, ist die Entwicklung einer Methodik zur kompetenzorientierten Gestaltung und Implementierung von virtuellen LLK für Lernfabriken (Abschnitt 3.1).

In der zweiten Phase der DRM findet eine deskriptive Studie zur **Untersuchung des Standes der Forschung und Praxis** statt. In dieser werden zunächst die notwendigen Grundlagen und ein übergeordnetes Verständnis über grundlegende Sachverhalte aufgebaut. Ein weiteres Ziel dieser Phase ist die Konkretisierung der zu adressierenden Forschungslücke. [BC09] Hierbei lässt sich insbesondere feststellen, dass bestehende Ansätze aus dem Bereich der Lernfabrikentwicklung ausschließlich auf die Entwicklung von physischen LLK ausgerichtet sind. Zwar lassen sich durch Verwendung bestehender Ansätze mit hoher Wahrscheinlichkeit virtuelle LLK für Lernfabriken ableiten, die Eigenheiten von VR werden jedoch nicht in hinreichendem Maße berücksichtigt (Abschnitt 2.3).

In der dritten Phase der DRM findet eine präskriptive Studie zur **Entwicklung der Methodik** statt. Relevant für diese Phase ist vor allem, dass ein sogenanntes *Konstrukt* verbessert oder vereinfacht werden soll. [BC09] Für die vorliegende Forschungsarbeit ist dies die Gestaltung und Implementierung von virtuellen LLK. Aufbauend auf den Zielen dieser Forschungsarbeit ergibt sich somit, dass ein strukturiertes Vorgehen für die Anwendung in der Praxis geschaffen wird (Kapitel 4). In Anlehnung an das sogenannte *Systems Engineering* wird angestrebt, eine zweckmäßige und zielgerichtete Gestaltung zu erreichen. Die zu entwickelnde Methodik soll im Kontext der dem

Forschungsziel	Entwicklung einer Methodik zur Gestaltung und Implementierung von virtuellen Lehr-Lern-Konzepten für Lernfabriken								
Erste Deskriptive Studie	Strukturierung des Untersuchungsraums <ul style="list-style-type: none"> ▪ Herleitung der Forschungslücke ▪ Konkretisierung von Forschungszielen und -konzeption <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 33%; text-align: center;">Kompetenzen</td> <td style="width: 33%; text-align: center;">Virtual Reality</td> <td style="width: 33%; text-align: center;">Lernfabriken</td> </tr> </table>			Kompetenzen	Virtual Reality	Lernfabriken			
Kompetenzen	Virtual Reality	Lernfabriken							
Präskriptive Studie	Vorgehen zur Konzeptionierung und Implementierung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Anforderungsermittlung ▪ Strukturierung und Darstellung für die Praxis <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 33%;">Rahmenbedingungen</td> <td style="width: 33%;">Gestaltung</td> <td style="width: 33%;">Integration</td> </tr> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Initialsituation ▪ Handlungsfelder ▪ Anforderungen </td> <td> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Hardware ▪ Szenariokonfiguration ▪ Gestaltungselemente </td> <td> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Erprobung ▪ Implementierung ▪ Weiterentwicklung </td> </tr> </table>			Rahmenbedingungen	Gestaltung	Integration	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Initialsituation ▪ Handlungsfelder ▪ Anforderungen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hardware ▪ Szenariokonfiguration ▪ Gestaltungselemente 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erprobung ▪ Implementierung ▪ Weiterentwicklung
Rahmenbedingungen	Gestaltung	Integration							
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Initialsituation ▪ Handlungsfelder ▪ Anforderungen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hardware ▪ Szenariokonfiguration ▪ Gestaltungselemente 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erprobung ▪ Implementierung ▪ Weiterentwicklung 							
Zweite Deskriptive Studie	Anwendung und Evaluation der Methodik <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 33%;">Anwendung</td> <td style="width: 33%;">Evaluationskonzept</td> <td style="width: 33%;">Evaluation</td> </tr> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Forschungsprojekt ▪ Studentische Arbeit </td> <td> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Formale Anforderungen ▪ Inhaltliche Anforderungen </td> <td> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kompetenzmessung ▪ System-Usability Scale ▪ Expertenbewertung </td> </tr> </table>			Anwendung	Evaluationskonzept	Evaluation	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Forschungsprojekt ▪ Studentische Arbeit 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Formale Anforderungen ▪ Inhaltliche Anforderungen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kompetenzmessung ▪ System-Usability Scale ▪ Expertenbewertung
Anwendung	Evaluationskonzept	Evaluation							
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Forschungsprojekt ▪ Studentische Arbeit 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Formale Anforderungen ▪ Inhaltliche Anforderungen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kompetenzmessung ▪ System-Usability Scale ▪ Expertenbewertung 							

Abbildung 3.1: Forschungskonzeption der vorliegenden Arbeit, eigene Darstellung.

Systems Engineering zu Grunde liegenden Systemdenkweise und Prinzipien entwickelt werden [Ha18]:

- *Zunehmende Detaillierung*: Der Betrachtungsbereich sowie der Lösungsraum sind systematisch und nachvollziehbar von anfänglich großzügiger Dimensionierung sukzessive einzugrenzen.
- *Alternativenbildung*: Um eine qualitativ hochwertige Lösung zu ermöglichen, sollen Alternativen explizit zugelassen und hinreichend untersucht werden, bevor sie verworfen werden.
- *Phasen*: Der Lösungsprozess für das Gesamtproblem soll in Teilprobleme bzw. -schritte unterteilt werden.

- *Problemlösung:* Ein geeigneter Problemlösungszyklus soll erlauben, dass in den einzelnen Projektphasen über Zielsuche und -festlegung sowie anschließender Lösungssuche und -auswahl ein Ergebnis erreicht wird.

In der vierten und letzten Phase der DRM wird eine weitere deskriptive Studie zur **Anwendung und empirischen Evaluation** durchgeführt (Kapitel 5). [BC09] Im Zuge dieser Phase wird neben der Methodik selbst auch ein mit Anwendung der Methodik erzielbares Ergebnis überprüft.

3.3 Anforderungen an die Methodik

Zur Entwicklung der Methodik müssen zunächst Anforderungen definiert werden. Für den weiteren Verlauf dieser Forschungsarbeit soll zwischen inhaltlichen und formalen Anforderungen unterschieden werden. Diese werden im Folgenden eingeführt und erläutert.

3.3.1 Inhaltliche Anforderungen

Die inhaltlichen Anforderungen leiten sich maßgeblich aus dem Stand der Forschung und Praxis sowie der identifizierten Forschungslücke ab. In den inhaltlichen Anforderungen wird das Forschungsziel weiter konkretisiert, sodass die als relevant identifizierte Forschungslücke (Abschnitt 2.4) adressiert werden kann. Die inhaltlichen Anforderungen, welche für die Methodik angewendet werden sollen, sind die folgenden:

- *Strukturiertheit:*
Der Ablauf der Methodik soll strukturiert und systematisch sein.
- *Individualität:*
Bestehende Lernfabrikkonzepte unterscheiden sich untereinander in einer Vielzahl an Aspekten [AMT18]. Das morphologische Modell für Lernfabriken nach TISCH ET AL. und KRESS ET AL. [Kr23; Ti15b] zeigen diese Vielfalt auf. Auch für zukünftige Entwicklungen ist entsprechende Individualität zu erwarten, sodass die Methodik die Individualität der verschiedenen Anwendungsfälle berücksichtigen muss.
- *Einsetzbarkeit:*
Die Methodik soll für verschiedene Entwicklungszielsetzungen anwend-

bar sein. Dabei soll die Methodik sowohl zur Entwicklung rein virtueller als auch bei der Entwicklung hybrider LLK Anwendung finden können. Zudem sollen nicht nur Neuentwicklungen sondern auch Weiterentwicklungen bestehender Konzepte mit der Methodik möglich sein.

- *Detailliertheit:*

Die einzelnen Bausteine und Schritte des Verfahrens sind hinreichend detailliert und verständlich beschrieben, um die Anwendung zu ermöglichen.

- *Zielorientierung:*

Die Methodik orientiert sich an den grundlegenden Zielsetzungen, die bei der Entwicklung vorgegeben wurden. Diese beinhalten, dass die mit Hilfe dieser Methodik entwickelten LLK eine Kompetenz- und Nutzer:innenorientierung aufweisen.

- *Einfachheit:*

Die entwickelte Methodik soll auch für wenig erfahrenen Lernfabrikentwickler:innen einsetzbar und verständlich sein. Dies soll sicherstellen, dass die Methodik auch von Personen verwendet werden kann, die nicht in den einschlägigen Bereichen (z. B. Didaktik, Medienpädagogik oder Lernfabrikentwicklung) Expertise aufweisen.

Die definierten inhaltlichen Anforderungen stellen sicher, dass die Methodik von Beginn an eine für die Anwender:innen einfach verständliche Struktur aufweist. Zudem wird durch selbige sichergestellt, dass die einzelnen Schritte für die Anwendung hinreichend detailliert beschrieben sind und das Vorgehen auf eine Vielzahl unterschiedlicher Entwicklungsprojekte angewendet werden kann.

3.3.2 Formale Anforderungen

Ergänzend zu den zuvor definierten inhaltlichen Anforderungen soll die zu entwickelnde Methode darüber hinaus verschiedenen formalen Anforderungen genügen. Die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik soll die folgenden formalen Anforderungen berücksichtigen:

- *Objektivität:*

Die Methodik soll bei Anwendung durch unterschiedliche Personen ein

gleichartiges Ergebnis in Bezug auf die Zielgruppen- und Kompetenzorientierung erzielen. Die Methodik ist dementsprechend in der Art detailliert, dass auf der einen Seite die Nutzer:innen- und Kompetenzorientierung gefördert werden und gleichzeitig der kreative Freiraum im Gestaltungsprozess erhalten bleibt.

- *Reproduzierbarkeit:*

Weiterhin soll die Methodik ebenso bei wiederholter Anwendung durch die selben Personen ein gleichartiges Ergebnis in Bezug auf Anwender:innen- und Kompetenzorientierung erzielen.

- *Übertragbarkeit:*

Mit der Anforderung der Übertragbarkeit soll sichergestellt werden, dass das Verfahren auf weitere Anwendungsfälle übertragbar ist. Hierzu wird in der Methodik auf verschiedene Anwendungsfälle eingegangen.

- *Nachvollziehbarkeit:*

Bei Verwendung der Methodik sollen die Ergebnisse im Hinblick auf die gewählten Eingangsgrößen für die Anwender:innen nachvollziehbar sein.

- *Anpassungsfähigkeit:*

Das Verfahren soll zudem adaptiv durch neue Informationen anpassbar sein.

- *Simplizität:*

Zu guter Letzt soll sich die Methodik auf die wesentlichen Elemente fokussieren. Dies soll sicherstellen, dass das Verfahren nicht unnötig komplex und aufwändig für die Anwendung ist.













Inhaltliche Anforderungen		Strukturiertheit	Formale Anforderungen		Objektivität
		Individualität			Reproduzierbarkeit
		Detailliertheit			Übertragbarkeit
		Zielorientierung			Nachvollziehbarkeit
		Einfachheit			Anpassungsfähigkeit
		Einsetzbarkeit			Simplizität

Abbildung 3.2: Anforderungen an die Methodik, eigene Darstellung.

3.4 Abgrenzung des Untersuchungsbereichs

Da die Entwicklung von virtuellen LLK eine große Betrachtungsbreite und -tiefe ermöglicht, muss für die zu entwickelnde Methodik eine Begrenzung des Untersuchungsbereichs getroffen werden. Die folgenden Einschränkungen werden vorgenommen, um den Untersuchungsbereich dieser Forschungsarbeit abzugrenzen:

- **Hinsichtlich der betrachteten Technologie:**

Wie in Abschnitt 2.3 dargelegt wurde, existiert im Bereich der XR ein fließender Gradient zwischen physischer und gänzlich virtueller Realität. Die zu verwendende Technologie soll deshalb auf VR als Technologie zur Darstellung gänzlich virtueller Welten beschränkt werden.

- **Hinsichtlich der betrachteten VR-Systeme:**

Wie weitergehend in Abschnitt 2.3 dargelegt wurde, existieren für die Darstellung von VR verschiedene Systemansätze. Für diese Arbeit, insbesondere die spätere im Rahmen der Methodik durchgeführte Hardwareauswahl, soll sich auf HMD-basierte VR-Systeme beschränkt werden. Sogenannte CAVE-Systeme (Abschnitt 2.3.2) [Cr92; Dö13] werden nicht betrachtet. Auch smartphone-basierte Systeme werden nicht betrachtet. Dies wird damit begründet, dass HMD-basierte Systeme für

die allermeisten Anwendungsfälle in Frage kommen, wohingegen CAVE- und smartphonebasierte Systeme nur für eine Teilmenge der Anwendungsfälle in Frage kommen. Zudem bieten HMD-basierte Systeme im Vergleich einen höheren Immersionsgrad.

- **Hinsichtlich des Lernkontexts:**

Der Fokus dieser Forschungsarbeit liegt auf dem Einsatz von virtuellen LLK im Bereich der Lernfabriken. Wie in Abschnitt 2.2.4 dargelegt wurde, können Lernfabriken in unterschiedlichen Intensitäten virtualisiert werden. Es werden neben rein virtuellen Konzepten auch hybride Konzepte betrachtet, welche ergänzend zu bestehenden physischen LLK eingesetzt werden. Im Verständnis dieser Arbeit sind die im hybriden Kontext eingesetzten 3D-Umgebungen jedoch in sich geschlossen und nicht mit Elementen aus der physischen Realität überblendet.

- **Hinsichtlich der Gestaltungsebene:**

Der Untersuchungsbereich beschränkt sich auf die grundlegende Gestaltung von virtuellen LLK für Lernfabriken. Es werden für alle drei Gestaltungsebenen des Gestaltungsmodells nach TISCH ET AL. [Ti18] Festlegungen getroffen. Allerdings wird nicht im Detail auf die technische Konfiguration von Lernfabriken (Makro-Ebene) eingegangen. Auch die Entwicklung von Lernmodulen (Meso-Ebene) steht nicht im Fokus dieser Arbeit. Die Festlegungen im Rahmen der Methodik beziehen sich vor allem auf die Entwicklung von Lehr-Lern-Situationen auf der sog. Mikro-Ebene (Abschnitt 2.2.3).

- **Hinsichtlich der didaktischen Transformationen:**

Die Herleitung möglicher Lernziele soll im Rahmen dieses Vorgehens nicht betrachtet werden. Grund für diese Einschränkung ist, dass zur Herleitung von Lernzielen bereits geeignete, wissenschaftlich fundierte Ansätze vorliegen (Abschnitt 2.2.3). Hinsichtlich der relevanten Grundlagen wird hier vor allem auf den Gestaltungsansatz nach TISCH verwiesen [AMT18; Ti18]. Diese Forschungsarbeit fokussiert sich somit primär auf die Gestaltung der virtuellen LLK; detailliert also insbesondere die sog. zweite didaktische Transformation für virtuelle Lernfabriken (Abschnitt 2.2.3).

- **Hinsichtlich der Softwareentwicklung:**

Für die Umsetzung von virtuellen LLK ist neben der Gestaltung und

Implementierung auch die Softwareentwicklung notwendig. Diese steht, im Gegensatz zur Beschreibung von Gestaltung und Implementierung, allerdings nicht im Fokus dieser Arbeit. Der Vollständigkeit halber werden zur Softwareentwicklung übergeordnete Empfehlungen gegeben.

4 Methodik zur Gestaltung und Implementierung virtueller Lehr-Lern-Konzepte

Ziel dieser Forschungsarbeit ist wie zuvor beschrieben die Entwicklung einer Methodik zur kompetenzorientierten Gestaltung und Implementierung von virtuellen LLK für Lernfabriken der schlanken Produktion. In diesem Kapitel wird die Methodik dargestellt und im Detail beschrieben. Zunächst wird, ausgehend von der im vorherigen Kapitel 3 definierten Zielsetzung und den dargestellten Anforderungen, das Zielbild für die Methodik entwickelt (Abschnitt 4.1). Anschließend werden die flankierenden Methodikbausteine der Softwareentwicklung und Entwicklungsmethode beschrieben (Abschnitt 4.2). Aufbauend auf der Struktur werden im nächsten Abschnitt die direkten Methodikbausteine und deren jeweils zugehörigen Methodikschritte dargestellt (Abschnitt 4.3, 4.4 und 4.5). Das Kapitel wird abgeschlossen durch ein Zwischenfazit zur Entwicklung und Detaillierung der Methodik (Abschnitt 4.6).

4.1 Entwicklung und Struktur der Methodik

Im Folgenden wird die Entwicklung der Methodik auf Basis des Zielbildes (Abschnitt 4.1.1), welches die formalen sowie inhaltlichen Anforderungen berücksichtigt, dargestellt. Zudem wird die die daraus resultierende Struktur der Methodik erläutert (Abschnitt 4.1.2).

4.1.1 Zielbild der Methodik

Die im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelte Methodik soll es Lernfabrikentwickler:innen in Unternehmen oder Institutionen ermöglichen, in einem strukturierten und einfachen Vorgehen, virtuelle LLK für bereits bestehende oder neu aufzubauende Lernfabriken zu entwickeln. Bereits vorhandene Gestaltungsansätze für physischen Lernfabriken werden hierzu um Be-

trachtungen mit Schwerpunkt auf die Besonderheiten der Technologie VR erweitert (Abschnitt 3.1). Da VR über einen, im Vergleich zu physischen Lernfabriken, abgewandelten Lösungsraum (z. B. Inhalte, Darstellungsweisen) verfügt, soll die Methodik dabei unterstützen, die bestmögliche Gestaltung des virtuellen LLK zu erzielen (Abschnitt 2.3.4). Bestmöglich bedeutet im Kontext dieser Forschungsarbeit, dass das LLK anwender:innen- und kompetenzorientiert gestaltet ist, ein hohes Maß an Nutzbarkeit aufweist und die Potentiale und Limitationen der Technologie VR in hinreichendem Maß berücksichtigt (Abschnitt 2.3.4).

Durchläuft ein:e Anwender:in die Methodik, sollen alle notwendigen Aspekte, die für die nachhaltige und fundierte Gestaltung eines virtuellen LLK notwendig sind, betrachtet werden. Dies beinhaltet neben der Identifikation und Erfassung relevanter Rahmenbedingungen für das Entwicklungsprojekt vor allem die Ableitung möglicher Zielsetzungen für die Implementierung sowie die Festlegung und Ausgestaltung relevanter Inhalte für das zu entwickelnde LLK.

Organisationen und Institutionen, die eine eigene Lernfabrik betreiben, wird mit der entwickelten Methodik eine systematische Zusammenstellung einzelner Methoden an die Hand gegeben. Die Methodik beinhaltet alle relevanten Schritte und Betrachtungsaspekte, um ein effektives LLK zur Förderung der Kompetenzentwicklung zu gestalten und dieses im Anschluss in den Trainingsbetrieb zu implementieren.

4.1.2 Struktur der Methodik

Um dem dargestellten Zielbild gerecht zu werden, besteht die Methodik aus mehreren Bausteinen. Bevor in den nachfolgenden Abschnitten (4.2, 4.3, 4.4 und 4.5) auf die einzelnen Methodikbausteine im Detail eingegangen wird, soll zunächst der Aufbau der entwickelten Methodik dargestellt werden. Die angestrebte Methodik ist in Abbildung 4.1 dargestellt und wird im Hinblick auf ihre Struktur im Folgenden erklärt.

Die Methodik setzt sich aus insgesamt drei Bausteinen zusammen, die jeweils in drei Schritte unterteilt sind. Die Methodik wird flankiert von der übergeordneten Auswahl der zugrundeliegenden Entwicklungsmethode sowie der Softwareentwicklung. Beide flankierenden Aspekte werden im Folgenden



Abbildung 4.1: Struktur der Methodik zur kompetenzorientierten Gestaltung und Implementierung virtueller LLK für Lernfabriken, eigene Darstellung.

jeweils nur in ihren Grundzügen dargestellt werden und stehen nicht im Fokus dieser Arbeit. Die Detailbeschreibung der einzelnen Methodikbausteine beschränkt sich dementsprechend auf die Beschreibung der drei zentralen Methodikbausteine sowie deren jeweilige Schritte.

Die Betrachtungen in den jeweiligen Methodikbausteinen sollen in Projektteams durchgeführt werden, die sich aus Expert:innen und Trainingspersonal der betreibenden Organisation sowie Expert:innen aus dem Bereich Lernfabrikgestaltung und VR-Entwicklung zusammensetzen.

4.2 Flankierende Bausteine

Wie zuvor dargelegt wurde, soll die Auswahl der Entwicklungsmethode sowie der Aspekt der Softwareentwicklung nicht im Fokus dieser Arbeit stehen. Um das notwendige Verständnis über die Notwendigkeit der beiden Schritte zu schaffen, soll nichtsdestotrotz kurz erläuternd auf die Aspekte der Entwicklungsmethode (Abschnitt 4.2.1) und der Softwareentwicklung (Abschnitt 4.2.2) eingegangen werden.

4.2.1 Auswahl der Entwicklungsmethode

Prinzipiell werden Entwicklungsprojekte im Bereich der Softwareentwicklung üblicherweise entweder mittels *klassischer* (z. B. Wasserfall-Modell, V-Modell, Spiralmodell), *agiler Methoden* (z. B. SCRUM, eXtreme Programming, Kanban) oder *hybrider Methoden* als Kombination der beiden zuvor genannten durchgeführt [BKS14]. In den vergangenen Jahren sind durch komplexere Softwareanwendungen und zunehmenden Kundenfokus agile Entwicklungsvorgehen in den Fokus der Softwareentwicklung gerückt. Diese bieten u. a. den Vorteil, dass der gesamte Entwicklungsprozess auf die Zufriedenheit der Anwender:innen und die Qualität der Anwendung ausgerichtet ist. Flankierende Tätigkeiten wie die Dokumentation rücken in den Hintergrund. Insbesondere stehen so erprob- bzw. einsetzbare Teilanwendungen frühzeitig zur Verfügung und können so entwicklungsbegleitend mit den relevanten Anspruchsteller:innen erprobt werden. Das Feedback kann direkt in die Entwicklung zurückfließen. [BK21]

Im Hinblick auf den zielgruppenorientierten Charakter der in dieser Arbeit entwickelten Methodik, wird empfohlen, auch für die Entwicklung virtueller LLK agile Methoden einzusetzen oder zumindest eine Entwicklungsmethode zu wählen, die frühzeitige Anwendungstests mit den relevanten Zielgruppen und Anspruchsteller:innen erlaubt. Hierzu kann mit einem sogenannten Minimum-Viable-Product (MVP) gearbeitet werden. Dabei muss die gewählte Entwicklungsmethode für das Gesamtprojekt sowie die beteiligten Teilprojekte angewendet werden.

Die in Abbildung 4.2 dargestellten Anpassungs- bzw. Iterationsschleifen aus dem Gestaltungs- bzw. Integrationsbaustein können sowohl mit einer finalen Produktversion in klassischen Entwicklungsmethoden als auch in einem iterativen, agilen Vorgehen angewendet werden. Bei letzterem werden die einzelnen Methodikschritte durchlaufen und im Anschluss mit dem Softwareinkrement eine Erprobung durchgeführt. Die Erkenntnisse werden in die vorgelagerten Phasen zurückgespielt. Bei grundlegenden, konzeptionell geprägten Mängeln wird in Methodikbaustein I zurückgesprungen und das Vorgehen erneut durchlaufen. Bei gestalterischen Mängeln wird zurück in Methodikbaustein II gesprungen. Das Zurückspringen auf Basis der in der Erprobung gewonnenen Erkenntnisse endet, sobald ein hinreichender Softwarestand erreicht ist. Auf Basis welcher Produkteigenschaften diese Entscheidung erfolgt, wird in Ab-



Abbildung 4.2: Ablauf der Methodik zur kompetenzorientierten Gestaltung und Implementierung virtueller LLK für Lernfabriken, eigene Darstellung.

schnitt 4.5.1 erläutert. Zudem kann innerhalb der Methodikbausteine in den jeweiligen Methodikschritten zurückgesprungen werden. Dies ist immer dann durchzuführen, wenn sich Festlegungen, welche in nachgelagerten Schritten weiterverwendet werden, als nicht hinreichend herausstellen.

4.2.2 Softwareentwicklung

Aus Aufwandsperspektive betrachtet, nimmt die Softwareentwicklung einen nicht unerheblichen Anteil des Entwicklungsaufwandes für virtuelle LLK ein, da die Qualität des Softwareprodukts maßgeblich für dessen Akzeptanz ist. Trotzdem ist die reine softwaretechnische Umsetzung nicht der für die kompetenzorientierte Gestaltung ausschlaggebende Aspekt der Entwicklung. Der Vollständigkeit halber sollen jedoch einige Erläuterungen zu dieser Phase vorgenommen werden.

Prinzipiell ergeben sich für Unternehmen und Organisationen, die Lernfabriken betreiben, im Hinblick auf die Softwareentwicklung zwei grundlegende Möglichkeiten der Umsetzung. Beide sind mit jeweils eigenen Vor- bzw.

Nachteilen verbunden. Zur Auswahl stehen die Eigenentwicklung, bei der die Softwareentwicklung durch die lernfabrikbetreibende Organisation selbst durchgeführt wird, und die Fremdentwicklung, bei der die Softwareentwicklung durch einen externen Dienstleister ausgeführt wird. Nachfolgend werden beide Umsetzungsvarianten kurz beschrieben:

- **Eigenentwicklung:**

Für die Eigenentwicklung von virtuellen Lehr-Lern-Umgebungen spricht, dass der generierte Quellcode prinzipiell zugänglich bleibt und somit auch eine Weiterentwicklung und Anpassbarkeit über einen längeren Zeitraum gegeben ist. Zudem ergibt sich der Vorteil, dass auf Seiten der Programmierer:innen oftmals ein besseres Verständnis für die umzusetzenden Inhalte vorliegt. Insbesondere bei der Verfolgung einer langfristigen Virtualisierungsstrategie kann dies von Vorteil sein. Nachteilig kann sich demgegenüber auswirken, dass die Eigenentwicklung in hohem Maße personelle Ressourcen bindet und unter Umständen die notwendige Expertise im Bereich der Software- bzw. VR-Entwicklung in den lernfabrikbetreibenden Unternehmen und Organisationen nicht vorliegt.

- **Fremdentwicklung:**

Die Fremdentwicklung bildet in vielen Aspekten den Gegenpol zur Eigenentwicklung: Die Erfahrungen auf VR-Entwicklung spezialisierter Unternehmen können zum einen die Qualität der Umsetzung maßgeblich positiv beeinflussen und zum anderen erhebliche Effizienzsteigerungen bei der Softwareumsetzung bieten. Allerdings ist die langfristige Zugänglichkeit der Quellcodes in den meisten Fällen nicht gegeben, da Softwareunternehmen ihre Ergebnisse meist in proprietären Formaten ausliefern. Zudem ist das Verständnis der Programmierer:innen für die umzusetzenden Inhalte in der Tiefe oftmals initial nicht gegeben. An dieser Stelle muss im Fall einer externen Vergabe unter Umständen erheblicher Aufwand für die detaillierte Beschreibung der umzusetzenden Inhalte aufgewendet werden.

Relevante Fragestellungen für die Entscheidung, ob die virtuelle Lehr-Lern-Umgebung extern oder intern entwickelt werden soll, können dementsprechend sein:

- Liegt die notwendige Expertise im Bereich Softwareentwicklung vor?
- Können die entsprechenden personellen Ressourcen in hinreichender Qualität und Quantität bereitgestellt werden?
- Wird ein tiefgreifendes Verständnis der abzubildenden Inhalte bei der Programmierung benötigt?
- Soll die Lehr-Lern-Umgebung langfristig kontinuierlich verändert, erweitert bzw. weiterentwickelt werden?
- Wird Zugang auf den Quellcode benötigt?

4.3 Methodikbaustein I: Rahmenbedingungen

Im ersten Methodikbaustein werden die notwendigen Rahmenbedingungen für das geplante virtuelle LLK definiert. Die Inhalte dieses Abschnitts bauen auf den Arbeiten von TISCH [Ti18] zur kompetenzorientierten Gestaltung von Lernfabriken auf und erweitern diese um die notwendigen Ergänzungen im Kontext virtueller oder hybrider LLK.

Um die relevanten Rahmenbedingungen im späteren Methodikverlauf hinreichend berücksichtigen zu können, müssen drei relevante Aspekte betrachtet werden (s. Abbildung 4.3): Zunächst muss die Initialsituation analysiert werden (Abschnitt 4.3.1). Im Anschluss sind Handlungsfelder für die Virtualisierung der Lernfabrik abzuleiten (Abschnitt 4.3.2). Im letzten Bausteinschritt werden konkrete Anforderungen an das LLK abgeleitet und anschließend kategorisiert sowie priorisiert (Abschnitt 4.3.3).

4.3.1 Initialsituation

Das Vorgehen zur Definition der Initialsituation setzt sich in Anlehnung an das kompetenzorientierte Gestaltungsvorgehen für Lernfabriken nach TISCH (Abschnitt 2.2.3) aus den folgenden Teilschritten zusammen [Ti18]:

1. Definition des organisationalen Umfelds und der Zielen
2. Definition von Zielgruppe(n) und deren Struktur
3. Ableitung intendierter Kompetenzen

Methodikbaustein I: Rahmenbedingungen	
Initialsituation 1.1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definition von organisationalem Umfeld und Zielen ▪ Definition von Zielgruppe(n) und deren Strukturen ▪ Ableitung intendierter Kompetenzen
Handlungsfelder 1.2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bestimmung von Ist- und Sollzustand ▪ Abweichungsanalyse und Identifikation von Herausforderungen ▪ Bestimmung des Handlungsfeldes
Anforderungen 1.3	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ableitung technischer, organisationaler und didaktischer Anforderungen ▪ Kategorisierung und Priorisierung der Anforderungen

Abbildung 4.3: Methodikbaustein I: Rahmenbedingungen, eigene Darstellung.

Insbesondere die Ableitung der intendierten Kompetenzen hat einen erheblichen Einfluss auf die spätere Gestaltung des LLK und der dazugehörigen virtuellen 3D-Umgebung. Das Ergebnis dieses Methodenschritts soll ein belastbares Abbild des Status Quo des eigenen Lernfabrikkonzepts sein.

Definition von organisationalem Umfeld und Zielen

Zunächst muss beschrieben werden, in welchem organisationalem Umfeld sich die Lernfabrik befindet und welche allgemeinen Zielsetzungen mit dem bestehenden Betriebskonzept verfolgt werden. Dieser Schritt ist vor allem deshalb wichtig, da er die spätere Ableitung von Handlungsfeldern und Zielsetzungen (Abschnitt 4.3.2) für den Einsatz von VR erheblich vereinfacht. Zur Strukturierung dieses Schritts kann die Lernfabrik-Morphologie nach TISCH ET AL. [Ti15b] und KRESS ET AL. [Kr23] herangezogen werden. Diese erlaubt eine Einordnung des eigenen Lernfabrikkonzepts in ein verallgemeinertes und standardisiertes Raster. Für die in diesem Methodikschritt betrachteten Aspekte sind insbesondere die Gestaltungsmerkmale der Gestaltungsdimensionen *Betriebsmodell* sowie *Zweck & Zielsetzung* relevant (s. Anhang, Abschnitt A.3.1). Es kann auch die Aufstellung eigener Merkmale erfolgen, welche der individuellen Konkretisierung dienlich sind. Dies ist vor allem deshalb möglich, da die Morphologie für die Selbsteinordnung verwendet wird und weniger als Raster zum Vergleich mit anderen Lernfabriken. Letzteres bedingt die Verwendung einheitlicher Merkmale und Ausprägungen. Auf die relevanten Gestaltungsmerkmale wird nachfolgend eingegangen.

Für virtuelle und hybride Lernfabriken sind die folgenden Primärziele, wie sie nach ABELE ET AL. für physische Lernfabrikkonzepte ableiten lassen, denkbar [Ab15]:

- *Lehre:*
Im Rahmen des Primärziels Lehre wird die Lernfabrik primär für Lehrveranstaltungen im universitären und schulischen Kontext sowie zur Ausbildung eingesetzt.
- *Weiterbildung:*
Im Rahmen des Primärziels Weiterbildung wird die Lernfabrik primär für Schulungs- und Weiterbildungsformate für die Industrie eingesetzt.
- *Forschung:*
Im Rahmen des Primärziels Forschung wird die Lernfabrik primär zur Durchführung von Forschungsaktivitäten (u. a. in Forschungsprojekten) genutzt. Die Lernfabrik dient hier weniger der Vermittlung von Kompetenzen sondern vielmehr als realitätsnahe Versuchsumgebung zur Erprobung und Validierung. Die Verwendung in diesem Kontext bedingt unter Umständen eine höhere Simulationsfähigkeit der Anwendung für dargestellte Zusammenhänge.

Stehen die Primärziele *Lehre* oder *Weiterbildung* im Vordergrund, sind im weiteren Verlauf dieser Methodik zwingend intendierte Kompetenzen abzuleiten. Diese beiden Primärziele stehen im Fokus der aufgezeigten Methodik. Bei Szenarien für das Primärziel *Forschung* kann die Ableitung von intendierten Kompetenzen unter Umständen entfallen. Stattdessen müssen Forschungsziele formuliert werden. Dies hängt maßgeblich davon ab, ob das zu entwickelnde Konzept eine Sekundärnutzung zum Einsatz in Lehre oder Weiterbildung beinhaltet.

Definition von Zielgruppen, -struktur und -strategie

Im nächsten Schritt müssen die *Zielgruppe(n)* wie auch die *Zielgruppenstruktur* und *Zielgruppenstrategie* definiert werden. Dieser Schritt ist vor allem deshalb wichtig, da verschiedene Zielgruppen unterschiedliche Bedürfnisse in der Aufbereitung beziehungsweise Darstellung von Lerninhalten haben können. Diese müssen in den späteren Gestaltungsschritten Berücksichtigung finden. Um den verschiedenartigen Bedürfnissen gerecht werden zu können, ist ein

Bewusstsein über die anzusprechenden Zielgruppen notwendig. Hierzu ist eine Analyse der Zielgruppenstruktur notwendig. Diese erfolgt bei bestehenden Konzepten auf Basis von vorhandenen Daten bzw. bei Neukonzepten auf Basis des organisationalen Umfelds und der Ziele. Unterschiedliche Zielgruppen weisen unterschiedliches Vorwissen auf. Die Berücksichtigung des Vorwissen muss dementsprechend als didaktisches Prinzip beachtet werden.

Betrachtet man zunächst den übergeordneten Aspekt der **Zielgruppe**, so lassen sich ausgehend von den Primärzielen die folgenden übergeordneten Zielgruppen ableiten [Ti15b]:

- *Schüler:innen:*
Für die Zielgruppe der Schüler:innen wird sich in im Zuge der vorgestellten Methodik auf solche der Berufsschulen im Ausbildungszusammenhang fokussiert.
- *Student:innen:*
Bei der Zielgruppe der Student:innen kann zwischen Bachelor-, Master- und Promotionsstudent:innen unterschieden werden.
- *Arbeitnehmer:innen aus der Industrie:*
Bei der Zielgruppe der Arbeitnehmer:innen aus der Industrie kann zwischen Auszubildenden, Facharbeiter:innen, angelernten und ungelerten Arbeiter:innen sowie Manager:innen aus dem unteren, mittleren und Top-Management unterschieden werden.

Sobald definiert wurde, aus welchem Bereich die Teilnehmer:innen stammen, muss darauf aufbauend analysiert werden, aus welchem thematischen Kontext die verschiedenen Anwender:innen entstammen. Dies kann bei Student:innen über den *Ausbildungs-* bzw. *Studiengang*, bei Arbeitnehmer:innen aus der Industrie auf Basis der *Industrie* des entsendenden Unternehmens und bei Forschungsteilnehmer:innen auf Basis des *Forschungsfeldes* bzw. der *Forschungsthemen* geschehen.

Für die **Zielgruppenstruktur** genügt eine Betrachtung in Anlehnung an TISCH ET AL. im Hinblick auf die Zusammensetzungsart der Zielgruppe. Der Begriff der Heterogenität kann neben den zuvor genannten Aspekten auch das vorhandene Vorwissen der Anwender:innen betrachten. Es lassen sich die beiden folgenden Arten unterscheiden [Ti15b]:

- *Homogene Zielgruppenstruktur:*
Eine homogene Zielgruppenstruktur liegt vor, wenn das LLK von gleichartigen Anwender:innen im Sinne der zuvor genannten Aspekte genutzt wird.
- *Heterogene Zielgruppenstruktur:*
Eine heterogene Zielgruppenstruktur liegt vor, wenn das Lehr-Lern-Konzept von verschiedenartigen Anwender:innen im Sinne der zuvor genannten Aspekte genutzt wird. Dies beinhaltet auch das jeweils vorhandene Vorwissen.

Für die Entwicklung des virtuellen LLK ergeben sich zwei **Zielgruppenstrategien**, zwischen denen bei der Weiterentwicklung bestehender Konzepte unterschieden werden kann. Diese sind die Folgenden:

- *Beibehalten der bisherigen Zielgruppen:*
Bei der Strategie des Beibehaltens der bisherigen Zielgruppe wird das Lehr-Lern-Konzept auf die selbe Zielgruppe ausgerichtet, wie das bestehende Konzept. Neue Zielgruppen sollen nicht angesprochen werden.
- *Erschließung neuer Zielgruppen:*
Bei der Strategie der Erschließung neuer Zielgruppen wird das zu entwickelnde Lehr-Lern-Konzept bewusst auf Zielgruppen ausgerichtet, die im bisherigen Konzept nicht aber künftig angesprochen werden sollen.

Wie die beiden genannten Strategien im Detail verfolgt werden können zeigt der folgende Abschnitt zur Ableitung von Handlungsfeldern (Abschnitt 4.3.2).

Ableitung von Lernzielen und intendierten Kompetenzen

Die Ableitung der Lernziele und intendierten Kompetenzen folgt analog zum Gestaltungsansatz nach TISCH und orientiert sich somit an der Kompetenzdefinition aus Abschnitt 2.1.3 [Ti18]. Hierfür sind zum einen der *vertikale* und *horizontale Abbildungsumfang* (Abschnitt A.3.2) und zum anderen die intendierten Kompetenzen in Form einer sogenannten Kompetenzmatrix zu definieren [AMT18; Ti18]. Eine Darstellung des Abbildungsumfangs sowie einer Kompetenzmatrix können dem Anhang entnommen werden (Abschnitt A.3.2 und Abschnitt A.4.1).

4.3.2 Handlungsfelder

Nachdem im ersten Schritt die Initialsituation definiert wurde, wird im folgenden Bausteinschritt eine konkrete und möglichst detaillierte Zielsetzung für den VR-Einsatz erarbeitet werden. Diese stellt sicher, dass die Implementierung unter gewissenhafter Berücksichtigung aller relevanten Entscheidungsparameter und einer konkreten Zielsetzungsvorstellung erfolgt. Zu diesem Zweck werden insbesondere die folgenden Aspekte betrachtet:

1. Identifikation von Herausforderungen
2. Ableitung des Handlungsfeldes
3. Detaillierung der Zielsetzung

Die vorgeschlagene Vorgehensweise ermöglicht eine schrittweise Annäherung an bestehende Herausforderungen des individuellen Lernfabrikkonzepts und die potentiellen Handlungsfelder zum Einsatz von VR. Die einzelnen Aspekte werden in den nachfolgenden Unterabschnitten detailliert dargestellt.

Identifikation von Herausforderungen

Zunächst muss festgestellt werden, welche konkreten Herausforderungen im Hinblick auf das LLK bestehen oder zu erwarten sind. Herausforderungen können in diesem Zusammenhang als Potentiale für die zu entwickelnde VR-Umgebung verstanden werden. Wie in Abbildung 4.4 dargestellt, gehen die bestehenden und zukünftigen Zielgruppen, Lernziele und intendierten Kompetenzen sowie das organisationale Umfeld in die Betrachtung mit ein. Bei bestehenden Konzepten können ergänzende Informationen aus den bisherigen Erfahrungen (z. B. der Trainer:innen, der Teilnehmer:innen) gewonnen werden. Auf dieser Basis wird ein Soll-Ist-Vergleich vorgenommen und die jeweiligen Abweichungen identifiziert. Aus den Abweichungen werden im Anschluss relevante Herausforderungen abgeleitet.

Ableitung des Handlungsfeldes

Um den VR-Einsatz möglichst herausforderungs- und lösungsorientiert zu gestalten, muss festgelegt werden, welche potentiellen Handlungsfelder sich aus den zuvor identifizierten Herausforderungen ergeben. Die einzelnen Herausforderungen werden hierzu gewichtet und priorisiert. Die Bewertung er-

Soll	Ist	Abweichung	Herausforderung
Soll-Zustand 1 (S_1)	Ist-Zustand 1 (I_1)	Abweichung 1 (A_1)	Herausforderung 1.1 ($H_{1,1}$)
			...
			...
...

Abbildung 4.4: Matrix zur Ableitung von Herausforderungen, eigene Darstellung.

folgt durch Expert:innengespräche. Eine Priorisierung für den eigenen Kontext findet dann durch einen Paarvergleich [BT52; Mü11] oder ein sog. Direct Ranking statt. Bei ersteren werden die Herausforderungen jeweils mit den übrigen verglichen und Aussagen darüber getroffen, ob das erstgenannte Kriterium wichtiger, gleichwichtig oder weniger wichtig als das zu vergleichende ist [BT52; Mü11]. Beim sogenannten Direct Ranking werden die verschiedenen Herausforderungen direkt bewertet. Alternativ können Handlungsfelder bei offensichtlichen Schwerpunkten direkt ausgewählt werden. Für die weitere Gestaltung soll eines oder mehrere Handlungsfelder ausgewählt werden. Die einzelnen Handlungsfelder basieren auf den Limitation von Lernfabriken nach TISCH ET AL. [TM17] und werden aufbauend auf den in Abschnitt 2.2.2 getätigten Erläuterungen nachfolgend dargestellt sowie durch Handlungsfelder im Kontext von VR erweitert:

- *Ressourceneffizienz:*

In VR kann eine realitätsgetreue Produktion mit wesentlich geringerem Ressourcenverbrauch abgebildet werden [TM17; We16]. Die physische Bereitstellung und der reale Betrieb des Wertstroms kann entfallen. Dies reduziert die Ressourcenverbräuche für den initialen Aufbau der Infrastruktur (z. B. Lernfabrikgebäude, Maschinen und Anlagen) sowie den Betrieb und die Instandhaltung (z. B. Verbrauchsmaterialien, Rohmaterialien und Energie).

- *Abbildungsfähigkeit:*

VR erweitert den Möglichkeitsraum für die Abbildbarkeit und kann Zugang zu einer beliebigen Anzahl beliebig großer und komplexer Umgebungen ermöglichen [TM17]. Dabei kann zudem in der virtuellen Welt

mit physikalischen Grundsätzen gebrochen und die Manipulation von Raum und Zeit ermöglicht werden (z. B. schnellerer Ablauf der Zeit, Vergrößerung von Details sowie schnellere Implementierung und Darstellung von Lösungsansätzen). Zudem werden neue Darstellungsformen denkbar. Weiter können ansonsten unzugängliche Bereiche (z. B. aufgrund von Arbeitssicherheitsaspekten) abgebildet werden.

- *Skalierbarkeit:*
Multiplayer-fähige virtuelle LLK können die Skalierbarkeit erweitern. Einschränkend wirkt jedoch, dass die notwendigen Hardwarekomponenten in hinreichender Anzahl zur Verfügung stehen müssen und das didaktische Konzept auf die Teilnehmer:innenzahl abgestimmt sein muss.
- *Mobilität:*
Durch den Einsatz von VR können realitätsgetreue LLK mobil gestaltet werden. Dieser Umstand muss insbesondere bei der Hardware-Auswahl beachtet werden.
- *Effektivität:*
Durch VR können, je nach vorhandenem Konzept, effektivere LLK entwickelt werden. Dieser Umstand ist eng mit den Aspekten der Abbildungsfähigkeit, Interaktivität und Realitätsnähe verbunden. Die Effektivität kann durch die Bereitstellung sogenannter Transferszenarien zusätzlich gesteigert werden.
- *Interaktivität:*
Inwiefern die Interaktivität durch den Einsatz von VR gesteigert werden kann, hängt maßgeblich von der bereits vorhandenen Lernumgebung ab. Wie in Abschnitt 2.2 dargelegt, können Lernfabriken auf verschiedene Weisen gestaltet werden. VR bietet in diesem Handlungsfeld neue Möglichkeiten (z. B. Interaktionsformen in sicherheitskritischen Bereichen; Interaktionsformen durch Fabrikelemente, die bisher physisch nicht dargestellt werden konnten; Interaktionsformen durch Methoden, die bisher mangels Infrastruktur oder Ausstattung nicht geschult werden konnten).
- *Realitätsnähe:*
Durch VR kann, je nach vorhandenem Konzept, die Realitätsnähe zielgruppen- und bedarfsgerecht gewählt werden. Durch verschiedene Dar-

stellungsweisen (z. B. photorealistisch oder abstrahiert) kann die für den Kontext passende Realitätsnähe gewählt werden.

- *Adaptivität und Personalisierbarkeit:*

Das Handlungsfeld der Adaptivität- und Personalisierbarkeit wird ergänzend zu den aus TISCH [TM17] abgeleiteten Handlungsfeldern eingeführt. Durch VR kann auf individuelle Leistungsniveaus, Lerntypen und Unterstützungsbedarfe der Anwender:innen eingegangen werden. Dies beinhaltet auch die Inklusion von Menschen mit Beeinträchtigungen [Po18]. Zum einen können verschiedene Lehr-Lern-Umgebungen angeboten werden, aus denen die Teilnehmer:innen eine auswählen können. Zum anderen werden Schwierigkeitsgrade und Darstellungsformen ermöglicht, die sich durch unterschiedliche Gestaltungselemente oder Hilfestellungen manifestieren (Abschnitt 4.4.3).

- *Flexibilität*

Durch virtuelle LLK kann den Teilnehmer:innen Flexibilität im Hinblick auf Ort und Zeit geboten werden.

Die Herausforderungen und Handlungsfelder werden im folgenden Methodikschritt (Abschnitt 4.3.3) in konkrete Anforderungen übersetzt.

Detailierung der Zielsetzung

Um die Handlungsfelder durch den VR-Einsatz bestmöglich adressieren zu können, sind weitere Betrachtungen notwendig. Demzufolge ist eine weitere Detailierung durchzuführen, wie das geplante LLK die Herausforderungen, welche in Zusammenhang mit dem Handlungsfeld stehen, adressieren soll. Dabei sind jeweils aktuell gültige technologiebezogenen Restriktionen in die Überlegungen miteinzubeziehen. Dies ist notwendig, da VR selbst gewissen Limitationen (z. B. Abbildung haptischer Eindrücke) unterworfen ist, sich gleichzeitig aber stetig weiterentwickelt und dadurch neue Möglichkeiten eröffnet werden.

4.3.3 Anforderungen

Im letzten Methodikschritt des ersten Methodikbausteins müssen konkrete Anforderungen an das geplante LLK definiert werden. Diese beziehen sich prinzipiell auf die folgenden drei Bereiche [Ri20b]:

- Technische Anforderungen
- Organisatorische Anforderungen
- Didaktische Anforderungen

Aufgrund der Komplexität und Menge der Anforderungen ist es von hoher Bedeutung diese von Beginn an zu systematisieren. Wie die Anforderungen abgeleitet und anschließend bewertet werden können, soll nachfolgend dargestellt werden. Zu diesem Zweck müssen insbesondere die folgenden Aspekte betrachtet werden:

1. Ableitung und Kategorisierung der Anforderungen
2. Bewertung der Anforderungen

Ableitung und Kategorisierung der Anforderungen

Zunächst müssen Anforderungen abgeleitet werden, die für das zu entwickelnde LLK relevant sind. Je detaillierter und ganzheitlicher die Anforderungen beschrieben sind, desto einfacher ist die spätere Softwareumsetzung zu realisieren. Die Anforderungen ergeben sich dabei maßgeblich aus den bereits getätigten Definitionen zu organisationalem Umfeld und organisationalen Zielen, den intendierten Kompetenzen sowie den Handlungsfeldern und den zugehörigen Detaillierungen. Weitere Anforderungen können aus der Literatur, aus Expert:innen- und Anspruchsteller:inneninterviews sowie aus bestehenden Konzepten abgeleitet werden. Die Entwicklung und Sammlung der Anforderungen erfolgt dabei im Projektteam und sind tabellarisch in einer Anforderungsmatrix zu dokumentieren. Dabei ist zu beachten, dass die An-

Anforderung	Kategorie	Beschreibung	Bewertung	
			Kano	Aufwand
Anforderung (A ₁)	Technisch	Beschreibung	Basismerkmal	...
Anforderung (A ₂)	Didaktisch	...		
...
...

Abbildung 4.5: Bewertungsmatrix für Anforderungen und Produktmerkmale, eigene Darstellung.

forderungen bereits zu Beginn in die oben genannten Kategorien (technisch, didaktisch und organisatorisch) eingeordnet und mit einer aussagekräftige Beschreibung versehen werden. Eine Liste mit allgemeinen Anforderungen findet sich im Anhang (Abschnitt A.4.2).

Bewertung von Anforderungen

Die definierten Anforderungen müssen bewertet und für die spätere Softwareumsetzung priorisiert werden. Zweckdienlich ist hier die Überführung in Produktmerkmale und Bewertung derselben mittels des Kano-Modells. Dieses ermöglicht eine für die Softwareentwicklung verständliche Einordnung in die nachfolgenden Kategorien [Ka84]:

- *Basismerkmal:*
Diese Merkmale führen bei Anwesenheit im Produkt nicht zu Zufriedenheit bei den Anwender:innen; die Abwesenheit führt jedoch zu Unzufriedenheit.
- *Eindimensionale Merkmale*
Diese Merkmale führen zu Zufriedenheit, wenn sie im Produkt erfüllt sind, und zu Unzufriedenheit, wenn sie nicht erfüllt werden.
- *Attraktivitätsmerkmale:*
Diese Merkmale führen zu Zufriedenheit, wenn sie im Produkt erfüllt sind, eine Abwesenheit führt jedoch nicht zu Unzufriedenheit.
- *Indifferenzmerkmale:*
Diese Merkmale führen weder zu Zufriedenheit noch zu Unzufriedenheit, unabhängig davon, ob sie im Produkt erfüllt sind oder nicht.
- *Inverse Merkmale:*
Diese Merkmale wirken in entgegengesetzter Richtung der Attraktivitätsmerkmale. Eine Erfüllung dieser Merkmale schafft Unzufriedenheit, wohingegen eine Nichterfüllung nicht zu Zufriedenheit führt.

Für die Einordnung werden relevante Anspruchsteller:innen (z. B. potentielle Teilnehmer:innen und Lernfabriktrainer:innen) oder/und Expert:innen im Bereich Lernfabriken, Didaktik und Lehre zu ihrer Bewertung bezüglich der verschiedenen Produktmerkmalen befragt. Produktmerkmale können dabei aus einzelnen oder mehreren, in ein Merkmal zusammengefassten Anforderungen bestehen. Die abzufragenden Merkmale sind so zu wählen, dass sich

die Bedeutung des Merkmals den Befragten einfach erschließt. Die Bewertung erfolgt im Kano-Modell mittels sogenannter *funktionaler*¹ und *disfunktionaler Fragen*² [Ka84].

Da jedes Merkmal über zwei Bewertungen überprüft wird, ist bei der Befragung darauf zu achten, dass die Anzahl an abzufragenden Merkmalen möglichst gering gehalten wird. Dabei ist eine Abwägung zwischen Detaillierungsgrad und Umfang des Fragebogens durchzuführen. Bei Bedarf können verschiedene Merkmale durch unterschiedliche Anspruchsteller:innengruppen bewertet werden.

Weiter müssen die Merkmale im Hinblick auf die Umsetzbarkeit sowie den Implementierungsaufwand überprüft werden. Dies hat in enger Abstimmung mit den Softwareentwickler:innen zu geschehen. Ergibt die Prüfung, dass bestimmte Anforderungen oder Merkmale prinzipiell oder im vorgegebenen Projektrahmen nicht umsetzbar sind, müssen diese überarbeitet und realisierbare Alternativen erarbeitet werden. Zur Bewertung des Implementierungsaufwandes wird auf das sogenannte *Planning Poker* zurückgegriffen. Die Bewertung des Aufwands findet hier in Gruppen auf Basis fester Zahlenwerte statt. Die einzelnen Personen bewerten zunächst unabhängig den Aufwand. Bei Diskrepanzen in der Bewertung erläutern die niedrigst- und höchstbewertende Personen ihre Bewertung. Im Anschluss findet einer neuer Bewertungsdurchlauf statt. [Gr02; MH12]

4.4 Methodikbaustein II: Kompetenzorientierte Gestaltung

Der zweite Methodikbaustein hat die kompetenzorientierte Gestaltung des virtuellen LLK zum Ziel und baut auf den in Methodikbaustein I getroffenen Festlegungen zu Handlungsfeldern (Abschnitt 4.3.2) und Anforderungen (Abschnitt 4.3.3) auf. Im ersten Schritt wird hierzu die verwendete VR-Hardware (Abschnitt 4.4.1) ausgewählt. Darauf aufbauend wird die übergeordnete Kon-

¹ *Funktionale Frage*: Wenn das Produkt das Merkmal X beinhaltet, wie würde Ihnen das gefallen?

² *Disfunktionale Frage*: Wenn das Produkt das Merkmal X nicht beinhaltet, wie würde Ihnen das gefallen?

figuration des Szenarios festgelegt (Abschnitt 4.4.2) und abschließend durch eine Detailgestaltung (Abschnitt 4.4.3) konkretisiert.

Methodikbaustein II: Kompetenzorientierte Gestaltung	
Hardware II.1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erstellung eines Hardwareportfolios ▪ Priorisierung relevanter Spezifikationen ▪ Organisatorische, didaktische und technische Selektion
Konfiguration II.2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ableitung und Bewertung möglicher Szenarioalternativen ▪ Definition kompetenzrelevanter Szenarioelemente ▪ Aufteilung physischer und virtueller Raum
Detailgestaltung II.3	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ableiten potentieller Gestaltungsalternativen ▪ Auswahl geeigneter Gestaltungselemente ▪ Bildung von Gestaltungselementpaketen

Abbildung 4.6: Methodikbaustein II: Kompetenzorientierte Gestaltung, eigene Darstellung.

4.4.1 Hardware

Für die das virtuelle LLK ist frühzeitig geeignete VR-Hardware auszuwählen. Für VR-Systeme ist es charakteristisch, dass ein vergleichsweise großer Lösungsraum besteht. Dies betrifft zum einen den Umfang benötigter und erweiterbarer Hardwarekomponenten, die verschiedenen Trackinglösungen, die Anzahl an Freiheitsgraden sowie die technischen Spezifikationen der Ausgabegeräte (insbesondere hinsichtlich Auflösung, Bildrate, Sichtfeld und Audioausgabe). Auf das hierfür notwendige Auswahlvorgehen wird im Nachfolgenden detailliert eingegangen.

Hardwareportfolio

Um eine fundierte Auswahl treffen zu können, muss zunächst ein allgemeiner Überblick über die *Marktsituation* geschaffen werden. Hierzu ist das aktuelle Angebot an VR-Systemen zu sichten und tabellarisch zu dokumentieren. In den Anforderungen definierte *Hardwareparameter* sind zu berücksichtigen und werden später für die Bewertung der Alternativen verwendet. Dabei soll bereits bei Erstellung des Hardwareportfolios eine erste Vorselektion stattfinden [RKM22]. Ein exemplarisches Hardwareportfolio ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

Modell	Leistungsklasse	Spezifikation 1 ... N			Preis
VR-System 1	Rechnergebunden
VR-System 2	Eigenständig
...

Abbildung 4.7: Exemplarisches Hardwareportfolio, eigene Darstellung.

Organisatorische Selektion

Die organisatorische Selektion umfasst neben der *VR-Strategie* auch die *Mobilitätsplanung* und die Auswahl der *Systemklasse* [RKM22]. Nachfolgend werden diese kurz beschrieben (s. Abbildung 4.8):

1. *VR-Strategie*:

Hierzu wird zunächst eine der drei Grundstrategien für die Implementierung ausgewählt. Hier ist neben einer zukünftig physischen Lernfabrik mit wenig virtuellen Szenarien auch die Ausrichtung als hybride oder gänzlich virtuelle Lernfabrik, welche eine Vielzahl virtueller Szenarien anbietet, denkbar. Die Auswahl wird auf Basis der langfristigen Weiterentwicklungsstrategie getroffen.

2. *Mobilitätsplanung*:

Weiterhin muss definiert werden, ob die VR-Hardware stationär in einem fest definierten Raum oder mobil innerhalb bzw. außerhalb der Lernfabrik verwendet werden soll. Dies ist maßgeblich für die Entscheidung, welcher Aufwand für die Inbetriebnahme bzw. Nutzung vertretbar ist. Soll das Handlungsfeld Mobilität adressiert werden, ist ein mobiler Einsatz vorzusehen.

3. *Systemklasse*:

Auf Basis der beiden vorhergehenden Festlegungen kann eine Entscheidung über die Systemklasse (Abschnitt 2.3.2) getroffen werden. Hier stehen eigenständige oder rechnergebundene Systeme zur Auswahl. Insbesondere bei geplanter Adressierung des Handlungsfeldes *Mobilität* sind eigenständige gegenüber rechnergebundenen Geräten zu bevorzugen.

Physische Lernfabrik	Hybride Lernfabrik	Virtuelle Lernfabrik
Virtual Reality wird isoliert in einem spezifischen Modul oder rein zu Demonstrationszwecken eingesetzt. Eine Erweiterung ist nicht vorgesehen.	Virtual Reality wird für mehr als ein Modul vorgesehen. Eine Ausweitung der Nutzung ist möglich.	Virtual Reality wird für eine Vielzahl an Modulen vorgesehen. Eine Ausweitung der Nutzung und der langfristige Einsatz sind zentrale Vorhaben.
mobiler & stationärer Einsatz	stationärer Einsatz	
Eigenständige Geräte		Rechnergebundene Geräte

Abbildung 4.8: Hardwareauswahl: Organisatorische Selektion, eigene Darstellung basierend auf [RKM22].

Didaktische Selektion

Die didaktische Selektion geschieht auf Basis der durchzuführenden Handlungen. Das auszuwählende Trackingsystem muss in der Lage sein, diese Handlungen zu erkennen und die Bewegungen in den virtuellen Raum zu übertragen. Die im Rahmen der Kompetenzdefinition ausgewählten Handlungen bestimmen somit die vom System abgebildeten Freiheitsgrade. Handlungen können dabei, wie in Abbildung 4.9 gezeigt, in drei Kategorien (*passive*, *semi-aktive* und *interaktive* Handlungen) eingeteilt und in der Taxonomie nach BLOOM [Bl56] eingeordnet werden.

Für die verschiedenen Handlungsarten können somit unterschiedliche Systemklassen als geeignet angesehen werden. Für *aktive Handlungen* bieten sich

Passive Handlungen	Semi-aktive Handlungen	Aktive Handlungen
Begriffe wie: Analysieren, Beobachten, Untersuchen, Erkennen, Ermitteln, Finden, Prüfen, Evaluieren, Kennzeichnen, ...	Begriffe wie: Auswählen, Verändern, Optimieren, Zuweisen, Anwenden, ...	Begriffe wie: (Aus-)Probieren, Nehmen, Verschieben, Gestalten, Platzieren, Erstellen, Konstruieren, ...
Kopf: Umherschauen → 3 DOF Hand: Zeigen, Wählen → 3 DOF	Kopf: Perspektiven → 6 DOF Hand: Zeigen, Wählen → 3 DOF	Kopf: Perspektiven → 6 DOF Hand: Eingreifen → 6 DOF

Abbildung 4.9: Handlungsarten und dazugehörige Taxonomien, eigene Darstellung basierend auf [RKM22].

rechnergebundene HMD mit Trackingstationen an. Für *semi-aktive Handlungen* und *passive Handlungen* sind beide Systemklassen geeignet.

Technische Selektion

Sollten nach der didaktischen Selektion noch mehr als ein VR-System zur Auswahl stehen, ist eine technische Selektion durchzuführen. Diese befasst sich mit den für die Anwender:innen relevanten visuellen und auditiven Spezifikationen der VR-Hardware. Die technische Selektion muss sich, wie bereits die didaktische Selektion, an den intendierten Kompetenzen und damit zusammenhängenden Handlungsaufgaben ausrichten. Hierfür stehen prinzipiell drei Vorgehensvarianten zur Auswahl [RKM22]:

- *Gewichtete Berücksichtigung:*
Konzeptspezifisch können bestimmte Ausgabeparameter relevanter sein als andere (z. B. hohe Auflösung für Darstellung detailreicher Objekte). In diesem Fall können einzelne Parameter höher oder niedriger gewichtet werden als andere.
- *Gleichwertige Berücksichtigung:*
Können aus dem bisherigen Projektkontext keine Prioritäten hinsichtlich einzelner Ausgabeparameter (z. B. Auflösung, Bildrate, Sichtfeld, Audioausgabe) abgeleitet werden, gehen die einzelnen Parameter ungeachtet in den Selektionsprozess ein.
- *Ausgabeparameter ignorieren:*
Die Ausgabeparameter werden nicht berücksichtigt. In diesem Fall entscheidet der niedrigste Anschaffungspreis.

Die Ausgabeparameter dürfen nur dann ignoriert werden, wenn insbesondere im Hinblick auf die visuelle und auditive Darstellungsqualität keine besonderen Anforderungen bestehen. Dies betrifft auch die Auswahlmethodik der gleichwertigen Einbeziehung. Sobald bspw. eine möglichst fotorealistische Darstellung (z. B. weil kleinste Details der virtuellen Umgebung erkannt werden müssen) oder eine hochwertige Audioausgabe (z. B. für das Erkennen und Zuordnen von Geräuschen) für das LLK relevant sind, wird die Verwendung einer gewichteten Einbeziehung empfohlen. Die Bewertung findet für die beiden Alternativen unter Einbeziehung der Ausgabeparameter (gleichwertige oder gewichtete Einbeziehung) mittels einer Nutzwertanalyse statt. Die Aus-

wahl kann entweder auf Basis des höchsten Nutzwertes oder auf Basis des besten Kosten-Nutzen-Verhältnisses stattfinden [RKM22]. Bei Bestimmung der Systemkosten ist auf Vergleichbarkeit zu achten (z. B. können relevante Komponenten bei einem System im HMD enthalten sein, müssen bei einem anderen jedoch als Zubehör erworben werden).

Sollte bereits ein VR-System vorhanden sein, ist zu prüfen, ob das bestehende System für das geplante LLK in Frage kommt (z. B. kann ein vorhandenes rechnergebundene VR-System für die zukünftige Adressierung des Handlungsfeldes Mobilität u. U. nicht in Frage kommen).

Modell	Spezifikation 1 ... N			Preis	Nutzwert
VR-System 1
VR-System 2
...

Abbildung 4.10: Nutzwertmatrix für die Bewertung der Hardwarealternativen, eigene Darstellung basierend auf [RKM22].

4.4.2 Szenariokonfiguration

Aufbauend auf den zuvor getroffenen Festlegungen muss im nächsten Methodikschritt das virtuelle LLK konfiguriert werden. Hierunter wird im Kontext dieses Kapitels die übergeordnete inhaltliche Gestaltung des Szenarios verstanden.

Die Szenariokonfiguration ist in ihren prinzipiellen Grundzügen angelehnt an die Gestaltung einer physischen Lernfabrik auf der Mikro-Ebene (Abschnitt 2.2.3). Da VR jedoch diverse Eigenheiten beinhaltet, müssen ergänzende Betrachtungen vorgenommen werden. Diese beziehen sich auf den *Umfang der dargestellten Lerninhalte* wie auch die *virtuelle Welt*. Inhalte die in den beiden genannten Aspekten zu beachten sind, werden nachfolgend beschrieben:

- *Umfang der dargestellten Lerninhalte:*
Beachtet werden muss im virtuellen Konzept vor allem die Aufenthaltsdauer von Anwender:innen in der virtuellen Welt. Mit zunehmender

Aufenthaltsdauer steigt die Wahrscheinlichkeit für Ermüdungserscheinungen und andere physische Reaktionen. [Re15] Dieser Umstand kann in hybriden Konzepten bspw. durch die Aufteilung von Lerninhalten zwischen virtueller und physischer Realität begegnet werden. Alternativ können Lerninhalte auf mehrere in sich abgeschlossene und abgegrenzte Teilszenarien (sogenannte Level) aufgeteilt werden. Zudem kann durch die Anzahl der dargestellten Prozesse oder die Größe der virtuellen Lernumgebung auf den Darstellungsumfang eingewirkt werden.

- *Virtuelle Welt:*

Aufgrund des verminderten Sichtfeldes und anderer technologiebedingter Anzeigemodalitäten ist die Übersichtlichkeit im Vergleich zur realen Welt eingeschränkt. Dies kann eine Beschränkung der Anzahl und Dichte der Inhalte in der virtuellen Umgebung bedingen. Für die virtuelle Welt sollen auch Personalisierbarkeits- und Adaptivitätsmerkmale beachtet werden, sofern diese Aspekte im Vorfeld als Handlungsfeld identifiziert wurden.

Ableitung von Szenarioalternativen

Im ersten Schritt sind auf Basis der definierten Handlungsfelder, Zielgruppen und -strukturen sowie Lernziele und Kompetenzen geeignete Szenarioalternativen abzuleiten. Die Szenarioalternativen werden zur Adressierung der zuvor definierten Handlungsfelder, Anforderungen und Zielsetzungen konzipiert. Gleichzeitig ist die bestmögliche Eignung für die ausgewählten Zielgruppen zu berücksichtigen. Die zu entwickelnden Szenarioalternativen beinhalten dabei zunächst die grobe Ausrichtung der Szenarien zur Adressierung der zuvor genannten Aspekte. Hierzu ist insbesondere die inhaltliche Ausrichtung (z. B. Umfang, abgebildete Industrie, abgebildete Produkte) zu bestimmen. Dazu wird zunächst auf Basis des Handlungsfeldes und der zu adressierenden Zielgruppe die abzubildende Industrie bestimmt. Im zweiten Schritt wird unter Zuhilfenahme der Lernziele und intendierten Kompetenzen das abzubildende Produkt und der Umfang der Lernumgebung bestimmt. In diesem Zusammenhang muss auch die prinzipielle Ausrichtung der virtuellen Welt auf Basis der intendierten Kompetenzen abgeleitet werden. In der Literatur werden *Trainings-, Explorations-, Konstruktions- und Wahrnehmungswelten* beschrieben [BK20]. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird der Begriff der *Trans-*

ferwelten ergänzt, der als Unterkategorie der zuvor genannten einzuordnen ist. Die Begriffe werden nachfolgend beschrieben:

- *Trainingswelten:*
Trainingswelten akzentuieren das Erlernen und Einüben von handlungsbezogenen Fertigkeiten und Abläufen. Hierzu muss das Szenario mit seinen Elementen alle relevanten Handlungen und Durchführungsschritte abbilden. [BK20]
- *Explorationswelten:*
Explorationswelten dienen dem eigenständigen Explorieren der virtuellen Umgebung und deren Objekte. [BK20]
- *Konstruktionswelten:*
In Konstruktionswelten steht das eigene Konstruieren im Fokus. In diesen Umgebungen können Anwender:innen eigene Welten, Objekte und deren Zusammenhänge konstruieren. [BK20]
- *Wahrnehmungswelten:*
Wahrnehmungswelten erlauben den Anwender:innen Zugang zu in der Realität nicht wahrnehmbaren Aspekten. Dabei können nicht erreichbare, zu kleine oder zu schnelle bzw. langsame Objekte wahrnehmbar gemacht werden. [BK20]
- *Transferwelten:*
In Transferwelten werden den Anwender:innen neuartige Problemsituationen im Vergleich zur zuvor verwendeten Lernumgebung darstellen. [DKM15]

Für eine hohe Akzeptanz bietet es sich an, verschiedene Produkte oder Industrien rudimentär zu skizzieren und die Eignung dann von Expert:innen oder Anwender:innen bewerten zu lassen. Als Bewertungskriterien eignen sich insbesondere die Folgenden [Ri21a; RM22b]:

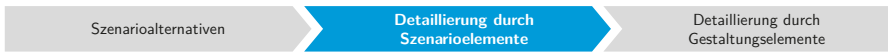
- *Zielgruppeneignung:*
Die Szenarien sollen die im Vorfeld definierten Zielgruppen inhaltlich adressieren können. Dabei ist auch das zu erwartende Vorwissen der Anwender:innen innerhalb der Zielgruppen zu berücksichtigen. Soll das Szenario als sogenanntes Transferszenario entwickelt werden, kann bewusst eine Abweichung vom bekannten Umfeld der Teilnehmer:innen gewählt werden.

- *Abbildbarkeit der Lernziele und Kompetenzen:*
Weiterhin muss sichergestellt sein, dass das Szenario alle Lernziele und intendierte Kompetenzen bestmöglich adressieren kann (Abschnitt 4.3.1). Hier sind technische Limitationen von VR zu berücksichtigen und gegebenenfalls Alternativkonzepte zu erarbeiten. In hybriden Konzepten ist die Möglichkeit gegeben, in VR nicht abbildbare Aspekte in den physischen Raum auszulagern.
- *Attraktivität des Szenarios:*
Neben der Abbildung aller kompetenzrelevanter Elemente ist auch die Attraktivität des Szenarios für die Anwender:innen von Bedeutung. Die Umgebung soll die Teilnehmer:innen zur Benutzung motivieren.
- *Verständlichkeit:*
Das Szenario soll so konfiguriert werden, dass es für die Anwender:innen schnell erfassbar und vom Aufbau verständlich ist.
- *Mehrwert zum bestehenden Szenario:*
Im Hinblick auf bestehende Konzepte soll eine Betrachtung stattfinden, welchen Mehrwert das virtuelle Szenario im Vergleich zu bestehenden Szenarien bietet. Wird das virtuelle Szenario bspw. als Transferszenario verwendet, soll es sich in hinreichendem Maß vom bestehenden Szenario abgrenzen.

Für die Bewertung durch Expert:innen und Anwender:innen werden die Bewertungskriterien zunächst gewichtet. Im nächsten Schritt erfolgt die letztendliche Bewertung der Szenarioalternativen [Ri21a; RM22b]. Beide Bewertungsaspekte werden durch einen *Paarvergleich* [BT52; Mü11] oder ein *Direct Ranking* innerhalb des Projektteams durchgeführt.

Ableitung von Szenarioelementen

Die so ausgewählten Szenarioalternativen werden im weiteren unter zu Hilfenahme der in Methodikbaustein I abgeleiteten Handlungsfelder sowie der Kompetenzmatrix durch Szenarioelemente detailliert. Szenarioelemente sind dabei alle Inhalte des Szenarios, die konkretisieren, *was* dargestellt werden soll. Die Definition, *wie* die einzelnen Inhalte dargestellt werden sollen, erfolgt im nachfolgenden Methodikschritt der *Detailgestaltung* (Abschnitt 4.4.3). Für die Ableitung von Szenarioelementen bietet es sich an, sich am geplanten Um-



The diagram shows a process flow starting with 'Szenarioalternativen' (Scenario Alternatives) in a grey arrow, leading to 'Detaillierung durch Szenarioelemente' (Detailing through Scenario Elements) in a blue arrow, which then leads to 'Detaillierung durch Gestaltungselemente' (Detailing through Design Elements) in a grey arrow.

Szenarioalternativen	Szenarioelemente		Ort	
			Virtuell	Physisch
Szenarioalternative 1 (SzA ₁)	Szenarioelement (SE _{1,1})	Beschreibung SE _{1,1}	X	

	Szenarioelement (SE _{1,N})	...		X
...

Abbildung 4.11: Matrix zur Beschreibung von Szenarioalternativen und deren -elementen, eigene Darstellung.

gebungstyp auf Basis der intendierten Kompetenzen zu orientieren. Virtuelle Umgebungen lassen sich, wie in Abschnitt 2.3.3 beschrieben, in *Trainings-, Konstruktions-, Explorations- und Wahrnehmungswelten* unterteilen.

Für jedes der Szenarioelemente soll zudem im Rahmen hybrider Konzepte definiert werden, ob das jeweilige Element im *physischen* oder im *virtuellen Raum* abgebildet werden soll.

Die Ergebnisse des Methodikschritts der Szenariokonfiguration werden in tabellarischer Form festgehalten (s. Abbildung 4.11). Zudem können Pläne des umzusetzenden Umgebungslayouts erstellt werden, welche den Softwareentwickler:innen als Anhaltspunkt für die räumliche Gestaltung dienen.

4.4.3 Detailgestaltung

Die Detailgestaltung des virtuellen LLK erfolgt aufbauend auf die im vorgelegten Schritt erstellte Szenariokonfiguration. Wurde bei der Konfiguration des Szenarios vor allem festgelegt, *was* dargestellt werden soll, befasst sich die Detailgestaltung vor allem mit den Festlegungen *wie* bestimmte Inhalte dargestellt werden sollen. Dies entspricht der zweiten didaktischen Transformation im Gestaltungsansatz nach TISCH [Ti18]. Um der damit zusammenhängenden Entscheidungskomplexität begegnen zu können, bedarf es eines strukturierten Vorgehens, das im Folgenden dargestellt werden soll.

Gestaltungselemente

Im Rahmen der Detailgestaltung findet der Begriff der *Gestaltungselemente* Verwendung. Zunächst soll definiert werden, was unter einem Gestaltungselement (GE) im Sinne dieser Arbeit verstanden wird. Wie eingangs erwähnt wurde, werden in einer virtuellen Szenarioalternative (SzA) eine Vielzahl an Szenarioelementen (SE) (z. B. Objekte der virtuellen Umgebung, Interaktionen, Hilfestellungen, Handlungsaufgaben) dargestellt. Für die jeweiligen Szenarioelemente sind verschiedene Darstellungsformen denkbar. Ein Gestaltungselement im Sinne dieser Forschungsarbeit beschreibt die individuelle Ausprägungsform eines bestimmten Szenarioelements einer ausgewählten Szenarioalternative (s. Abbildung 4.12).

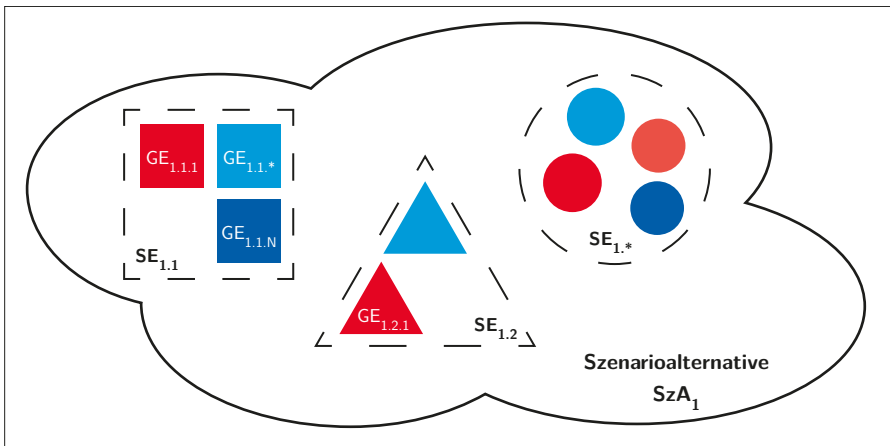


Abbildung 4.12: Zusammenhang zwischen Szenarioalternativen, -elementen und Gestaltungselementen, eigene Darstellung.

Erfolgsfaktoren zur Kompetenzentwicklung und VR Gestaltungsprinzipien

Wie zuvor erwähnt, dienen die im vorherigen Methodikschritt getroffenen Festlegungen zur prinzipiellen Ausrichtung des Szenarios und zu den Szenarioelementen als Eingangsgrößen. Aufbauend hierauf sollen zunächst die *Erfolgsfaktoren von Lernumgebungen* einbezogen werden, wie sie in Abschnitt 2.2.2 eingeführt wurden. Zudem sollen im Rahmen der Detailgestaltung grund-

legende *VR-Gestaltungsprinzipien* berücksichtigt werden. Folgende Gestaltungsprinzipien aus der Literatur und auf Basis praktischer Erfahrungen können berücksichtigt werden [Ke21; MBK17; MBK20]:

- *Vermeidung unnötiger kognitiver Belastungen:*
Das Szenario soll sich in seiner Gestaltung auf die wesentlichen Elemente beschränken, um kognitive Überlastungen zu vermeiden. Dazu können u. a. dekorative Elemente oder Hintergrundgeräusche zählen.
- *Detailtreue der Darstellung:*
Das Szenario soll sich in seinen Darstellungsdetails am Lernprozess und den hierzu definierten Lernzielen sowie Kompetenzen ausrichten. Jeder Lerninhalt setzt unterschiedliche Anforderungen im Hinblick auf die Darstellungsgenauigkeit. Während gewisse Lerninhalte eine fotorealistic Darstellung (z. B. bei der Erkennung von Qualitätsmängeln) erforderlich machen, reichen für andere schematische Darstellungen aus (z. B. bei der Gestaltung eines Fabriklayouts). Um die Anwender:innen nicht unnötig zu belasten, soll sich auf das jeweils notwendige Mindestmaß beschränkt werden.
- *Relevante und natürliche Interaktionen:*
Die Interaktionsformen sollen sich an relevanten Interaktionen der Lerninhalte orientieren. Natürliche Interaktionen, die der Realität nahekommen, vereinfachen den Umgang mit VR für unerfahrene Anwender:innen und unterstützen den Transfer der in VR erlernten Handlungen in die physische Realität. Die Notwendigkeit einzelner Interaktionen muss überprüft und im Einzelfall entschieden werden (z. B. kann die Kommunikation mit anderen Anwender:innen in der virtuellen Welt für den Lerninhalt nicht relevant sein, steigert aber den Realitätsgrad).
- *Erprobungsräume:*
Das Schaffen von Erprobungsräumen kann die Anwender:innen dabei unterstützen, sich mit unbekanntem Interaktionsformen losgelöst vom Lernszenario vertraut zu machen. Solche Räume können insbesondere zur Einführung in die Bedienung des VR-Systems verwendet werden.
- *Geeignete Bewegungsformen:*
Zwischen Bewegungen im physischen und virtuellen Raum sollen keine Diskrepanzen oder Latenzen bestehen. Aus diesem Grund ist bspw.

für kleinere Bewegungen und Perspektivwechsel die Übertragung physischer Bewegungen eine vorzuziehende Variante. Für größere Distanzen soll die Teleportation der durchgehenden Bewegung mittels Controller-eingabe vorgezogen werden. Je größer die Diskrepanz zwischen visuell angezeigter und physiologisch wahrgenommener Bewegung, desto größer die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Motion Sickness.

Ableitung von Gestaltungselementen

Im ersten Schritt werden auf Basis der zuvor vorgestellten Erfolgsfaktoren und Gestaltungsprinzipien mögliche Gestaltungselemente für Bestandteile der Lernumgebung definiert. Für folgende Kategorien von Szenarioelementen sollen Gestaltungselemente festgelegt werden:

- *Bestandteile der 3D-Umgebung:*
Hierunter sind alle virtuellen Objekte zu verstehen, die in der 3D-Umgebung abgebildet werden. Dabei können Festlegungen für einzelne Objekte oder mehrere gleichartige Objekte erfolgen. Bestandteile der 3D-Umgebung können z. B. Personen, Maschinen, Anlagen oder andere Gegenstände sein.
- *Interaktionen:*
Unter Interaktionen fallen alle Interaktionen der Anwender:innen in und mit der virtuellen Umgebung. Darunter fällt auch die Gestaltung der kompetenzrelevanten Handlungen. Hier kann zwischen *passiver*, *aktiver* und *proaktiver Ausführung* unterschieden werden. Für eine passive Ausführung muss den Anwender:innen lediglich selbstständig bekannt sein, dass eine Handlung ausgeführt werden muss. Für eine aktive Ausführung ist zudem relevant, wie eine Handlung im Detail ausgeführt werden muss.
- *Hilfestellungen:*
Hierunter fallen alle Aspekte, mit denen die Anwender:innen im Rahmen der Nutzung in jeder Hinsicht (z. B. Bedienung, Orientierung, Lerninhalte) unterstützt werden.
- *Schnittstellen:*
Insbesondere im Hinblick auf hybride Szenarien muss auch die Gestaltung der Schnittstellen und Übergabepunkte definiert werden. Schnitt-

stellen können z. B. die Übergabe von Ein- und Ausgaben aus der virtuellen in die physische Welt oder umgekehrt definieren.

- *Kommunikation:*

Im Bereich Kommunikation muss die Form für die Kommunikation zwischen den Anwender:innen untereinander sowie zwischen Anwender:innen und Trainer:innen definiert werden. Es muss entschieden werden ob die Kommunikation z. B. audio- oder textbasiert stattfindet.

- *Rückmeldungen:*

Unter den Aspekt der Rückmeldungen fallen alle Gestaltungsaspekte, welche die Rückmeldung der virtuellen Umgebung an die Anwender:innen betreffen. Dies können z. B. Informationen über die korrekte/fehlerhafte Ausführung einer Handlung, über den Bearbeitungsfortschritt oder die erfolgreiche Speicherung von Daten sein.

- *Gamification:*

Hierunter fallen alle Aspekte, welche spielerische Aspekte zur Motivation der Anwender:innen beinhalten. Die können z. B. Auszeichnungen nach erfolgreicher Bearbeitung von Lerninhalten sein.

Für sämtliche Szenarioelemente werden im ersten Schritt mögliche Gestaltungselemente abgeleitet. Dabei soll von Beginn an berücksichtigt werden, ob für unterschiedliche Zielgruppen individuelle Gestaltungselemente abgeleitet werden müssen. Die Ableitung von Gestaltungselementen kann auf unterschiedliche Weise erfolgen, die abhängig von den projektspezifischen Erfordernissen gewählt werden muss. Hierzu eignet sich der Rückgriff auf bestehende Konzepte ebenso wie Design Thinking, Gruppenbrainstormings und Expert:inneninterviews. Für die Ableitung werden die in Abschnitt 4.3.3 definierten Anforderungen zugrunde gelegt. Die Ergebnisse sind in tabellarischer Form zu dokumentieren, wobei jedem Szenarioelement mindestens ein Gestaltungselement zugeordnet sein muss. Eine exemplarische Verknüpfungsmatrix findet sich in Abbildung 4.13.

Die zuvor abgeleiteten Gestaltungselemente müssen im Anschluss für die folgende Bewertung in Bewertungsmatrizen überführt werden. Wichtig ist hierbei, dass möglichst homogene Gruppen gebildet werden, deren jeweilige Elemente sich im Anschluss miteinander vergleichen lassen. Dabei ist darauf zu achten, dass ähnliche Aspekte des Szenarios mit gleichartigen GE repräsentieren.

tiert werden. Dies stellt sicher, dass einzelnen Elemente des virtuellen Szenarios für die Anwender:innen erwartungsgemäß und vorhersehbar implementiert sind.

Für die Bewertung selbst ist projektspezifisch festzulegen, welcher Personenkreis die Bewertung durchführt. Eine Bewertung im Projektteam ist ebenso denkbar wie eine Bewertung durch Expert:innen sowie Anwender:innen. Auch ob ein ein- oder mehrstufiges Befragungsverfahren zum Einsatz kommt, ist projektspezifisch festzulegen. Empfehlen lässt sich die Verwendung eines mehrstufigen Verfahrens (z. B. Delphi-Studie [Hä09]), da so unterschiedliche Auffassungen und Verständnisweisen über Gestaltungselemente berücksichtigt und angeglichen werden können. Zur Eignungsbestimmung können Hypothesen gebildet werden, welche im Rahmen einer statistischen Auswertung der Erhebungsdaten geprüft werden können (z. B. signifikante Einordnung des MW in das gewählte Bewertungsraster).

Die als geeignet bewerteten GE müssen abschließend in sogenannte *Gestaltungselementpakete* (GEP) zusammengefasst werden. Diese Pakete dienen bspw. zur Adressierung unterschiedlicher Zielgruppen, zur Abbildung von *Schwierigkeitsgraden* oder zur Darstellung verschiedener *Abstraktionsgraden*. Dabei können Schwierigkeitsgrade definieren, wie und in welchem Umfang den Anwender:innen bspw. Hilfestellungen angeboten werden. Der gewählt Abstraktionsgrad bestimmt, in wie weit die entwickelte Umgebung auf das Wesentliche reduziert wird (z. B. Detailtiefe und Realismus der Darstellung).

Da die tatsächliche Eignung der einzelnen Elemente als auch der Pakete unter Umständen erst nach Implementierung im Gesamten beurteilt werden kann, empfiehlt es sich, bereits implementierte GE bzw. -pakete frühzeitig mit Anwender:innen im Rahmen von Anwendungstests zu erproben. Das Vorgehen für die Erprobung ist im dazugehörigen Methodikschritt in Abschnitt 4.5.1 beschrieben.

Die zu implementierenden Verknüpfungen sind in einer Beschreibungsmatrix zu dokumentieren. Eine exemplarische Beschreibungsmatrix findet sich in Abbildung 4.13.

Szenarioalternativen		Detaillierung durch Szenarioelemente		Detaillierung durch Gestaltungselemente		
		Gestaltungselemente		Pakete		
Szenarioelement	Bezeichnung	Beschreibung	GEP ₁	...	GEP _N	
Szenarioelement (SE _{1,1})	Gestaltungselement (GE _{1,1,1})	...			X	
	
	Gestaltungselement (GE _{1,1,N})	...	X	X		
...	

Abbildung 4.13: Matrix zur Beschreibung von Szenarioelementen, Gestaltungselementen und Gestaltungselementpaketen, eigene Darstellung.

4.5 Methodikbaustein III: Integration

Der dritte Methodikbaustein betrachtet die Erprobung (Abschnitt 4.5.1), Implementierung (Abschnitt 4.5.2) sowie die künftige Weiterentwicklung (Abschnitt 4.5.3) des entwickelten LLK (siehe Abbildung 4.14). Obwohl in diesem Baustein keine direkten Überlegungen hinsichtlich der Inhalte des LLK mehr getroffen werden, sind die Schritte dieses Bausteins trotzdem für eine nachhaltige Integration und Nutzung des Konzepts erfolgskritisch.

Methodikbaustein III: Integration	
Erprobung III.1	<ul style="list-style-type: none"> Erprobung des Lehr-Lern-Konzepts Anwender:innentests, Nutzbarkeitsanalyse, Kompetenzmessung Rückkopplung der Ergebnisse in die (Weiter-)Entwicklung
Implementierung III.2	<ul style="list-style-type: none"> Gestaltung des Workshopkonzepts Schulung des Trainingspersonals Einbindung in den Workshopbetrieb
Weiterentwicklung III.3	<ul style="list-style-type: none"> Fortlaufende Erprobung des Lehr-Lern-Konzepts Nutzung der Erkenntnisse für zukünftige Projekte Fortlaufende Anpassung an technologische und gesellschaftliche Entwicklung

Abbildung 4.14: Methodikbaustein III: Integration, eigene Darstellung.

4.5.1 Erprobung

Die Erprobung des entwickelten LLK ist von Relevanz für den späteren Erfolg und die Akzeptanz des Konzepts. Notwendig sind Betrachtungen zur Nutzbarkeit³ und im Hinblick auf die Eignung des Konzepts zur Kompetenzentwicklung.

Nutzbarkeitsbetrachtung

Eine zentrale Fragestellung bei der Betrachtung der Qualität von Softwareprodukten bezieht sich auf die Nutzbarkeit der entwickelten Anwendung. Die Nutzbarkeit wirkt sich nicht nur auf die Anwendungserfahrung⁴ aus, sondern verbessert zudem den Systemerfolg im Gesamtkonzept. [BK21] Im Rahmen der Gestaltung soll frühstmöglich mit sogenannten *Anwendungstests* begonnen werden. Diese stellen eine frühzeitige Einbindung der relevanten Anspruchsteller:innen sowie Anwender:innen sicher. Vor allem im Hinblick auf das LLK und dessen GE wurden bereits in Abschnitt 4.4.3 festgestellt, dass die Eignung der gewählten Szenario- sowie GE und -pakete erst in der Erprobung überprüft werden kann. Dies gilt auch für die Berücksichtigung der übergeordnet definierten Anforderungen und Produktmerkmale. Hierzu bieten sich sowohl *qualitative* als auch *quantitative Werkzeuge* an.

Die *Quantifizierung* der Nutzbarkeit kann mittels der von BROOKE entwickelten *System-Usability-Scale* (SUS) erfolgen. Diese stellt eine etablierte Methode zur quantitativen Analyse der Gebrauchstauglichkeit dar [Br96a; Ra11]. Die Standardfragen der SUS werden im Anhang (s. Abschnitt A.4.3) dargestellt. Die Fragen können je nach Anwendungsgebiet angepasst werden.⁵ Die Bewertung auf Basis der SUS lässt einen Rückschluss auf die übergeordnete Nutzbarkeit zu. Eine weitere Konkretisierung durch Detailauswertung der Bewertungen der einzelnen Fragestellungen oder auf Basis unterstützender qualitativer Werkzeuge ist zu empfehlen.

Im Bereich der *qualitativen Werkzeuge* bietet sich der Einsatz von Befragungen auf Basis von Fragebögen und Interviews an. Auch diese sollen mit allen

³englischer Fachbegriff: Usability

⁴engl. Fachbegriff: User Experience

⁵Bspw. ist die Frage zur regelmäßigen Nutzung im Lernfabrikkontext fragwürdig und kann derart abgewandelt werden, dass eine breite Nutzung in der Lernfabrik gut vorstellbar ist.

relevanten Anspruchsteller:innen durchgeführt werden. Dabei sollen allgemeine Erfahrungen zur Nutzung der Anwendung eingeholt werden. In diesem Zuge können auch Anregungen zur weiteren Verbesserung der Umgebung eingeholt werden.

Kompetenzmessung

Im Bereich der Weiterbildung ist nicht nur relevant, welche Nutzungsqualität eine Anwendung aufweist, sondern auch, ob sie im Hinblick auf das angestrebte Ziel effektiv einsetzbar ist. Der Nachweis ist im Vorfeld der produktiven Nutzung durch eine Kompetenzmessung zu erbringen. Hierdurch wird sichergestellt, dass Anwender:innen durch das virtuelle LLK ein tatsächlicher Mehrwert im Hinblick auf die Kompetenzentwicklung entsteht.

Die relevanten Festlegungen zum Kompetenzbegriff wurden bereits im Grundlagenabschnitt zum Kompetenzbegriff und zur Kompetenzmessung getroffen (Abschnitt 2.1). Es wird sich hier darauf beschränkt zur Kompetenzmessung auf das Verfahren nach GLASS zu verweisen, das für die Nutzung im Rahmen der Anwendung dieser Methodik empfohlen wird. Die Empfehlung wird darauf begründet, dass das Verfahren explizit im Lernfabrikkontext entwickelt wurde und somit die Eigenheiten dieses Konzepts hinreichend berücksichtigt.

Die Methodik berücksichtigt die Anforderung der Kompetenzorientierung insbesondere in den Schritten der Initialsituation (Abschnitt 4.3.1), der Handlungsfelder (Abschnitt 4.3.2), der Anforderungen (Abschnitt 4.3.3) der Hardwareauswahl (Abschnitt 4.4.1) und der Szenariokonfiguration (Abschnitt 4.4.2). Wird bei den Kompetenzbetrachtungen eine nicht hinreichende Eignung zur Kompetenzentwicklung identifiziert, wird eine Überarbeitung des LLK im Hinblick auf die genannten Methodikschritte empfohlen. Weitere Anregungen, welche Aspekte für die Überarbeitung in Frage kommen, werden von GLASS dargestellt [Gl21]. Diese sind auf das individuelle LLK zu übertragen.

4.5.2 Implementierung

Bevor ein entwickeltes LLK in den Betrieb geht, müssen finale Entscheidungen hinsichtlich verschiedener, insbesondere organisatorischer Belange getroffen werden. Diese beinhalten Betrachtungen zu *geeigneten Räumlichkeiten*, dem *Trainingspersonal*, der *Workshopplanung* sowie dem *Aufbewahrungskonzept*.

Räumlichkeiten

Für die finale Implementierungen müssen geeignete Räumlichkeiten ausgewählt werden. Insbesondere wenn eine simultane Multiplayer-Verwendung im selben Raum angestrebt wird, ergeben sich hohe Anforderungen an die Größe des Raumes.⁶ Je nach Menge der geplanten gleichzeitig zu betreibenden VR-Systeme kann die Nutzung mehrere Räume notwendig sein. Darüber hinaus ist die technische Ausrüstung des Raumes sowie die Abschirmbarkeit zwischen den Systemen zu beachten. Folgende Aspekte sind neben anderen zu beachten:

- Stromversorgung
- Platzbedarf pro VR-System
- Netzwerkversorgung
- Verlegbarkeit von zusätzlichen Kabeln
- Möblierung

Trainingspersonals

Bei der Implementierung von virtuellen LLK muss beachtet werden, welche zusätzlichen Anforderungen diese an das Trainingspersonal stellt [Ze18]. Das involvierte Trainingspersonal soll entsprechend geschult werden. Folgende Aspekte kommen im Rahmen von virtuellen Konzepten zur Rolle des Trainingspersonals hinzu:

Aufbau, Inbetriebnahme und Abbau

Insbesondere bei nicht-stationärer Nutzung des vorgehaltenen VR-Systems muss das Trainingspersonal im Auf- und Abbau sowie der Inbetriebnahme geschult sein. Dies ist nicht nur aus Effektivitätsgründen sinnvoll, sondern erlaubt zudem einen möglichst zeitsparenden Auf- und Abbau. Wichtige Aspekte sind:

- Kenntnis über die verschiedenen Systembestandteile und deren jeweilige Verbindung
- Kenntnis über notwendige periphere Infrastruktur

⁶[Ke18] geben einen Platzbedarf von $3,0 \cdot 3,5m^2$ an. HTC gibt für das Cosmo-Elite-HMD einen Platzbedarf von $3,5 \cdot 3,5m^2$ an [HT23b].

- Kenntnis über den notwendigen Raumbedarf
- Lösungskompetenz bei technischen Schwierigkeiten während der Inbetriebnahme

Insbesondere im Kontext von Multiplayer-Aufbauten im selben Raum kann es zur gegenseitigen Beeinträchtigung der Trackingsysteme kommen. Diesen Umstand hat das Trainingspersonal beim Aufbau entsprechend zu berücksichtigen und soll um mögliche Behelfsmaßnahmen wissen. Empfohlen wird die Verwendung von Standardarbeitsanweisungen und Checkliste zur Unterstützung bei Aufbau, Inbetriebnahme und Abbau.

Technik im Betrieb

Das Trainingspersonal soll über hinreichende Kenntnisse in Bezug auf die Eigenheiten der verwendeten Hardware und Software im Betrieb verfügen. Dazu gehören u. a.:

- Kenntnis über die eingesetzte Hardware sowie gängige auftretende Probleme in der Nutzung sowie geeignete Lösungsstrategien
- Kenntnis über die verwendete Software, deren Möglichkeiten, Funktionen und Limitationen. Ergänzend ist die Kenntnis über möglicherweise auftretende Softwarefehler und -inkonsistenzen in der Benutzung relevant.

Bedienung

Auch während des Trainings gilt es, auf bestimmte Aspekte zu achten, insbesondere da VR nach wie vor eine Technologie ist, mit der viele Menschen noch keine oder nur wenig Berührungspunkte vorweisen kann. Deshalb ist die Betreuung der Anwender:innen im Hinblick auf mögliche Bedienungsschwierigkeiten erfolgskritisch. Dazu sind u. a. die folgenden Aspekte zu beachten:

- Einführung der Anwender:innen in die Bedienung des Systems
- Unterstützung beim Aufsetzen der Hardware sowie Aufnahme der Controller
- Unterstützung beim Auftreten von Softwarefehlern und -inkonsistenzen
- Unterstützen bei Orientierungsschwierigkeiten der Anwender:innen in der virtuellen Umgebung

Arbeitssicherheitsrelevanten Aspekte

Da die Anwender:innen durch den immersiven Charakter der VR für die Dauer der Nutzung weitgehend den direkten Bezug zur realen Umwelt verlieren, ist kontinuierlich auf Gefährdungspotentiale zu achten und diese, wenn nötig, umgehend zu beseitigen. Diese beinhalten u. a.:

- Stolpergefahren durch Kabel
- Zusammenstoß von Anwender:innen im physischen Raum
- Kollision von Anwender:innen mit Objekten der physischen Umgebung
- Verlassen des Trackingbereichs durch die Anwender:innen
- Gesundheitliche Beeinträchtigungen

Insgesamt lässt sich festhalten, dass es bei Einsatz von VR sowohl einer Einführung in die Technik wie auch einer nutzungsbegleitenden Betreuung durch das Trainingspersonal bedarf. Die Aufgaben des Trainingspersonals werden nicht reduziert, sondern um andere Aspekte erweitert. Eine entsprechende Schulung bzw. Auseinandersetzung mit der Technik ist unabdingbar. Neben Schulungen kann dieser Aspekt durch Aufbauanleitungen, Handreichungen, Merkblätter oder Standardarbeitsanweisungen unterstützt werden. Es wird empfohlen, die Anleitungen aussagekräftig zu bebildern.

Workshopplanung

Zudem muss die Einbindung des virtuellen LLK in den Schulungsbetrieb erfolgen. Hierzu muss eine Planung des zeitlichen Ablaufs durchgeführt werden, welche die Aufenthaltsdauer in VR berücksichtigt. Weitergehend müssen alternative Konzepte für Personen erdacht werden, für die eine Verwendung von HMD nicht in Frage kommt. Dies kann aufgrund von körperlichen Einschränkungen oder physiologischen Reaktionen der Fall sein. Es ist sicherzustellen, dass diesen Personen auf andere Art und Weise Zugang zum Lerninhalt ermöglicht wird. Denkbar ist die Verwendung ähnlich eines herkömmlichen Videospiele. Bei beschränkter Anzahl vorgehaltener VR-Systemen sind zudem Gruppeneinteilungen und Parallelangebote für die jeweils nicht in VR befindlichen Personen zu bedenken.

Aufbewahrungskonzept

Zu guter Letzt muss ein Aufbewahrungskonzept entwickelt werden. Es ist zunächst zu bestimmen, ob das VR-System stationär oder lediglich temporär in den jeweiligen Räumlichkeiten installiert wird. Insbesondere in letzterem Fall muss ein Konzept erstellt werden, das sicherstellt, dass die verfügbare Hardware sicher für Transport und Lagerung aufbewahrt ist. Es bietet sich hier ergänzend die Erstellung von Materiallisten an. Verschiedene Hardwarekomponenten können für einen effizienteren Aufbau mit Markierungen versehen werden.

4.5.3 Weiterentwicklung

Da sich die Technologie und die verfügbare Hardware stetig weiterentwickeln, ist auch das bestehende virtuelle LLK stetig an den aktuellen Stand der Technik anzupassen. Im Gegensatz zu oftmals sehr hardwareintensiven physischen Lernfabriken können virtuelle LLK mit vergleichsweise einfachen Mitteln überarbeitet bzw. angepasst werden. In diesem Kontext ist stets darauf zu achten, das Konzept auf Basis des Anwender:innenfeedbacks weiterzuentwickeln. Neben dem Anwender:innenfeedback sind insbesondere technischer Fortschritt im Bereich der VR Systeme wie auch inhaltlicher Anpassungsbedarf der Lernszenarien Auslöser für einen Weiterentwicklungsbedarf.

Um diese Weiterentwicklung zu forcieren, bedarf es einer Institutionalisierung des Prozesses. Es bietet sich an, bereits bei der initialen Entwicklung die späteren Weiterentwicklungsmöglichkeiten zu bedenken. Es ist empfehlenswert, die Weiterentwicklung und Pflege durch eigenes Personal durchzuführen. Zur weiteren Einordnung und Bewertung des eigenen Konzepts kann das in Abschnitt 2.2.2 eingeführte Reifegradmodell nach ENKE herangezogen werden [EGM17; En20a]. Wie Schulungen auf Basis der Kompetenzmessungsergebnisse überarbeitet werden können, wird von GLASS [Gl21] dargestellt.

Die Betrachtung der Weiterentwicklung wird für Gestaltungs- und Implementierungsprojekte empfohlen. Nichtsdestotrotz ist die Aufstellung eines Weiterentwicklungskonzepts fakultativ.

4.6 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde die Methodik zur Gestaltung und Implementierung von virtuellen LLK vorgestellt, die ein strukturiertes Vorgehen für derartige Entwicklungsprojekt zur Verfügung stellt. Die Methodik fundiert auf bestehenden Gestaltungsansätzen für Lernfabriken, insbesondere solchen zur kompetenzorientierten Gestaltung physischer Lernfabriken, und ergänzt diese mit neuen Aspekten. Neben grundlegenden Überlegungen zu Zielbild und Struktur der Methodik (Abschnitt 4.1) wurden insbesondere die einzelnen Methodikbausteine dargestellt.

Das Vorgehen wird durch die Bausteine der *Entwicklungsmethode* und der *Softwareentwicklung* flankiert. In diesen finden übergeordnete Festlegungen statt. Beispielsweise wird im Hinblick auf die Entwicklungsmethode festgelegt, ob das Entwicklungsprojekt agil oder im Rahmen eines klassischen Projektmanagements bearbeitet wird. Im Baustein der Softwareentwicklung finden Betrachtungen dazu statt, ob die Softwareentwicklung intern oder durch einen externen Dienstleister durchgeführt wird.

In *Methodikbaustein I* werden die Rahmenbedingungen des LLK analysiert (Abschnitt 4.3). Hierzu wird zunächst die Initialsituation auf Basis des organisationalen Umfelds und der Ziele, der zu adressierenden Zielgruppen, deren Struktur sowie der abgeleiteten intendierten Kompetenzen analysiert und dokumentiert. Aufbauend auf diesen Festlegungen werden Handlungsfelder für den VR-Einsatz abgeleitet. Es wird die im Abschnitt vorgestellte Ableitungsmatrix verwendet (Abschnitt 4.3.2). Der Methodikbaustein schließt mit der Ableitung von technischen, organisatorischen und didaktischen Anforderungen ab. Der in diesem Zug gebildete Anforderungs- und Merkmalskatalog (Abschnitt 4.3.3) wird in den nachfolgenden Gestaltungsschritten als Grundlage verwendet.

In *Methodikbaustein II* werden die zuvor getätigten Festlegungen genutzt, um ein kompetenzorientiertes LLK zu gestalten (Abschnitt 4.4). Im ersten Schritt wird das benötigte VR-System ausgewählt. Dafür wird jeweils eine Selektion aus organisatorischer, didaktischer und technischer Perspektive durchgeführt. Für die technische Selektion kann die in Abschnitt 4.4.1 dargestellte Nutzwertmatrix verwendet werden. Im nächsten Schritt werden mögliche Szenarioalternativen abgeleitet und bewertet. Auf Basis der intendierten

Kompetenzen erfolgt die weitere Konkretisierung des Szenarios durch Definition kompetenzrelevanter Szenarioelemente. Es wird die Verwendung der im Abschnitt 4.4.2 dargestellten Beschreibungsmatrix empfohlen. Im letzten Schritt wird eine Detailgestaltung des Szenarios vorgenommen, bei dem für die verschiedenen Szenarioelemente mögliche Gestaltungselemente abgeleitet werden. Für einzelne Szenarioelemente können jeweils mehrere Gestaltungselemente definiert werden, die in Gestaltungselementpakete zusammengefasst werden können (z. B. zur Darstellung unterschiedlicher Schwierigkeitsgrade oder Adressierung verschiedener Zielgruppen). Als Hilfestellung wird auch für diesen Methodikschritt in Abschnitt 4.4.3 eine Beschreibungsmatrix vorgestellt. Das gestaltete LLK wird nun im Rahmen der Softwareentwicklung als virtuelle 3D-Umgebung umgesetzt.

In *Methodikbaustein III* erfolgt die Integration des virtuellen LLK in die Lernfabrik (Abschnitt 4.5). Zunächst wird die Erprobung des entwickelten Konzepts im Hinblick auf die Nutzbarkeit und die Eignung zur Kompetenzentwicklung durchgeführt. Dieser Schritt kann, je nach Entwicklungsmethode, auch parallel zur Entwicklung stattfinden. Abschließend erfolgt die Implementierung in den Workshopbetrieb. Begleitend findet die Schulung des Trainingspersonals statt. Für eine nachhaltige Integration schließt der Methodikbaustein mit der Weiterentwicklung des LLK ab. Diese soll die fortlaufende Anpassung an technologische und gesellschaftliche Entwicklungen sicherstellen.

Die verschiedenen Festlegungen und Ergebnisse der Methodikbausteine sowie deren Abhängigkeiten sind in Abbildung 4.16 visualisiert. Die Methodik wird in Abbildung 4.15 zusammenfassend dargestellt.

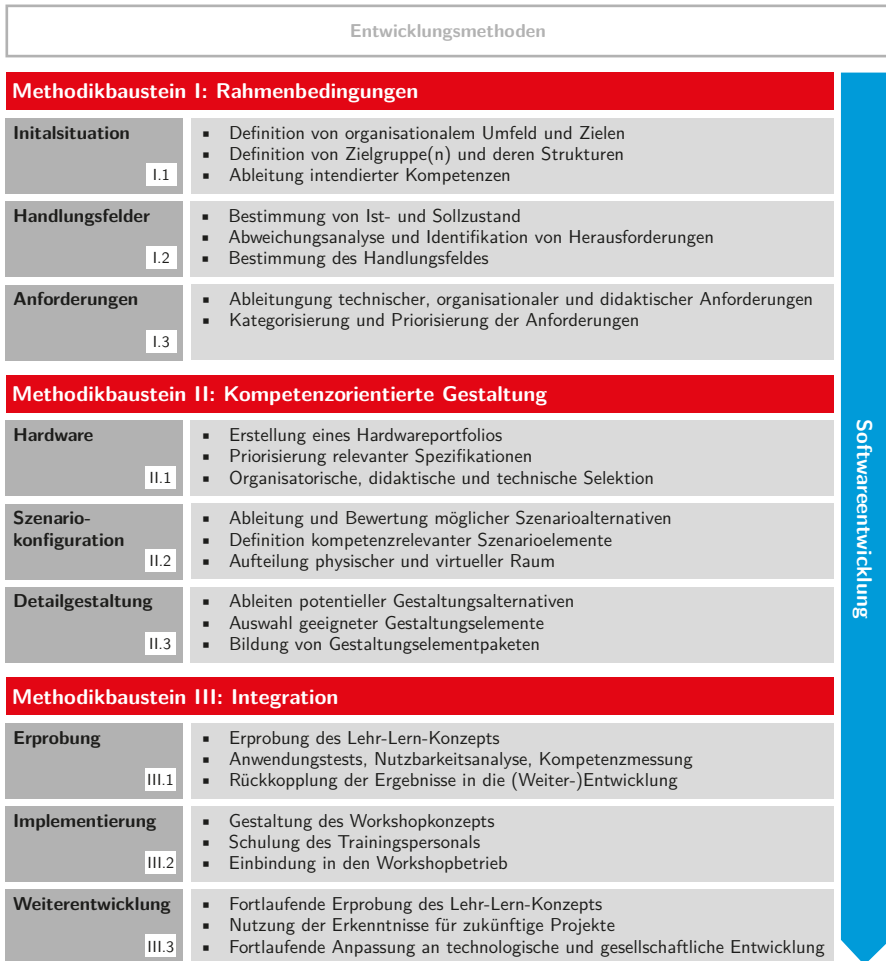


Abbildung 4.15: Übersicht über die Methodik zur kompetenzorientierten Gestaltung und Implementierung von virtuellen LLK, eigene Darstellung.

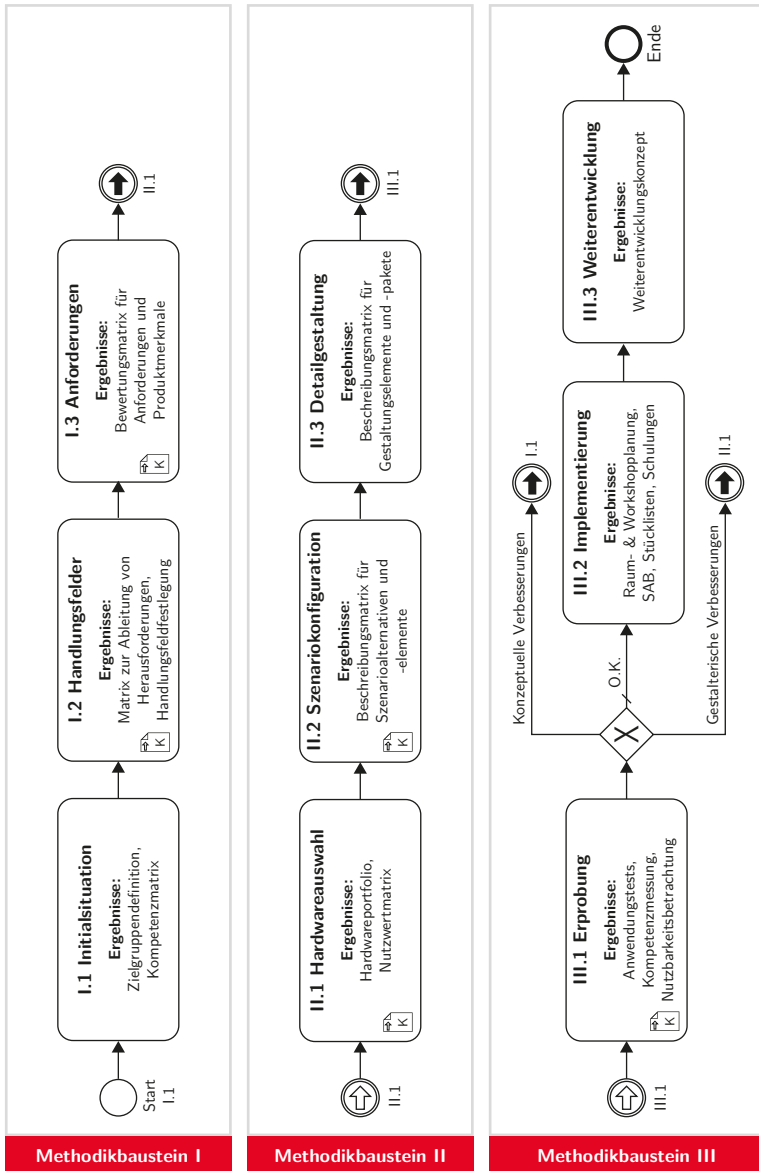


Abbildung 4.16: Abfolge der Methodikschritte sowie deren Ergebnisse, eigene Darstellung.

5 Anwendung und Evaluation

In diesem Kapitel wird die Anwendung und Evaluation der Methodik dargestellt. Hierzu wird zunächst ein Anwendungsfall aufgezeigt (Abschnitt 5.1). Anschließend werden das Evaluationskonzept sowie die Ergebnisse der Evaluation dargestellt (Abschnitt 5.2). Die Ergebnisse werden abschließend diskutiert (Abschnitt 5.3).

5.1 Anwendung der Methodik und Darstellung der Ergebnisse

Die Methodik wurde im universitären Kontext der Prozesslernfabrik des Centers für industrielle Produktivität (CiP)¹ angewendet. Der Anwendungsfall soll nachfolgend im Detail vorgestellt werden. Es wird die Anwendung im Rahmen des Forschungsprojekts Portal² vorgestellt. Das Projekt wurde in Zusammenarbeit mit dem Arbeitsbereich Medienpädagogik am Institut für Allgemeine Pädagogik und Berufspädagogik der TU Darmstadt sowie UReality, einem Geschäftsbereich der Kirchner Konstruktionen GmbH zugeführt.

5.1.1 Forschungsprojekt Portal

Im Forschungsprojekt Portal erfolgte die vollständige Anwendung der Methodik im Rahmen eines Gestaltungs- und Implementierungsprojekts für ein virtuelles LLK zur Ergänzung eines bestehenden physischen LLK der Prozesslernfabrik CiP. Für das LLK wurde ein hybrides Entwicklungsvorgehen gewählt. Das LLK wurde ausgehend von einem MVP iterativ auf Basis von Anwendungstests weiterentwickelt.

¹Lernfabrik des Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) an der TU Darmstadt.

²Virtuelle Handlungsaufgaben für personalisiertes, adaptives Lernen – gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Förderkennzeichen: 01PV18001A. Förderträger: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

Methodikbaustein I

Im ersten Methodikbaustein wurden die Rahmenbedingungen für das zu entwickelnde LLK definiert. Hierbei wurde die Betrachtung der Initialsituation, die Ableitung von Handlungsfeldern und die Definition von Anforderungen durchgeführt.

Schritt I.1: Initialsituation

Die Prozesslernfabrik CiP befindet sich im universitären Umfeld. Die Lernfabrik wird neben der universitären Lehre und Forschung vor allem für ein kostenpflichtiges Weiterbildungsprogramm verwendet. Das Weiterbildungsprogramm wird im Rahmen eines Partnerschaftsmodells mit Laufzeit pro Unternehmen von mindestens drei Jahren angeboten. Dieses adressiert kleine und mittlere produzierende Unternehmen (KMU) aus Deutschland, welche Weiterbildungsleistungen im Themenfeld der schlanken Produktion buchen können. [AMT18] In den angebotenen Weiterbildungsveranstaltungen agieren wissenschaftliche Mitarbeiter:innen als Trainer:innen. Das Konzept wird intern weiterentwickelt. Für die VR-Softwareentwicklung zeichnet sich die Firma UReality, ein Geschäftsbereich der Kirchner Konstruktionen GmbH aus Deutschland, verantwortlich.

Die Zielgruppe besteht primär aus Mitarbeiter:innen der entsendenden KMU. Diese sind der Branche des Maschinen- und Anlagenbaus zuzurechnen. In der Vergangenheit waren jedoch auch Unternehmen aus anderen Branchen vertreten [Pr23]. Innerhalb dieser Zielgruppe wurden in der Vergangenheit Mitarbeiter:innen aus unterschiedlichen Unternehmensbereichen zu den Lernfabriktrainings entsendet. Dabei reicht das Spektrum von Maschinen- und Anlagenbediener:innen bis hin zu Mitarbeiter:innen aus den indirekten Bereichen sowie dem mittleren Management. Im Bereich der universitären Lehre besuchen vor allem Student:innen aus den Studiengängen des Wirtschaftsingenieurwesen sowie des Maschinenbaus in Master-Veranstaltungen die Prozesslernfabrik CiP. Die Zielgruppen können insofern als heterogen angesehen werden. Die inhaltliche Ausrichtung der Prozesslernfabrik CiP fokussiert sich dabei auf Themen der schlanken Produktion in Kombination mit Industrie-4.0-Ansätzen. Im Hinblick auf die angesprochenen Branchen soll eine Erweiterung der Zielgruppen stattfinden.

Für das Anwendungsbeispiel werden Lernziele und intendierten Kompetenzen rund um die Methode der WSA gewählt. Dies begründet sich in der

allgemeinen Anwendbarkeit und hohen Relevanz der Methode für produzierende Unternehmen. Die Methode stellt den ersten Schritt für Unternehmen bei der Verbesserung der Material- und Informationsflüsse dar. Die Lernziele wurden aus einem bereits seit mehreren Jahren bestehenden und erprobten physischen Lernfabriktraining abgeleitet. Primärer Inhalt der WSA ist es, den Ist-Zustand eines Produktionswertstromes zu analysieren. Dies beinhaltet bspw. neben der Erfassung von Prozess- und Durchlaufzeiten auch die Erfassung von Prozessverknüpfungen, Materialbeständen sowie Verschwendungen, die innerhalb des Wertstroms beobachtet werden. Einen Auszug aus der verwendeten Kompetenzmatrix findet sich im Anhang (Abschnitt A.5.1).

Schritt I.2: Handlungsfelder

Für die Ableitung von Herausforderungen wurde vor allem Feedback der Teilnehmer:innen aus zurückliegenden Weiterbildungsveranstaltungen der Prozesslernfabrik CiP analysiert. Hierbei konnte festgestellt werden, dass die bestehende Fabrikumgebung sowie das Produkt der Prozesslernfabrik CiP nicht immer zur Branchenherkunft der Teilnehmer:innen passen. Es wurde kritisiert, dass der Transfer der erlernten Methoden in das eigene betriebliche Umfeld aufgrund der unterschiedlichen Produktionsumgebungen behindert wird. Eine weitere identifizierte Herausforderung stellte die hierarchische Heterogenität der Teilnehmer:innen dar. Aufgrund unterschiedlicher Vorerfahrungen wurde das bislang angebotene Lernszenario von einigen Teilnehmer:innen als zu einfach, von anderen als zu anspruchsvoll und komplex bewertet. Die Matrix zur Ableitung von Herausforderungen findet sich im Anhang (Abschnitt A.5.2).

Auf Basis der im Projektteam identifizierten Herausforderungen wurde sich für das virtuelle LLK direkt auf die Adressierung der offensichtlichen Handlungsfelder der *Abbildungsfähigkeit* sowie *Personalisierbarkeit und Adaptivität* fokussiert. Diese sollen im weiteren Projektverlauf bearbeitet werden.

Um das Handlungsfeld der Abbildungsfähigkeit zu bedienen, soll eine weitere Produktionsumgebung umgesetzt werden, welche eine weitere Branche abdeckt, für welche die bestehende physische Umgebung nicht hinreichend ist. Aufgrund des Umfangs des Forschungsprojekts musste sich auf die Realisierung einer Umgebung beschränkt werden. Im Bereich des Handlungsfeldes Adaptivität und Personalisierbarkeit sollen unterschiedliche Schwierigkeitsgrade vorgesehen werden sowie ein Szenario erschaffen werden, das die Autonomie

der Anwender:innen fördert. Begründet wird dies durch das unterschiedliche Vorwissen, das die Teilnehmer:innen vorweisen. Beide Aspekte lassen sich in einem physischen LLK nur erschwert umsetzen, sodass der Einsatz einer virtuellen Lösung einen bedeutenden Mehrwert schaffen kann. Die genannten Aspekte gehen als Anforderungen in den weiteren Gestaltungsprozess ein.

Schritt I.3: Anforderungen

Aufbauend auf den vorherigen Festlegungen wurden auf Basis der Literatur allgemeine Anforderungen abgeleitet. Ergänzt wurden diese durch individuelle Anforderungen auf Basis des bestehenden LLK, der intendierten Kompetenzen sowie weiterer Anforderungen aus dem Projektteam beziehungsweise dem Kreis der Lernfabriktrainer:innen. Der entstandene Anforderungskatalog umfasst insgesamt 61 Anforderungen, die im Anschluss in die drei Kategorien didaktische, technische und organisatorische Anforderungen unterteilt wurden. Ein Auszug aus der Anforderungsliste findet sich in Tabelle 5.1, die komplette Anforderungsliste befindet sich im Anhang (Abschnitt A.4.2).

Tabelle 5.1: Listenauszug identifizierter Anforderungen, eigene Darstellung.

Anforderung	Beschreibung	Kategorie		
		T	D	O
Schwierigkeitsgrade	Vereinfachungen für Teilnehmer:innen mit geringer Vorerfahrung	○	●	○
Virtuelle:r Trainer:in	Virtuelles Hilfesystem, das Fragestellungen zu Bedienung, Lerninhalt und Umgebung beantworten kann	●	●	○
Realistische Aufgaben	Realistische Abbildung der durchzuführenden Aufgaben ähnlich einer physischen Lernfabrik	◐	●	○
Räumliche Flexibilität	LLK ist nicht an den Lernfabrikstandort gebunden	●	○	●
...	

● = vollständig zuordbar; ◐ = teilweise zuordbar; ○ = nicht zuordbar

Aus den Anforderungen wurden anschließend 26 Produktmerkmale abgeleitet. Hierzu wurden Anforderungen, die zueinander größere Ähnlichkeit aufwiesen, zusammengefasst. Im Anschluss wurden die gebildeten Produktmerkmale im Rahmen einer Anspruchsteller:innen-Befragung unter Verwendung des Kano-Modells in die modellzugehörigen Kategorien eingeordnet. Die Tabelle kann dem Anhang entnommen werden (Abschnitt A.5.3).

Im Rahmen der Bewertung konnte festgestellt werden, dass ein großer Anteil der Produktmerkmale von den Anspruchsteller:innen als Begeisterungsmerkmale eingeordnet wurden (z. B. Multiplayer-Modus und Schwierigkeitsgrade). Inverse sowie fragwürdige Merkmale konnten im Rahmen der Bewertung nicht identifiziert werden.

Die Umsetzbarkeitsbewertung erfolgte mit dem Softwarehersteller. In diesem Kontext wurde auch eine interne Aufwandseinschätzung für die Softwareentwicklung durchgeführt. Die einzelnen Produktmerkmale wurden im Anschluss in Abhängigkeit der Merkmalskategorie, der Umsetzbarkeitsbewertung und der Aufwandseinschätzung in die verschiedenen Softwareiterationen eingearbeitet.

Methodikbaustein II

Im zweiten Methodikbaustein wurde die notwendige Hardware ausgewählt, die Konfiguration möglicher Szenarien definiert und die Detailgestaltung der einzelnen Szenarien durchgeführt.

Schritt II.1: Hardware

Aufgrund des Forschungsprojektcharakters wurde der Einsatzbereich der anzuschaffenden Hardware bewusst weiter gefasst als für die betrachtete Umsetzung notwendig. Geplant wurde im Rahmen des Anwendungsfalls ein hybrides LLK, das im ersten Schritt stationär umgesetzt werden soll. Die perspektivische Ausweitung der VR-Nutzung wurde vorgesehen. Zum damaligen Zeitpunkt existierte die Möglichkeit, eigenständige VR-Systeme auch als rechnergebundene Systeme einsetzen zu können, noch nicht. Aus diesem Grund wurde sich für ein rechnergebundenes System entschieden, jedoch mit der Zusatzausstattung eines Wireless-Kits.

Im Hinblick auf die didaktische Selektion erfolgte die Wahl eines Geräts mit je sechs Freiheitsgraden für Kopf und Hände. Dies erlaubt ein natürliches Be-

wegen innerhalb und Interagieren mit der virtuellen Umgebung. Zwar wäre für den Lerninhalt der WSA mit hauptsächlich passiven Handlungen auch ein System mit weniger Freiheitsgraden prinzipiell ausreichend gewesen, die Nutzbarkeit für zukünftige Anwendungskontexte (z. B. Wertstromgestaltung mit aktiven Handlungen) sowie die Anforderung, ein möglichst realitätsnahes und natürliches Erlebnis anbieten zu können, beeinflussten die Entscheidung jedoch zu Gunsten eines leistungsstärkeren Systems mit mehr Freiheitsgraden.

Da eigenständige Geräte bereits ausgeschlossen wurden, stand wegen der Anforderung der kabellosen Nutzbarkeit mit Wireless-Adapter nur noch das VR-System HTC Vive Pro zur Auswahl. Auf eine technische Auswahl zum Ausschluss verbleibender Alternativen konnte somit verzichtet werden. Das genannte VR-System wurde in vierfacher Ausführung für die Umsetzung angeschafft.

Schritt II.2: Szenariokonfiguration

Für die Definition der abgebildeten Produktionsumgebung wurden fünf Szenarioalternativen (s. Tabelle 5.2) mit einem geringen Komplexitätsgrad (drei bis fünf Produktionsprozesse pro Szenario) als Trainings- und Transferwelten abgeleitet [Ri21a]. Für die Bewertung der Szenarioalternativen wurden zunächst fünf Kriterien abgeleitet und für die Expert:innenbewertung gewichtet. Die Kriterien und deren Gewichtung können Tabelle 5.3 entnommen werden.

Tabelle 5.2: Bewertung der Szenarioalternativen, eigene Darstellung auf Basis von [Ri21a].

Szenarioalternative	Bewertung
Leiterplatten	1,00
Blechprofile	0,95
Designobjekte	0,90
Spielzeuge	0,86
Scheren	0,84

Tabelle 5.3: Bewertungskriterien mit Gewichtung, eigene Darstellung auf Basis von [Ri21a; RM22b].

Bewertungskriterium	Gewichtung
Mehrwert zur bestehenden Lehr-Lern-Umgebung	0,27
Zielgruppeneignung	0,24
Geringe Ablenkung	0,20
Abbildbarkeit	0,20
Attraktivität	0,09

Die Szenarioalternativen wurden hinsichtlich ihrer jeweiligen Eignung anhand der genannten Kriterien bewertet. Als Bewertungsinstrument wurde ein Paarvergleich verwendet. Das Ergebnis dieser Bewertung entschied darüber, welche Szenarioalternativen weiter entwickelt werden. Die Bewertung der fünf Szenarioalternativen ergab, dass eine Produktion von *Leiterplatten* und eine Produktion von *Blechprofilen* am attraktivsten und geeignetsten für die angestrebte Zielsetzung erscheint. Die Ergebnisse können Tabelle 5.2 entnommen werden. Nachdem die zu verwendenden Szenarien festgelegt wurden, wurden sie ausführlich auf Adaptivität und Personalisierung untersucht. Die Möglichkeiten für diese beiden Aspekte wurden detailliert in die Konzepte eingearbeitet [Ri21a; RM22b]. Das im Projekt entwickelte *Leiterplatten-Szenario* besteht neben den notwendigen Lagern und indirekten Bereichen aus insgesamt drei Produktionsprozessen: SMD-Bestückung³, THT-Bestückung⁴ und Qualitätskontrolle. Ein Bildschirmfoto der Umgebung ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Innerhalb des Wertstroms können drei Produktvarianten gefertigt werden und es wird neben der Durchführung aller kompetenzrelevanten Handlungsaufgaben (z. B. Befragung von Werker:innen, wie in Abbildung 5.2 dargestellt) auch die Einhaltung einer maximalen Aufenthaltsdauer in VR von 30 Minuten am Stück ermöglicht [Ri21a; RM22b]. Weitere Bildschirmfotos zu Szenarioelementen finden sich im Anhang (Abschnitt A.5.4). Für sämtliche Szenarioelemente wurde zudem festgelegt, ob sie im Rahmen des hybriden Konzepts in der virtuellen oder der physischen Lernumgebung dargestellt werden sollen (so wurde z. B. definiert, dass alle Szenarioelemente mit

³SMD: Surface Mount Device

⁴THT: Through Hole Technology

Bezug zur Produktionsdatenaufnahme in der virtuellen Welt dargestellt werden; das Szenarioelement zur Erstellung der Wertstromgrafik jedoch in der physischen Umgebung verortet wird). Ein Auszug aus der Szenarioelementliste kann im Anhang eingesehen werden (Abschnitt A.5.5). Zudem wurde ein Layout für die virtuelle Lernumgebung erstellt, das im Anhang dargestellt ist (Abschnitt A.5.6)

Schritt II.3: Detailgestaltung

Im nächsten Schritt wurden im Rahmen eines Gruppenbrainstormings im Projektteam verschiedene GE für die einzelnen Szenarioelemente entwickelt und tabellarisch dokumentiert. Hierbei wurden auch die Softwareentwickler:innen einbezogen. Die GE wurden anschließend in die Kategorien Datenerfassung, Schnittstelle, Illustration, Feedback, Kommunikation, Interaktion und Unterstützung kategorisiert und in Bewertungsmatrizen überführt [RM22b].

Die Bewertung der einzelnen Gestaltungselemente wurde im Rahmen einer zweistufigen Delphi-Studie mit 19 Trainingsteilnehmer:innen und Trainer:innen durchgeführt. Die beiden Gruppen wurden gemeinsam befragt, da die gewählten GE für beide Anwendungsgruppen geeignet sein müssen. Den Befragungsteilnehmer:innen wurden mehrere in Matrizen strukturierte GE vorgestellt und gebeten, die GE in ihrer Eignung zur Darstellung der zugewiesenen Handlungsaufgaben zu bewerten [RM22b]. Für jedes Gestaltungselement wurden vier Hypothesen in Bezug auf den MW gebildet: signifikant kleiner als 2, signifikant kleiner als 3, signifikant größer als 3 oder signifikant größer als 4. Das Signifikanzniveau wurde auf 5 % festgelegt. Um ein geeignetes Testverfahren auszuwählen, musste zunächst ein Test auf Normalverteilung durchgeführt werden. Hierzu wurde ein *Shapiro-Wilk-Test* (SWT) durchgeführt [SW65], der zeigte, dass die Hypothese, dass keine Normalverteilung vorliegt, nicht verworfen werden kann. Zum Test der Hypothesen wurde deshalb ein Vorzeichentest eingesetzt [MWS89]. Die Ergebnisse können Tabelle 5.4 entnommen werden. Jedes Element, das einen Wert ≥ 3 annimmt, kann zur Gestaltung des Szenarios verwendet werden. Dies begründet sich damit, dass das Gestaltungselement in diesem Fall als geeignet bewertet wurde. Für die Zeitmessung wird zum Beispiel die Verwendung einer virtuellen Stoppuhr empfohlen [RM22b]. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die verschiedenen GE den Befragungsteilnehmer:innen nicht in VR vorgeführt, sondern nur in ihrer jeweiligen Funktion beschrieben wurden. Anwendungstests nach

der Implementierung können gegebenenfalls zu anderen Ergebnissen führen [RM22b].

Tabelle 5.4: Listenauszug mit bewerteten Gestaltungselementen für das virtuelle LLK, eigene Darstellung auf Basis von [Ri21c; RM22b].

Bewertung	Anzahl	Beispiele
$\bar{x} < 2$	29	Beantwortung individueller Fragen durch die Anwendung
$2 \leq \bar{x} < 3$	25	Textbasierte Kommunikation im Multiplayer-Modus
$= 3$	87	Realistische Abbildung der Umgebungsgeräusche
$3 < \bar{x} < 4$	64	Tutorial für den Lerninhalt Verschwendungsarten können einzeln ausgewählt werden.
$4 \leq \bar{x} \leq 5$	15	Virtuelle Stoppuhr zur Aufnahme von Prozesszeiten Visuelles Feedback auf Speichervorgänge

$\bar{x}_i =$ MW der Bewertung des Gestaltungselements i



Abbildung 5.1: 3D Umgebung: Produktionsumgebung mit visualisierten Materialflüssen.



Abbildung 5.2: 3D Umgebung: Befragung eines virtuellen Werkers.

Methodikbaustein III

Im zweiten Methodikbaustein wurde die Implementierung vorgenommen. Hierzu wurde neben der Erprobung in Anwendungstests auch die Implementierung in Lehrveranstaltungen sowie ein Konzept zur Weiterentwicklung und Verstetigung entwickelt.

Schritt III.1: Erprobung

Die Erprobung teilte sich über die Projektlaufzeit in zwei Teile auf. Bereits parallel zur Entwicklung wurden kontinuierlich Anwendungstests mit potentiellen Anwender:innen durchgeführt, um frühzeitig Feedback zu den entwickelten Szenarien zu erhalten. Dabei wurde zunächst mit einem rudimentären Minimum-Viable-Product (MVP) gestartet. Das MVP bildete noch kein vollständig gestaltetes Szenario ab, sondern beinhaltete lediglich diverse Stationen, an denen verschiedene Interaktionsmöglichkeiten von den Anwender:innen ausprobiert werden konnten. Das qualitative Feedback wurde bereits frühzeitig für die Entwicklung der letztendlichen Szenarien verwendet. Verschiedene Bildschirmfotos der 3D-Umgebung des MVP sind im Anhang dargestellt (Abschnitt A.5.4).

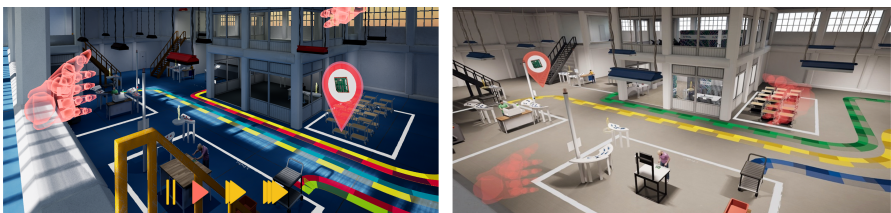


Abbildung 5.3: 3D Umgebung: Vergleich zweier Iterationen. Links: vorher, Rechts: nachher

Diese Anwendungstests wurden mit den drei über die Projektlaufzeit zur Verfügung gestellten Softwareiterationen durchgeführt. So konnten bereits frühzeitig Softwarebugs und andere Inkonsistenzen in der Software entdeckt und behoben werden. In diesem Zuge wurde u. a. bemängelt, dass die Lernumgebung zu dunkel sei und erdrückend auf die Anwender:innen wirke. Spätere Iterationen der Umgebung wurden darauf basierend heller gestaltet. Ein Vergleich findet sich in Abbildung 5.3.

Im Rahmen des Anwendungstests wurde außerdem eine Kompetenzmessung nach GLASS sowie eine Untersuchung auf Basis der SUS durchgeführt. Für weitere Details hinsichtlich der durchgeführten Nutzbarkeits- und Kompetenzbetrachtungen sowie deren Ergebnisse, wird auf Abschnitt 5.2.1 und 5.2.3 verwiesen.

Schritt III.2: Implementierung

Im vorletzten Schritt erfolgte die Implementierung der entwickelten Lernumgebung in diverse Lehrveranstaltungen. Eine Liste der Veranstaltungen findet sich in Tabelle 5.5. Zudem wird in Abbildung 5.4 die Verwendung des VR-Systems im Rahmen der dort besuchten Lehrveranstaltung illustriert. Auf die Details der Anwendung soll im Rahmen von Abschnitt 5.2.3 eingegangen werden, da die Implementierung zusammen mit der Evaluation erfolgte.



Abbildung 5.4: Anwender:innen bei der Verwendung des VR-Szenarios im Rahmen einer Lehrveranstaltung an der TU Graz.

Tabelle 5.5: Veranstaltungsliste, eigene Darstellung.

Universität	Veranstaltung	Abschluss
TU Darmstadt	Vorlesungsübung	Master
TU Darmstadt	Tutorium	Master
TU Graz	Tutorium	Master
Université du Luxembourg	Tutorium	Master

Im Zuge der Implementierung wurden die in der Methodikbeschreibung betrachteten Aspekte der Räumlichkeiten, des Trainingspersonals, der Workshopplanung und des Aufbewahrungskonzepts berücksichtigt. Als Platzbedarf wurde eine Fläche von $3,5 \cdot 3,5 \text{ m}^2$ pro VR-System eingeplant. Unter Berücksichtigung der Abschattung wurden jeweils zwei Anwender:innen in einem Tracking-Bereich platziert. Die Bewegungsflächen der Anwender:innen wurden frei von Kabeln gehalten. Zudem wurde das eingesetzte Trainingspersonal in den relevanten Aspekte der Hard- und Software geschult. Für den Transport der VR-Systeme wurde ein Aufbewahrungskonzept erdacht, das durch farbliche Markierungen und Materiallisten ergänzt wurde.

Schritt III.3: Weiterentwicklung

Da es sich um das im Forschungsprojekt entwickelte Softwareprodukt lediglich um eine erste Erprobung handelt, wurde ein Weiterentwicklungskonzept für die spezielle Anwendung nicht erstellt. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurde jedoch definiert, dass die bestehende Anwendung in diversen Formaten in Weiterbildung und Lehre eingesetzt werden soll. Darunter u. a. die folgenden Aspekte:

- Demonstration der Umgebung für interessierte Unternehmen in der Prozesslernfabrik CiP
- Einbindung des LLK im Rahmen der Workshops der Prozesslernfabrik CiP
- Nachhaltige Verankerung des LLK in Lehrveranstaltungen an der TU Darmstadt und gegebenenfalls anderen Universitäten

Zudem wurden einige Aspekte definiert, die bei zukünftigen Weiter- oder Neuentwicklungen einfließen sollen. Dabei sind diese auch Ausgangspunkt für ggf.

weitere Forschungsarbeiten im Bereich der virtuellen LLK (Abschnitt 6.2). Darunter finden sich die folgenden Aspekte:

- Übertragung des LLK auf weitere Lerninhalte. Potenzielle Inhalte im Rahmen der Prozesslernfabrik CiP sind bspw. *Wertstromgestaltung, Arbeitsplatzgestaltung, Schnellrüsten*⁵
- Weiterentwicklung des LLK in inhaltlicher und organisatorischer Hinsicht zur effizienten und effektiven Einbindung in Workshops
- Verbesserung der Interaktionsformen durch intuitivere und lebensweltnähere Darstellungsweisen
- Veränderbarkeit bzw. Simulation der dargestellten Zustände
- Übertragung der Erkenntnisse auf augmented-reality-basierte LLK
- Entwicklung rein virtueller Lernfabrikkonzepten

5.2 Evaluation

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird zum einen die Methodik im Hinblick auf die zuvor definierten formalen und inhaltlichen Anforderungen sowie zum anderen das im Forschungsprojekt entwickelte LLK als Ergebnis der Methodikanwendung (Abschnitt 5.2.1). Auf beide Evaluationsstränge wird im Folgenden eingegangen. Zunächst wird hierzu die Evaluation der Methodik (Abschnitt 5.2.2) und anschließend die Evaluation der Lernumgebung (Abschnitt 5.2.3) dargestellt.

5.2.1 Evaluationskonzept

Zur Evaluation von Methodik und Lernumgebung werden insgesamt fünf Instrumente eingesetzt. Diese werden nachfolgend dargestellt:

- **Expert:innenbefragung**
Die Methodik wird von verschiedenen Expert:innen hinsichtlich der zuvor definierten Anforderungen im Rahmen eines standardisierten Fragebogens bewertet. Dabei werden Expert:innen aus dem Bereich der Lernfabrikentwicklung konsultiert. Um die Bewertung durchführen zu

⁵kurz: SMED

können, wird allen Befragungsteilnehmer:innen im Vorfeld die Methodik in einer etwa einstündigen Präsentation vorgestellt und erläutert. Im anschließenden Fragebogen sind die jeweiligen inhaltlichen (Abschnitt 3.3.1) und formalen Anforderungen (Abschnitt 3.3.2) aufgelistet. Zudem besteht die Möglichkeit für Freitextkommentare. Der Fragebogen ist im Anhang dargestellt (Abschnitt A.6.2). Die Erfüllung sämtlicher Anforderungen wird durch die Expert:innenbefragung bewertet.

- **Vergleichsexperiment**

Für die Evaluation der Lernumgebung wird ein Vergleichsexperiment zwischen physischer und virtueller Lernumgebung durchgeführt. Hierzu nehmen die Proband:innen an einem Lernfabrikworkshop zum Thema der Wertstromanalyse teil. Dabei wird eine Kompetenzmessung nach GLASS durchgeführt [Gl21]. Alle Proband:innen durchlaufen zunächst eine Einführung in den Lerninhalt der Wertstromanalyse auf Basis einer Wissensvermittlung. Im Anschluss wird von den Proband:innen ein Motivationsfragebogen⁶ ausgefüllt, dessen Ergebnisse in den späteren Kompetenzmesswert eingehen. Im Anschluss wird die Gesamtgruppe in zwei Teilgruppen aufgeteilt. Gruppe A absolviert das Trainingsszenario im Fertigungsbereich der Prozesslernfabrik CiP, Gruppe B das virtuelle Trainingsszenario für die Wertstromanalyse. In Rahmen des Trainingsszenario findet eine Anleitung durch die Trainer:innen statt. Im Anschluss absolvieren beide Gruppen ein Beobachtungs- bzw. Transfer-szenario im Montagebereich der Prozesslernfabrik CiP. Hierbei wird den Proband:innen keine Hilfestellung angeboten. Im Transferszenario findet die Durchführung der Wertstromanalyse beobachtet satt und wird bewertet⁷. Zum Abschluss erfolgt ein Wissenstest⁸, bei dem das vorhandene kompetenzbezogene Wissen abgefragt wird. Die Anforderung der Zielorientierung wird ergänzend zur Expert:innenbewertung durch die Kompetenzmessung bewertet.

- **Proband:innenbefragung**

Ergänzend werden die Proband:innen im Rahmen des Vergleichsexperiments zu den Erfahrungen während der Verwendung des virtuellen Lernszenarios befragt. Hier wird zum einen eine Befragung auf Basis

⁶Der verwendete Motivationsfragebogen kann in Abschnitt A.1.1 eingesehen werden.

⁷Der verwendete Beobachtungsbogen kann in Abschnitt A.1.3 eingesehen werden.

⁸Der verwendete Wissensfragebogen kann in Abschnitt A.1.2 eingesehen werden.

der SUS durchgeführt, welche eine quantitative Bewertung der Nutzbarkeit erlaubt. Zudem wird von den Proband:innen qualitatives Feedback zu den Erfahrungen eingeholt und befragt, ob sie sich eine weitere ausschließliche (rein virtuelle Konzepte) oder hybride Nutzung vorstellen können. Der verwendete Fragebogen ist im Anhang dargestellt (Abschnitt A.6.1). Die Anforderung der Zielorientierung wird ergänzend zur Expert:innenbewertung und Kompetenzmessung durch die Proband:innenbefragung bewertet.

- **Statistische Untersuchung der Ergebnisse**

Die Ergebnisse der zuvor vorgestellten Befragungen und Messungen werden unter zu Hilfenahme statistischer Verfahren ausgewertet. Dabei werden insbesondere im Kontext der Kompetenzmessung Untersuchungen zur Normalverteilung, Varianzhomogenität, Unterschiedlichkeit der MW sowie statistischen Signifikanz angestellt.

- **Analytische Argumentation**

Aufgrund ihres Charakters können nicht alle im Vorfeld definierten formalen und inhaltlichen Anforderungen abschließend im Rahmen des Vergleichsexperimentes bzw. durch die Befragungen bewertet werden. Anforderungen und Ergebnisse die nicht hinreichend derart begründet werden konnten, werden analytisch-argumentativ im Rahmen der Diskussion begründet.

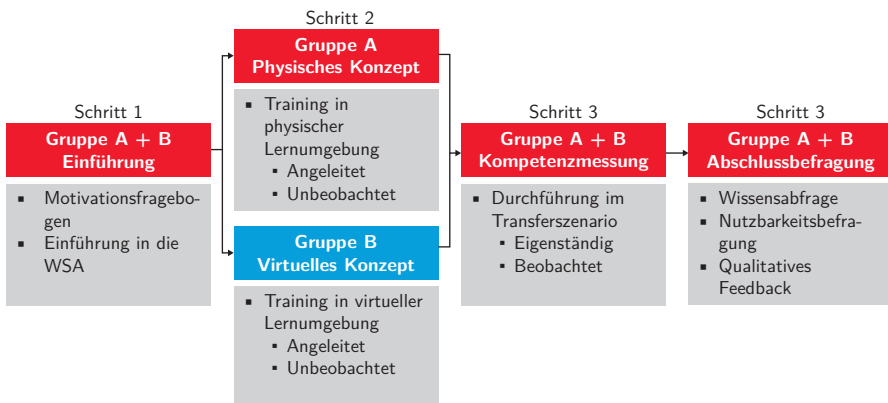


Abbildung 5.5: Ablauf des Vergleichsexperiments, eigene Darstellung.

5.2.2 Evaluationsergebnisse für die Methodik

Die Methodik wurde mit insgesamt $n = 10$ Expert:innen aus dem Bereich der Lernfabrikentwicklung evaluiert. Die Bewertung fand auf einer Skala von eins (nicht erfüllt) bis fünf (absolut erfüllt) statt. Für $\bar{x} > 3$ wird von einer Erfüllung der Anforderung ausgegangen. Die Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.

Inhaltliche Anforderungen

Im Folgenden wird auf die Ergebnisse für die Expert:innenbewertung im Hinblick auf die inhaltlichen Anforderungen eingegangen (s. Tabelle 5.6).

- Die Anforderung der *Strukturiertheit* wurde von den Expert:innen im Mittel mit 4,8 Punkten bewertet. Die Methodik erfüllt durch das in Methodikbausteine und -schritte untergliedertes Vorgehen die Anforderung der Strukturiertheit.
- Die Anforderung im Hinblick auf die *Individualität* wurde im Mittel mit 4,5 bewertet. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Methodik die Individualität der betrachteten Anwendungsfälle hinreichend berücksichtigt.
- Die Anforderung der *Detailliertheit* wurde von den Expert:innen mit einem MW von 4,5 bewertet, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die einzelnen Schritte hinreichend detailliert für die Anwendung durch Dritte beschrieben sind.
- Die Anforderung der *Zielorientierung* wurde von den Expert:innen mit einem MW von 4,4 bewertet. Auch hier kann festgestellt werden, dass die Methodik die Zielsetzung der Kompetenzorientierung im hinreichenden Maße berücksichtigt.
- Die *Einfachheit* der Methodik wurde mit einem MW von 3,5 bewertet. Jedoch wurde eine Minimalbewertung unterhalb der neutralen Bewertung abgegeben.
- Die *Einsetzbarkeit* wird von den Expert:innen im Mittel mit 4,50 bewertet. Die Methodik erfüllt nach Meinung der Expert:innen die Anforderung der Einsetzbarkeit für unterschiedliche Kontexte.

Tabelle 5.6: Expert:innenbewertung: Inhaltliche Anforderungen.

Anforderung	Min.	Max.	\bar{x}	\tilde{x}
Strukturiertheit	4	5	4,8	5,0
Individualität	4	5	4,5	4,5
Detailliertheit	4	5	4,5	4,5
Zielorientierung	4	5	4,4	4,0
Einfachheit	2	5	3,5	4,0
Einsetzbarkeit	3	5	4,5	5,0

Formale Anforderungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse zur Expert:innenbewertung im Hinblick auf die Erfüllung der formalen Anforderungen dargestellt (s. Tabelle 5.7).

- Die Anforderung der *Objektivität* wurde von den Expert:innen im Mittel mit 3,8 bewertet. Auch wenn für diese Anforderung erzielt wurde, kann die Anforderung als erfüllt angesehen werden.
- Die Bewertung der *Reproduzierbarkeit* erreichte einen MW von 4,5 und kann somit als erfüllt betrachtet werden.
- Die *Übertragbarkeit* auf andere Anwendungsfälle wurde im Mittel mit 4,6 bewertet, sodass auch hier von einer Erfüllung der Anforderung ausgegangen werden kann.
- Auch für die Anforderung der *Nachvollziehbarkeit* konnte mit einem MW von 4,4 eine Erfüllung der Anforderung bestätigt werden.
- Die *Anpassungsfähigkeit* wird von den Expert:innen im Mittel mit 4,4 bewertet. Dementsprechend kann von einer Erfüllung der Anforderung ausgegangen werden.
- Auch die *Simplizität* wird mit einem MW von 4,0 als erfüllt angesehen. Auch für die Simplizität wurde jedoch eine Minimalbewertung unterhalb der neutralen Bewertung abgegeben.

Tabelle 5.7: Expert:innenbewertung: Formale Anforderungen.

Anforderung	Min.	Max.	\bar{x}	\tilde{x}
Objektivität	3	4	3,8	4,0
Reproduzierbarkeit	4	5	4,5	4,5
Übertragbarkeit	3	5	4,6	5,0
Nachvollziehbarkeit	4	5	4,4	4,0
Anpassungsfähigkeit	3	5	4,4	4,5
Simplizität	2	5	4,0	4,0

5.2.3 Evaluationsergebnisse für die Lernumgebung

Die Evaluationsergebnisse für die Lernumgebung sollen im Folgenden vorgestellt werden. Hierbei soll zunächst auf die Ergebnisse der Kompetenzmessung und anschließend auf die Ergebnisse der System-Usability-Scale-Betrachtungen sowie der qualitativen Befragung eingegangen werden.

Ergebnisse der Kompetenzmessung

Die im Zuge der Evaluation durchgeführte Kompetenzmessung wurde im Rahmen beider Lehrveranstaltungen *Lean4Students* sowie *GoIng Digital* an der TU Darmstadt durchgeführt. Hieran nahmen insgesamt $n = 54$ Masterstudent:innen im Alter zwischen 21 und 33 Jahren und ohne Vorkenntnisse oder Erfahrungen im Bereich der WSA teil. Die Gesamtgruppe wurde, wie in Abschnitt 5.2.1 dargestellt, in zwei Teilgruppen aufgeteilt. Dabei bestand die Gruppe B (virtuelles Konzept) aus $n = 30$ Student:innen, die ein Training im virtuellen Szenario absolvierten. Die Vergleichsgruppe bestand aus $n = 24$ Student:innen und absolvierte das physische Trainingsszenario im Fertigungsbereich der Prozesslernfabrik CiP.

In Tabelle 5.8 werden die wichtigsten statistischen Daten zusammengefasst. Hierin werden neben der Gruppenstatistik, welche Daten wie den MW, die Standardabweichung und den Standardfehler des MW enthält, auch die Ergebnisse des *Shapiro-Wilk-Tests* (SWT) [SW65] dargestellt, der als Werkzeug zum Nachweis der Normalverteilung der Daten verwendet wurde. Bereits bei einem ersten Blick auf die Gruppenstatistik lässt sich, zunächst statistisch

unfundiert, feststellen, dass die Mittelwerte für den Kompetenzwert sehr nahe beieinander liegen. Dies lässt die Vermutung zu, dass beide Versuchsgruppen im Hinblick auf die Kompetenzentwicklung ähnlich abschnitten.

Der zum Nachweis der Normalverteilung durchgeführte SWT zeigt, dass sowohl die Daten für Kompetenz als auch für Wissen und die Motivation normalverteilt sind ($p > 0,05$). Für die Daten der Handlungsvariable kann das Vorliegen einer Normalverteilung statistisch widerlegt werden. Zwar ist die Eigenschaft der Normalverteilung für den später durchgeführten t-Test wünschenswert, einige Literaturquellen halten diese Eigenschaft jedoch nicht für notwendig und erachten den Test als robust gegenüber der Nichterfüllung einiger Annahmen, wie z. B. der Normalverteilung [GPS72; Ha92; LKK96].

Tabelle 5.8: Statistische Auswertung der Kompetenzmessung: Gruppenstatistik & Shapiro-Wilk Test.

Variablen	Gruppenstatistik				SWT	
	Gruppe	n	\bar{x}	σ	Stat.	p
Kompetenz (K_{norm})	A	24	0,779	0,095	0,967	0,584 ns
	B	30	0,797	0,080	0,960	0,301 ns
Wissen (W_{norm})	A	24	0,806	0,121	0,979	0,879 ns
	B	30	0,735	0,149	0,972	0,603 ns
Motivation (W_{norm})	A	24	0,653	0,157	0,977	0,837 ns
	B	30	0,705	0,113	0,982	0,886 ns
Handlung (W_{norm})	A	24	0,793	0,148	0,905	0,027 *
	B	30	0,887	0,085	0,933	0,059 ns

* = Signifikant auf einem Niveau von 5 %, ns = nicht signifikant

Um den t-Test verlässlich durchführen zu können, musste weitergehend ein Levene-Test auf Varianzhomogenität durchgeführt werden. Die Ergebnisse dieses Tests sind zusammen mit den Ergebnissen des t-Tests in Tabelle 5.9 dargestellt. Mittels des Levene-Tests auf Varianzhomogenität kann auf einem Signifikanzniveau von $p > 0,05$ das Vorliegen von Homogenität für *Kompetenz*, *Motivation* und *Wissen* nicht widerlegt werden. Für die Variable der

Handlung wurde das Vorliegen von Varianzhomogenität auf dem genannten Signifikanzniveau statistisch widerlegt.

Der verwendete t-Test zeigt, dass es keinen statistisch signifikanten Unterschied in den MW für die normalisierte Kompetenz, das Wissen und die Motivation gibt. Es kann also davon ausgegangen werden, dass sich die genannten MW zwischen Gruppe A und B nicht signifikant unterscheiden. Für *Handlung* konnte die Unterschiedlichkeit der Mittelwerte statistisch nicht widerlegt werden.

Tabelle 5.9: Statistische Auswertung der Kompetenzmessung: Levene-Test & t-Test.

Variablen	Levene-Test		t-Test (2-seitig)	
	F	p	T	p
Kompetenz (K_{norm})	1,595	0,212	1,556	0,462 ns
Wissen (W_{norm})	1,599	0,212	1,864	0,062 ns
Motivation (M_{norm})	2,685	0,107	2,667	0,163 ns
Handlung (H_{norm})	12,859	<0,001	17,789	0,005 **

** = Signifikant auf einem Niveau von 0,1 %, ns = nicht signifikant

Ergebnisse der Befragung zur Qualität und Nutzbarkeit der Lernumgebung

Bei der Befragung zur Qualität der Lernumgebung gaben 46 Anwender:innen Feedback zur Lernumgebung ab. Die Bewertung der einzelnen Aussagen erfolgte auf einer Skala von null (stimme gar nicht zu) bis vier (stimme zu). So bescheinigen die Anwender:innen der Umgebung im Mittel eine Eignung zur Unterstützung einer physischen Lernumgebung ($\bar{x} = 3,7; \tilde{x} = 4,0$). Der Einsatz als Ersatz für eine physische Lernumgebung wird im Mittel neutral bewertet ($\bar{x} = 2,4; \tilde{x} = 2,0$). Weiterhin bewerteten die Anwender:innen das System im Mittel als innovativ ($\bar{x} = 3,2; \tilde{x} = 3,0$) und die Lernumgebung als hinreichend detailliert dargestellt ($\bar{x} = 2,9; \tilde{x} = 3,0$). Die die Vielzahl der gebotenen Freiheitsgrade in der Umgebung wurde im Mittel bestätigt ($\bar{x} = 2,7; \tilde{x} = 3,0$). Die Anwender:innen bewerteten die Einführung

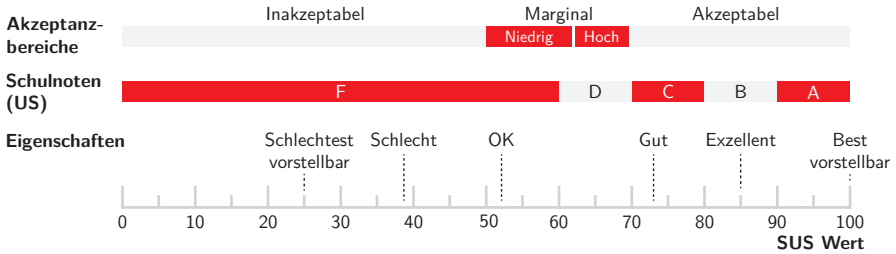


Abbildung 5.6: System-Usability-Bewertungsskalen nach BANGOR ET AL. [BKM09].

in die Bedienung im Mittel als hinreichend ($\bar{x} = 3,15$; $\tilde{x} = 3,5$) und die Navigation in der Umgebung als einfach ($\bar{x} = 2,43$; $\tilde{x} = 3,0$). Rund 17 % der Anwender:innen empfanden Unwohlsein bei der Anwendung.

Im Rahmen der Betrachtungen zur Nutzbarkeit der entwickelten Lernumgebung konnte herausgefunden werden, dass von den Anwender:innen eine mittlere Nutzbarkeit wahrgenommen wird. Ab einer Bewertung von 68 Punkten wird im Rahmen der SUS von einer guten Usability ausgegangen (s. Abbildung 5.6). Der Mittelwert für die Gesamtheit der Daten liegt bei $\bar{x} = 67,8$ Punkten und der Median bei $\tilde{x} = 70$ Punkten. Insofern kann bei der bewerteten Umgebung von einer soliden bzw. guten Usability ausgegangen werden (s. Abbildung 5.6).

In Abbildung 5.7 sind zudem die Ergebnisse aufgeteilt nach den verschiedenen Veranstaltungen dargestellt. Die Untersuchung zur Nutzbarkeit wurde in vier Lehrveranstaltungen durchgeführt. Dabei lässt sich erkennen, dass die Umgebung von den Anwender:innen der Lean4Students-Übung am schlechtesten bewertet wurde, wohingegen die Umgebung von den Anwender:innen der drei anderen Veranstaltungen mit vergleichsweise hohen Bewertungen eingeschätzt wurde.

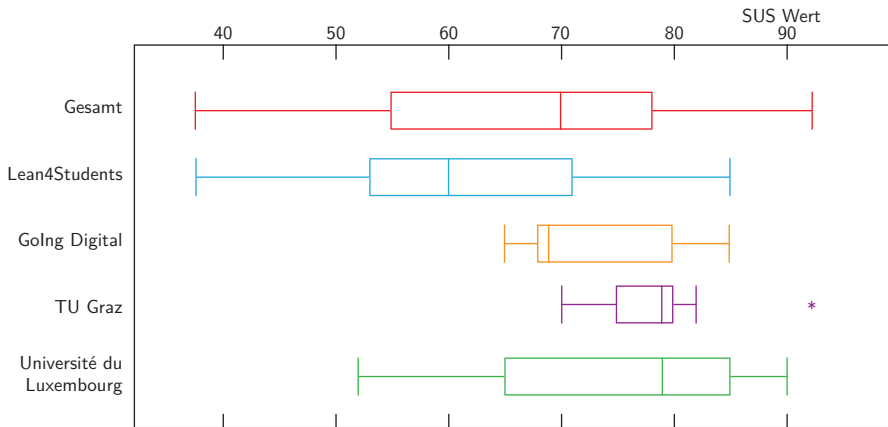


Abbildung 5.7: Boxplots zu den SUS-Bewertungen, eigene Darstellung.

5.3 Diskussion der Evaluationsergebnisse

Zunächst lässt sich feststellen, dass alle Ergebnisse eine weitere wissenschaftliche Betrachtung sinnvoll erscheinen lassen. Keines der Ergebnisse lässt vermuten, dass ein Einsatz von virtuellen LLK in Lernfabriken gänzlich ungeeignet wäre. Diese Aussage lässt sich auf Basis der Ergebnisse sowohl für das Lernszenario wie auch für die entwickelte Methodik treffen. Begründet wird dies durch ermittelten Kompetenzwerte, welche keine Unterschiedlichkeit für die betrachteten Gruppen aufwiesen. Trotzdem sind die Ergebnisse mit Einschränkungen zu interpretieren. Auf diese soll im Folgenden eingegangen werden.

Allgemein lässt sich für die Ergebnisse zur Lernumgebung feststellen, dass diese jeweils im Kontext der Anwendung zu verstehen sind. Dabei spielen sowohl der gewählte Lerninhalt, die gewählten Proband:innen, das Vergleichsszenario sowie der Entwicklungsstand der virtuellen Umgebung eine Rolle. Auf die genannten Aspekte soll jeweils kurz eingegangen werden:

- **Lerninhalt**

Der Lerninhalt der WSA lässt sich insgesamt als wenig interaktionsbedürftig klassifizieren. Es steht das *Analysieren*, *Beobachten* und *Erfassen* von Zusammenhängen im Vordergrund. Vermutlich werden von

derartigen Szenarien nur wenige Schwächen von VR einen Einfluss auf das Ergebnis haben. Sobald der Lerninhalt jedoch wesentlich mehr Interaktion bedarf, haptische Eindrücke von Relevanz sind oder aber die Abbildung wesentlich komplexerer Zusammenhänge fordert, können die Limitationen von VR einen größeren Einfluss haben.

- **Proband:innen**

Das Lernszenario wurde im Kontext der Evaluation mit einer sehr homogenen Proband:innengruppe getestet. Diese setzten sich primär aus Student:innen des Maschinenbaus und des Wirtschaftsingenieurwesens zusammen. Die Ergebnisse können in anderen Altersgruppen und in Gruppen mit Proband:innen aus anderen Kontexten (z. B. Industrie) unterschiedlich ausfallen.

- **Vergleichsszenario**

Als Vergleichsszenario wurde eine hochwertige, realitätsgetreue Lernumgebung auf Basis eines realen Produktes gezeigt. Hier legen die Ergebnisse nahe, dass reale und virtuelle Lernfabrik gleichermaßen zur Kompetenzentwicklung geeignet sind. Im Vergleich mit anderen LLK (z. B. rein seminarraumbasiert) kann der Unterschied stärker oder schwächer ausgeprägt sein.

- **Entwicklungsstand**

Weiterhin ist anzumerken, dass für die Evaluation ein nicht finaler Entwicklungsstand der Software Verwendung fand. Dieser war nicht gänzlich frei von Softwarefehlern und beinhaltete an manchen Stellen budget- und zeitrestriktionsbedingte Kompromisslösungen.

Im Hinblick auf die im Vorfeld definierten inhaltlichen und formalen Anforderungen konnte im Rahmen der Expert:innenbewertung weitgehend die Erfüllung der festgelegten Anforderungen bestätigt werden. Für die Anforderungen der *Einfachheit* und der *Simplizität* wurden jeweils Minimalbewertungen unterhalb der neutralen Bewertung abgegeben. Aus diesem Grund wird nachfolgend auf beide Anforderungen eingegangen:

- **Einfachheit:**

Die Anforderung der Einfachheit beinhaltet, dass die Methodik auch für unerfahrene Anwender:innen einsetzbar und nachvollziehbar ist. Von den bewertenden Expert:innen wird angemerkt, dass die Entwicklung

von virtuellen LLK für Lernfabriken per se eine komplexe Aufgabe darstellt. Die Expert:innen merken an, dass die Gestaltung zielgerichteter Lehr-Lern-Angebote im Kontext von Lernfabriken ein erweitertes Kompetenzprofil im Hinblick auf zielgruppenorientierte Didaktik, Aufbereitung von Lehr-Lerninhalten sowie der technischen Implementierung bei den Entwickler:innen erfordert. Dies steht im Kontrast zur Anforderung der Einfachheit. Die Entwicklungsaufgabe verlangt ein Mindestmaß an technischem Verständnis sowie Erfahrung. Trotz dieser Einschränkungen wird bestätigt, dass die Methodik für erfahrene Anwender:innen eine hinreichende Einfachheit aufweist. Nichtsdestotrotz kann an dieser Stelle für die Weiterentwicklung der Methodik angesetzt werden.

- **Simplizität:**

Für die Bewertung der Simplizität wurde keine Begründung angegeben. Aus diesem Grund wird versucht eine argumentativ-analytische Begründung zu entwickeln: Aufgrund der Tatsache, dass die Methodik für unterschiedliche Anwendungsfälle einsetzbar sein soll, beinhaltet sie Elemente, die nicht für jeden Anwendungsfall relevant sind. Je nach Anwendungsfall kann somit der Fokus auf wesentliche Elemente nicht gegeben sein. In einer zukünftigen Weiterentwicklung der Methodik kann dieser Aspekt durch die bessere Kennzeichnung der einzelnen Elemente erreicht werden. Für verschiedene Anwendungsfallarten kann exemplarisch dargestellt werden, welche Elemente der Methodik durchlaufen werden sollten.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem abschließenden Kapitel wird die Forschungsarbeit sowie die erarbeiteten Erkenntnisse zusammengefasst und ein inhaltliches Fazit gezogen. Darauf aufbauend wird ein Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungsthemen im bearbeiteten Bereich gegeben.

6.1 Zusammenfassung

Lernfabriken haben sich in den vergangenen Jahren zum etablierten Werkzeug zur Vermittlung produktionsrelevanter Kompetenzen entwickelt [Ab15]. Dabei erhalten Teilnehmer:innen die Möglichkeit, vermitteltes Wissen über Konzepte und Methoden direkt in einer realitätsnahen Umgebung zu erproben [AMT18]. Obwohl das Konzept der Lernfabrik im Vergleich zu klassischen Lernarrangements diverse Potentiale (z. B. Realitätsnähe, praxisnahe Lernumgebung) bietet, ist es doch mit Limitationen (z. B. Abbildungsfähigkeit, Wandlungsfähigkeit, Mobilität) verbunden. Neue Technologien wie VR können hierbei Abhilfe schaffen. In Kapitel 1 wurde dargestellt, dass wachsender Bedarf an geeigneten Kompetenzentwicklungswerkzeugen besteht. Virtuelle LLK können ein solches Werkzeug darstellen.

Die vorliegende Forschungsarbeit hat zum Ziel, eine wissenschaftlich fundierte, erprobte und im praktischen Kontext anwendbare Methodik zur kompetenzorientierten Gestaltung und Implementierung von virtuellen LLK für Lernfabriken zu entwickeln. Dazu wurden bestehende Ansätze zur kompetenzorientierten Gestaltung von physischen Lernfabriken durch Betrachtungen im Hinblick auf die Eigenheiten der Technologie VR weiterentwickelt.

In Kapitel 2 wurde herausgearbeitet, dass bisherige Gestaltungsansätze den Einsatz von VR in Lernfabriken nicht fokussieren. Bestehende Gestaltungsansätze beschäftigen sich allenfalls am Rande mit derartigen Virtualisierungsaspekten. Eine gezielte Betrachtung der Technologie VR findet somit nicht statt. Die in Kapitel 3 formulierte Zielsetzung war daher, die genannte Forschungslücke durch die Entwicklung einer wissenschaftlich fundierten Metho-

dik zu schließen. Hierzu wurden eingangs zwei Forschungsfragen abgeleitet, die im Folgenden beantwortet werden:

Forschungsfrage 1:

Nach welchem strukturierten Vorgehen können virtuelle LLK für Lernfabriken gestaltet und implementiert werden?

Die in der vorliegenden Forschungsarbeit entwickelte Methodik zur Gestaltung und Implementierung von virtuellen LLK für Lernfabriken teilt sich in insgesamt drei Methodikbausteine auf. Sie wird durch zwei flankierende Methodikbausteine zur Softwareentwicklung und Auswahl der allgemeinen Entwicklungsmethode ergänzt (Kapitel 4). Im Rahmen dieser flankierenden Methodikbausteine müssen zunächst übergeordnete Fragestellungen zur Softwareentwicklung und allgemeinen Entwicklungsmethode beantwortet werden. Neben der Frage ob die Software-Entwicklung intern oder durch einen externen Entwickler stattfindet, ist hier auch zu entscheiden, ob das Gesamtprojekt agil oder mit klassische Projektmanagementmethoden umgesetzt wird. Unter diesen Voraussetzungen werden in Methodikbaustein I die Rahmenbedingungen für das LLK analysiert. Ausgehend vom organisationalen Umfeld, der Zielgruppe sowie den intendierten Kompetenzen werden die potenziellen Handlungsfelder für den Einsatz von VR definiert. Hierbei werden Herausforderungen identifiziert und Zielsetzungen für den individuellen Anwendungsfall definiert. Abschließend werden in diesem Methodikbaustein technische, organisationale und didaktische Anforderungen abgeleitet, kategorisiert und priorisiert. Diese Festlegungen dienen als Eingangsgrößen für die kompetenzorientierte Gestaltung des virtuellen LLK (Methodikbaustein II). In diesem Baustein wird zunächst ein geeignetes VR-System ausgewählt. Die anschließende Gestaltung des virtuellen Lehr-Lern-Szenarios erfolgte durch die kompetenzorientierte Ableitung geeigneter Szenarien und Szenarioelemente. Für diese erfolgt im Anschluss eine Detailgestaltung, welche für jedes Szenarioelement geeignete Gestaltungselemente vorsieht und diese zu zielgruppengeeigneten Gestaltungselementpaketen zusammenfasst. Insbesondere die in diesem Methodikbaustein durchgeführten Betrachtungen adressieren die in Abschnitt 2.3 beschriebenen Betrachtungsperspektive. Methodikbaustein III beschreibt abschließend die Integration des entwickelten LLK. Hierzu finden neben Erprobungen im Hinblick auf die Nutzbarkeit und Eignung zur Kompetenzentwicklung auch die notwendigen Maßnahmen zur Implementierung

statt. Die am Schluss durchgeführte Betrachtung zur Weiterentwicklung stellt die nachhaltige Integration sicher. Wie in Abschnitt 5.2 gezeigt werden konnte, erfüllt die entwickelte Methodik nach Meinung der befragten Expert:innen die im Vorfeld definierten Anforderungen.

Forschungsfrage 2:

Sind die im Rahmen der Methodikanwendung gestalteten LLK in der Lage, die Kompetenzentwicklung effektiv zu unterstützen?

Die in dieser Forschungsarbeit entwickelte Methodik wurde in einem Anwendungsfall erprobt (Kapitel 5). In diesem Zusammenhang wurde ein Vergleichsexperiment durchgeführt, bei dem ein virtuelles LLK als Ergebnis dieser Methodik mit einem bestehenden physischen LLK verglichen wurde. Die durchgeführte Kompetenzmessung konnte die Nutzbarkeit und Eignung zur Kompetenzentwicklung bestätigen. Die ergänzend durchgeführte Expert:innenbefragung konnte zudem die Erfüllung der gestellten Anforderungen nachweisen.

Abschließend lässt sich feststellen, dass im Rahmen dieser Forschungsarbeit eine Methodik entwickelt wurde, welche die Gestaltung virtueller LLK für Lernfabriken ermöglicht. Dabei konnte auf bestehende Ansätze aufgebaut und diese im Hinblick auf den VR-Einsatz konsequent weiterentwickelt werden. Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zur Lernfabrik-Forschung und gibt Lernfabrikentwickler:innen ein systematisches Vorgehen für die Gestaltung innovativer virtueller LLK an die Hand.

6.2 Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit konnten wertvolle Erkenntnisse im Hinblick auf die Gestaltung und die Implementierung von virtuellen LLK in Lernfabriken erarbeitet werden. Gleichwohl wurde weiterer Forschungsbedarf identifiziert. Dabei können, wenn auch nicht erschöpfend, folgende Aspekte Ausgangspunkte für weitere Forschungsarbeiten sein:

- Zunächst befasst sich die entwickelte Methodik primär mit der Gestaltung von VR basierten LLK. Für die weiteren Betrachtungen kann es lohnenswert sein, den Betrachtungsraum auf allgemeine XR-Konzepte zu erweitern. Es kann in diesem Zusammenhang zum einen die Eignung der bestehenden Methodik zur Entwicklung eben dieser Konzepte

überprüft werden und die bestehende Methodik bedarfsgerecht erweitert beziehungsweise angepasst werden.

- Obwohl im Rahmen dieser Forschungsarbeit bereits erste Erkenntnisse zum Einsatz von VR in Lernfabriken gewonnen werden konnten, kann es lohnenswert sein, die Fundierung weiter zu verbessern. Hierzu bietet es sich an, vor allem die Datengrundlage weiter zu verbessern. Aufgrund pandemiebedingter Einschränkungen wurde die Evaluation dieser Forschungsarbeit primär mit Student:innen als Proband:innen durchgeführt. Für eine ganzheitliche Betrachtung sollten zukünftige Forschungsarbeiten auch andere Anwender:innen (z. B. aus der Industrie) mit einbeziehen. Weiter wurden die Ergebnisse dieser Arbeit auf Basis eines vergleichsweise interaktionsarmen Lehr-Lern-Inhalts generiert. Zukünftige Forschungsarbeiten sollten dementsprechend auch interaktivere Szenarien in ihre jeweiligen Betrachtungen einbeziehen.
- Die Technologie VR entwickelt sich stetig weiter, sodass absehbar ist, dass die Betrachtungen dieser Forschungsarbeit in absehbarer Zeit partiell nicht mehr dem aktuellen Stand der Technik entsprechen werden. Zukünftige Forschungsarbeiten sollten sich diesem Umstand widmen und die Betrachtungen auf den jeweils aktuellen technologischen Stand anpassen. Dies ist vor allem deshalb wichtig, weil sich die Grenzen des mit VR Möglichen beziehungsweise Umsetzbaren immer weiter verschieben.
- Die Ergänzung der im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelten Methodik mit neueren Gestaltungsansätzen, wie bspw. der Konfigurationsmethodik nach KRESS [Kr22], sollte in zukünftigen Forschungsarbeiten untersucht werden. Dabei kann eine mögliche Fragestellung lauten, in wie weit vorhandene Konfigurationswerkzeuge unter Berücksichtigung des Möglichkeitsraumes von VR sinnvoll eingesetzt werden können.
- Die weitergehende Adressierung der Limitation *Abbildungsfähigkeit* physischer Lernfabriken im Hinblick auf neue Themenfelder, wie bspw. Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft, ist zu überprüfen.

In Zukunft kann VR einen wertvollen Beitrag zur Erweiterung von Lernfabriken, insbesondere im Hinblick auf Ressourceneffizienz, Abbildungsfähig-

keit und Ortsunabhängigkeit leisten. Gleichwohl wird es eines weiteren gesellschaftlichen und wissenschaftlichen Diskurses zum Thema VR bedürfen. Mit jedem weiteren Fortschritt der Technologie und der zunehmenden Verlagerung der verschiedenen Lebensbereiche aus physischen in virtuelle Räume, ergeben sich neue Herausforderungen. Hierzu bedarf es eines Gestaltungsrahmens, der neben den inhaltlichen Aspekten auch die gesellschaftlichen, rechtlichen und sozialen Aspekte allgemeinwohlorientiert berücksichtigt [Sc22]. Was am Ende bleibt und zukünftige Arbeiten zu diesem Thema maßgeblich beeinflussen wird, ist die philosophische Fragestellung, ob auch virtuelle Realitäten real sind. Schon heute kann diese Fragestellung unter Umständen bejaht werden: Die virtuelle Umgebung existiert, sie unterliegt kausalen Zusammenhängen und besteht unabhängig vom Geist der Anwender:innen [Ch17]. Mit zunehmender Verschiebung des Lebens in den virtuellen Raum wird sich der gesellschaftliche Stellenwert virtueller Welten verändern. Hieraus ergeben sich neben neuen Anforderungen und Problemstellungen auch neue Chancen für die Kompetenzentwicklung und eine Vielzahl an Anknüpfungspunkten für weitere wissenschaftliche Betrachtungen.

Literaturverzeichnis

Literaturquellen

- [AAW11] Abulrub, A.-H. G.; Attridge, A. N.; Williams, M. A.: Virtual reality in engineering education: The future of creative learning. In: Proceedings of the 2011 IEEE global engineering education conference (EDUCON), S. 751–757, 2011.
- [Ab10] Abele, E.; Tenberg, R.; Wennemer, J.; Cachay, J.: Kompetenzentwicklung in Lernfabriken für die Produktion. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 105/10, S. 909–913, 2010.
- [Ab15] Abele, E.; Metternich, J.; Tisch, M.; Chryssolouris, G.; Sihm, W.; ElMaraghy, H.; Hummel, V.; Ranz, F.: Learning factories for research, education, and training. In: Procedia CIRP 32, S. 1–6, 2015.
- [Ab16] Abele, E.; Bauerdick, C. J.; Strobel, N.; Panten, N.: ETA learning factory: A holistic concept for teaching energy efficiency in production. In: Procedia CIRP 54, S. 83–88, 2016.
- [Ab17] Abele, E.; Chryssolouris, G.; Sihm, W.; Metternich, J.; ElMaraghy, H.; Seliger, G.; Sivard, G.; ElMaraghy, W.; Hummel, V.; Tisch, M.: Learning factories for future oriented research and education in manufacturing. In: CIRP Annals 66/2, S. 803–826, 2017.
- [Ac22] Acatech (2022): Blinde Flecken in der Umsetzung von Industrie 4.0 – identifizieren und verstehen. URL: <https://www.acatech.de/publikation/blinde-flecken-i40/download-pdf?lang=de> (Zugriff am 12.03.2023).
- [Ae94] Aepli, H.: Denken: das Ordnen des Tuns: Denkprozesse. Klett-Cotta, Stuttgart, 1994.

- [AFS17] Abele, E.; Flum, D.; Strobel, N.: A systematic approach for designing learning environments for energy efficiency in industrial production. In: *Procedia Manufacturing* 9, S. 9–16, 2017.
- [AKR19] Auberger, E.; Karre, H.; Ramsauer, C.: Introduction of a new product in an operating assembly process at Graz University of Technologys LEAD Factory. In: *Procedia Manufacturing* 31, S. 103–108, 2019.
- [AMT18] Abele, E.; Metternich, J.; Tisch, M.: *Learning Factories: Concepts, Guidelines, Best-Practice Examples*. Springer, Cham, 2018.
- [An16] Antoniou, S.; Rentzos, L.; Mavrikios, D.; Georgoulas, K.; Mourtzis, D.; Chryssoulouris, G.: A virtual reality application to attract young talents to manufacturing. In: *Procedia CIRP* 57, S. 134–139, 2016.
- [AR11] Abele, E.; Reinhart, G.: *Zukunft der Produktion*. Hanser, München, 2011.
- [As20] Ashtari, N.; Bunt, A.; McGrenere, J.; Nebeling, M.; Chilana, P.K.: Creating augmented and virtual reality applications: Current practices, challenges, and opportunities. In: *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, S. 1–13, 2020.
- [Ba17] Baena, F.; Guarin, A.; Mora, J.; Sauza, J.; Retat, S.: Learning factory: The path to industry 4.0. In: *Procedia Manufacturing* 9, S. 73–80, 2017.
- [Ba18] Bauer, H.; Brandl, F.; Lock, C.; Reinhart, G.: Integration of Industrie 4.0 in lean manufacturing learning factories. In: *Procedia Manufacturing* 23, S. 147–152, 2018.
- [Ba96] Barro, R. J.: *Determinants of economic growth: A cross-country empirical study*. National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA, 1996.
- [BC07] Barney, J. B.; Clark, D. N.: *Resource-based theory: creating and sustaining competitive advantage*. Oxford University Press, Oxford, 2007.

-
- [BC09] Blessing, L. T.; Chakrabarti, A.: DRM: A design research methodology. Springer, London, 2009.
- [BE91] Bonwell, C. C.; Eison, J. A.: Active learning: Creating excitement in the classroom. 1991 ASHE-ERIC Higher Education Reports. ERIC, 1991.
- [BF97] Boud, D.; Feletti, G.: The Challenge of Problem Based Learning. Routledge, New York, 1997.
- [BG09] Blake, J.; Gurocak, H. B.: Haptic glove with MR brakes for virtual reality. In: IEEE/ASME Transactions On Mechatronics 14/5, S. 606–615, 2009.
- [Bi00] Bimmel, P.: Lernerautonomie und Lernstrategien. In (Neuner, G., Hrsg.): Fernstudienprojekt zur Fort- und Weiterbildung im Bereich Germanistik und Deutsch als Fremdsprache, Teilbereich Deutsch als Fremdsprache. Bd. 23, Langenscheidt, Berlin, 2000.
- [Bi20] Bitkom e.V. (2020): Deutsche Wirtschaft läuft der Digitalisierung weiter hinterher. URL: https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Deutsche-Wirtschaft-laeuft-der-Digitalisierung-weiter-hinterher#_ (Zugriff am 15.02.2023).
- [Bi21] Bitkom e.V. (2021): Fact Sheet: Augmented Reality (AR) & Virtual Reality (VR) 2021/22. URL: https://www.bitkom.org/sites/default/files/2021-10/211005_ct_fact-sheet_ar-vr.pdf (Zugriff am 15.02.2023).
- [BK20] Buehler, K.; Kohne, A.: Besser Lernen mit VR/AR Anwendungen. In (Orsolits, H.; Lackner, M., Hrsg.): Virtual Reality und Augmented Reality in der Digitalen Produktion. Springer Gabler, Wiesbaden, S. 75–97, 2020.
- [BK21] Broy, M.; Kuhrmann, M.: Einführung in die Softwaretechnik. Springer, Berlin, 2021.
- [BKM09] Bangor, A.; Kortum, P.; Miller, J.: Determining what individual SUS scores mean: Adding an adjective rating scale. In: Journal of Usability Studies 4/3, S. 114–123, 2009.
- [BKS14] Berg, B.; Knott, P.; Sandhaus, G.: Hybride Softwareentwicklung: Das Beste aus klassischen und agilen Methoden in einem Modell vereint. Springer, Berlin, 2014.

- [Bl56] Bloom, B. S.; Engelhart, M. D.; Furst, E. J.; Hill, W. H.; R., K. D.: Taxonomy of Educational Objectives. The Classification of Educational Goals, Handbook I: Cognitive Domain. David McKay Company, New York, 1956.
- [Br90] Bricken, W.: Virtual reality: Directions of growth notes from the SIGGRAPH'90 panel. In: Virtual Reality: Directions of Growth 16, 1990.
- [Br91] Bricken, M.: Virtual reality learning environments: potentials and challenges. In: Computer Graphics 25/3, S. 178–184, 1991.
- [Br96a] Brooke, J.: SUS-A quick and dirty usability scale. In: Usability Evaluation in Industry 189/194, S. 4–7, 1996.
- [Br96b] Bryson, S.: Virtual reality in scientific visualization. In: Communications of the ACM 39/5, S. 62–71, 1996.
- [BT52] Bradley, R. A.; Terry, M. E.: Rank analysis of incomplete block designs: I. The method of paired comparisons. In: Biometrika 39/3, S. 324–345, 1952.
- [Bu16] Bundesministerium für Bildung und Forschung (2016): Zukunft der Arbeit: Innovationen für die Arbeit von Morgen. URL: https://www.bmbf.de/pub/Zukunft_der_Arbeit.pdf (Zugriff am 20.03.2023).
- [Bu19] Bundesministerium für Bildung und Forschung (2019): Digitale Zukunft: Lernen. Forschen. Wissen. URL: https://bmbf-prod.bmbfcluster.de/upload_filestore/pub/BMBF_Digitalstrategie.pdf (Zugriff am 20.03.2023).
- [Bü20] Büth, L.; Juraschek, M.; Sangwan, K. S.; Herrmann, C.; Thiede, S.: Integrating virtual and physical production processes in learning factories. In: Procedia Manufacturing 45, S. 121–127, 2020.
- [BV17] Berg, L. P.; Vance, J. M.: Industry use of virtual reality in product design and manufacturing: a survey. In: Virtual Reality 21, S. 1–17, 2017.
- [Ca12] Cachay, J.; Wennemer, J.; Abele, E.; Tenberg, R.: Study on action-oriented learning with a Learning Factory approach. In: Procedia – Social and Behavioral Sciences 55, S. 1144–1153, 2012.

-
- [CE10] CEDEFOP (2010): Skills Supply and Demand in Europe: Medium-Term Forecast to 2020. URL: https://www.cedefop.europa.eu/files/3052_en.pdf (Zugriff am 05.03.2023).
- [Ch17] Chalmers, D. J.: The virtual and the real. In: *Disputatio: International Journal of Philosophy* 9/46, 2017.
- [Co19] Conrad, A.; Oberc, H.; Wannöffel, M.; Kuhlenkötter, B.: Co-determination—An interdisciplinary concept to train PhD students from different disciplines. In: *Procedia Manufacturing* 31, S. 129–135, 2019.
- [Co93] Cooper, P. A.: Paradigm shifts in designed instruction: From behaviorism to cognitivism to constructivism. In: *Educational Technology* 33/5, S. 12–19, 1993.
- [CR07] Chittaro, L.; Ranon, R.: Web3D technologies in learning, education and training: Motivations, issues, opportunities. In: *Computers & Education* 49/1, S. 3–18, 2007.
- [Cr92] Cruz-Neira, C.; Sandin, D. J.; DeFanti, T. A.; Kenyon, R. V.; Hart, J. C.: The CAVE: audio visual experience automatic virtual environment. In: *Communications of the ACM* 35/6, S. 64–73, 1992.
- [CSG03] Connell, M. W.; Sheridan, K.; Gardner, H.: On abilities and domains. In (Sternberg, R. J.; Grigorenko, E. L., Hrsg.): *The psychology of abilities, competencies, and expertise*. Cambridge University Press, Cambridge, S. 126–155, 2003.
- [CSG20] Cruz, M. L.; Saunders-Smiths, G. N.; Groen, P.: Evaluation of competency methods in engineering education: a systematic review. In: *European Journal of Engineering Education* 45/5, S. 729–757, 2020.
- [Da15] Davis, A.: Virtual reality simulation: an innovative teaching tool for dietetics experiential education. In: *The Open Nutrition Journal* 9/1, 2015.
- [DAI20] Daling, L. M.; Abdelrazeq, A.; Isenhardt, I.: A Comparison of Augmented and Virtual Reality Features in Industrial Trainings. In: *Proceedings of the 22. HCI International Conference (HCII 2020)*, S. 47–65, 2020.

- [De21] Deutsche Telekom AG (2021): Digitalisierungsindex Mittelstand 2019/2020 - Der Status Quo des deutschen Mittelstandes. URL: <https://www.telekom.com/resource/blob/584562/9da7a4360a39062b2389f7be094efdeb/dl-191105-bericht-digitalisierungsindex-data.pdf> (Zugriff am 18.02.2023).
- [De83] De Charms, R.: Personal causation: The internal affective determinants of behavior. Routledge, New York, 1983.
- [De91] Deci, E. L.; Vallerand, R. J.; Pelletier, L. G.; Ryan, R. M.: Motivation and education: The self-determination perspective. In: *Educational Psychologist* 26/3-4, S. 325–346, 1991.
- [De93] Dehnbostel, P.: Lernen im Arbeitsprozeß und neue Lernortkombinationen. In (Bundesinstitut für Berufsbildung, Hrsg.): *Umsetzung neuer Qualifikationen in die Berufsbildungspraxis – Entwicklungstendenzen und Lösungswege*. BW, Bildung und Wissen, Verl. und Software, Nürnberg, 1993.
- [Di09] Dietrich, S.: Selbstgesteuertes Lernen in der Weiterbildungspraxis. Ergebnisse und Erfahrungen aus dem Projekt SeGeL. W. Bertelsmann Verlag GmbH & Co. KG, Bielefeld, 2009.
- [DJ92] Duffy, T. M.; Jonassen, D. H.: *Constructivism and the technology of instruction: A conversation*. Routledge, New York, 1992.
- [DJR17] Dede, C. J.; Jacobson, J.; Richards, J.: Introduction: Virtual, augmented, and mixed realities in education. In: *Virtual, Augmented, and Mixed Realities in Education*, S. 1–16, 2017.
- [DKM15] Dombrowski, U.; Krenkel, P.; Malorny, C.: Erfahrbares Lernen von Kompetenzen für die Produktion von morgen. In (Meier, H., Hrsg.): *Lehren und Lernen für die moderne Arbeitswelt*. GITO, Berlin, S. 285–310, 2015.
- [Do04] Dodgson, N. A.: Variation and extrema of human interpupillary distance. In: *Proceedings of the Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI*, S. 36–46, 2004.
- [Dö13] Dörner, R.; Broll, W.; Grimm, P.; Jung, B.: *Virtual und Augmented Reality*. Springer, Heidelberg, 2013.

-
- [Do15] Doch, S.; Merker, S.; Straube, F.; Roy, D.: Aufbau und Umsetzung einer Lernfabrik: Produktionsnahe Lean-Weiterbildung in der Prozess- und Pharmaindustrie. In: *Industrie Management* 25, S. 26–30, 2015.
- [DR13] Deci, E. L.; Ryan, R. M.: *Intrinsic Motivation and Self-Determination in Human Behavior*. Springer, New York, 2013.
- [DS17] Dehnbostel, P.; Schröder, T.: Work-based and work-related learning – models and learning concepts. In: *The Online Journal for Technical and Vocational Education and Training in Asia (TVET@sia)* 9, S. 1–12, 2017.
- [Du23] Duden (2023): Stereoskopie. URL: <https://www.duden.de/rechtsschreibung/Stereoskopie> (Zugriff am 06.03.2023).
- [EC13] ECSIP Consortium: *Study on the Competitiveness of the Electrical and Electronic Engineering Industry Final Report*. ECSIP Consortium, München, 2013.
- [Ed20] Eder, M.; Hulla, M.; Mast, F.; Ramsauer, C.: On the application of augmented reality in a learning factory working environment. In: *Procedia Manufacturing* 45, S. 7–12, 2020.
- [EGM17] Enke, J.; Glass, R.; Metternich, J.: Introducing a maturity model for learning factories. In: *Procedia Manufacturing* 9, S. 1–8, 2017.
- [EK08] Eilström, P.-E.; Kock, H.: Competence development in the workplace: concepts, strategies and effects. In: *Asia Pacific Education Review* 9/1, S. 5–20, 2008.
- [En20a] Enke, J.: *Methodik zur multidimensionalen, reifegradbasierten Entwicklung von Lernfabriken für die Produktion*. Dissertation. Shaker, Düren, 2020.
- [En20b] Enke, J.; Oberc, H.; Riemann, T.; Schuhmacher, J.; Hummel, V.; Kuhlenkötter, B.; Metternich, J.; Prinz, C.: Cooperation between Learning Factories: Approach and Example. In: *Procedia Manufacturing* 45, S. 222–227, 2020.
- [Er17] Erpenbeck, J.; Rosenstiel, L.; Grote, S.; Sauter, W.: *Handbuch Kompetenzmessung: Erkennen, verstehen und bewerten von Kompetenzen in der betrieblichen, pädagogischen und psychologischen Praxis*. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2017.

- [ES13] Erpenbeck, J.; Sauter, W.: So werden wir lernen! Springer Gabler, Berlin, 2013.
- [Eu08] Europäisches Parlament (2008): Empfehlung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Einrichtung des Europäischen Qualifikationsrahmens für lebenslanges Lernen. URL: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008H0506\(01\)&from=DE](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008H0506(01)&from=DE) (Zugriff am 10.10.2022).
- [Eu20] Europäische Kommission (2020): Digital Education Action Plan (2021-2027): Resetting education and training for the digital age. URL: https://education.ec.europa.eu/sites/default/files/document-library-docs/deap-communication-sept2020_en.pdf (Zugriff am 15.01.2023).
- [FK87] Franke, G.; Kleinschmitt, M.: Ansätze zur Intensivierung des Lernens am Arbeitsplatz. Bundesinstitut für Berufsbildung, Berlin, 1987.
- [FO15] Freina, L.; Ott, M.: A literature review on immersive virtual reality in education: state of the art and perspectives. In: The International Scientific Conference e-Learning and Software for Education 1/133, S. 1–8, 2015.
- [FS21] Faller, C.; Schimanski, M.: Virtual Expansion of a Physical Production Facility for Flexible Learning and Training Environments. In: SSRN, S. 1–3, 2021.
- [Ga17] Gartner (2017): Top Trends in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies. URL: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/top-trends-in-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2017> (Zugriff am 15.02.2023).
- [Ga22] Gartner (2022): Was gibt es Neues im Hype Cycle 2022 von Gartner für neue Technologien? URL: <https://www.gartner.de/de/artikel/was-ist-neu-im-hype-cycle-2022-von-gartner-fuer-neue-technologien> (Zugriff am 03.03.2023).
- [Ga97] Garrison, D. R.: Self-directed learning: Toward a comprehensive model. In: Adult Education Quarterly 48/1, S. 18–33, 1997.

-
- [GCR96] Greeno, J. G.; Collins, A. M.; Resnick, L. B.: Cognition and learning. In (Berliner, D. C.; Calfee, R. C., Hrsg.): Handbook of Educational Psychology. Bd. 77, Macmillan, New York, S. 15–46, 1996.
- [Gi66] Gibson, J.J.: The senses considered as perceptual systems. Houghton Mifflin, 1966.
- [Gl18] Glass, R.; Meissner, A.; Gebauer, C.; Stürmer, S.; Metternich, J.: Identifying the barriers to Industrie 4.0. In: Procedia CIRP 72, S. 985–988, 2018.
- [Gl21] Glass, R.: Methodik zur multivariaten Messung fachlich methodischer Kompetenzen für die Produktion. Dissertation. Shaker, Düren, 2021.
- [GM20] Glass, R.; Metternich, J.: Method to measure competencies - a concept for development, design and validation. In: Procedia Manufacturing 45, S. 37–42, 2020.
- [Go15] Goerke, M.; Schmidt, M.; Busch, J.; Nyhuis, P.: Holistic approach of lean thinking in learning factories. In: Procedia CIRP 32, S. 138–143, 2015.
- [Go94] Gonczi, A.: Competency based assessment in the professions in Australia. In: Assessment in Education 1/1, S. 27–44, 1994.
- [GPP16] Gräßler, I.; Pöhler, A.; Pottebaum, J.: Creation of a learning factory for cyber physical production systems. In: Procedia CIRP 54, S. 107–112, 2016.
- [GPS72] Glass, G. V.; Peckham, P. D.; Sanders, J. R.: Consequences of Failure to Meet Assumptions Underlying the Fixed Effects Analyses of Variance and Covariance. In: Review of Educational Research 42/3, S. 237–288, 1972.
- [Gr02] Grenning, J.: Planning poker or how to avoid analysis paralysis while release planning. In: Hawthorn Woods: Renaissance Software Consulting 3, S. 1–3, 2002.
- [Gu08] Gudjons, H.: Handlungsorientiert lehren und lernen: Schüleraktivierung – Selbsttätigkeit - Projektarbeit. Klinkhardt, Bad Heilbrunn, 2008.

- [GUB17] Gronau, N.; Ullrich, A.; Bender, B.: Hybride Lernfabrik im Anwendungszentrum Industrie 4.0. In (Gronau, N., Hrsg.): Industrial Internet of Things in der Arbeits- und Betriebsorganisation. GITO, Berlin, S. 1–24, 2017.
- [GUT17] Gronau, N.; Ullrich, A.; Teichmann, M.: Development of the industrial IoT competences in the areas of organization, process, and interaction based on the learning factory concept. In: *Procedia Manufacturing* 9, S. 254–261, 2017.
- [Gy01] Gylfason, T.: Natural resources, education, and economic development. In: *European Economic Review* 45/4-6, S. 847–859, 2001.
- [Hä09] Häder, M.: *Delphi-Befragungen: Ein Arbeitsbuch*. Springer, Wiesbaden, 2009.
- [Ha14] Haghighi, A.; Shariatzadeh, N.; Sivard, G.; Lundholm, T.; Eriksson, Y.: Digital learning factories: conceptualization, review and discussion. In: *Proceedings of the 2014 The 6th Swedish Production Symposium (SPS14)*, 2014.
- [Ha16] Hambach, J.; Diezemann, C.; Tisch, M.; Metternich, J.: Assessment of students' lean competencies with the help of behavior video analysis—are good students better problem solvers? In: *Procedia CIRP* 55, S. 230–235, 2016.
- [Ha17] Hambach, J.; Tenberg, R.; Reiß, J.; Tisch, M.; Metternich, J.: Lernkonzepte für eine wandlungsfähige Produktion. In: *Journal of Technical Education* 5/1, 2017.
- [Ha18] Haberfellner, R.; Weck, O. d.; Fricke, E.; Vössner, S.: *Systems Engineering - Grundlagen und Anwendung*. Orell Füssli & Co, Zürich, 2018.
- [Ha58] Harlow, H. F.: The nature of love. In: *American psychologist* 13/12, S. 673, 1958.
- [Ha92] Harwell, M. R.; Rubinstein, E. N.; Hayes, W. S.; Olds, C. C.: Summarizing Monte Carlo Results in Methodological Research: The One- and Two-Factor Fixed Effects ANOVA Cases. In: *Journal of Educational Statistics* 17/4, S. 315–339, 1992.

-
- [Ha95] Hager, P.: Competency standards—a help or a hindrance? An Australian perspective. In: *The Vocational Aspect of Education* 47/2, S. 141–151, 1995.
- [HČ18] Hellriegel, J.; Čubela, D.: Das Potenzial von Virtual Reality für den schulischen Unterricht - Eine konstruktivistische Sicht. In: *MedienPädagogik: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung*, S. 58–80, 2018.
- [HD92] Held, R. M.; Durlach, N. I.: Telepresence. In: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 1/1, S. 109–112, 1992.
- [HE09] Heyse, V.; Erpenbeck, J.: *Kompetenztraining: Informations- und Trainingsprogramme*. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2009.
- [Hé13] Hébrard, P.: Ambiguities and paradoxes in a competence-based approach to vocational education and training in France. In: *European Journal for Research on the Education and Learning of Adults* 4/2, S. 111–127, 2013.
- [He20] Hecklau, F.; Ronald, O.; Kidschun, F.; Tominaj, S.: Veränderte Kompetenzanforderungen im Rahmen von Digitalisierung und Industrie 4.0. In (Heisig, P.; Orth, R.; Schönborn, J. M.; Thalmann, S., Hrsg.): *WM 2019 - Wissensmanagement in digitalen Arbeitswelten: Aktuelle Ansätze und Perspektiven-Knowledge Management in Digital Workplace Environments: State of the Art and Outlook*. Gesellschaft für Informatik e. V., Bonn, S. 9–29, 2020.
- [Hi07] Hinckley, K.: Input technologies and techniques. In (Sears, A.; Jacko, J. A., Hrsg.): *The Human-Computer Interaction Handbook*. CRC Press, Boca Raton, S. 162–172, 2007.
- [HKR06] Hua, H.; Krishnaswamy, P.; Rolland, J. P.: Video-based eyetracking methods and algorithms in head-mounted displays. In: *Optics Express* 14/10, S. 4328–4350, 2006.
- [HL20] Helmrich, R.; Leppelmeier, I.: *Sinkt die Halbwertszeit von Wissen? Theoretische Annahmen und empirische Befunde*. Verlag Barbara Budrich, Bonn, 2020.

- [HN15] Hussein, M.; Nätterdal, C.: The benefits of virtual reality in education – A comparison Study. Bachelorthesis. University of Gothenburg, Göteborg, 2015.
- [HS08] Hanson, K.; Shelton, B. E.: Design and development of virtual reality: analysis of challenges faced by educators. In: Journal of Educational Technology & Society 11/1, S. 118–131, 2008.
- [HT23a] HTC (2023): Controller. URL: <https://www.vive.com/de/accessory/controller/> (Zugriff am 26.02.2023).
- [HT23b] HTC (2023): Vive Cosmo Elite - Technische Daten. URL: <https://www.vive.com/de/product/vive-cosmos-elite/specs/> (Zugriff am 07.03.2023).
- [HT23c] HTC (2023): Vive Focus 3 - Technische Daten. URL: <https://www.vive.com/de/product/vive-focus3/specs/> (Zugriff am 08.03.2023).
- [HT23d] HTC (2023): Vive Focus 3 Eye-Tracker. URL: <https://business.vive.com/de/product/vive-focus-3-eye-tracker/> (Zugriff am 27.02.2023).
- [HT23e] HTC (2023): Vive Pro 2 - Technische Daten. URL: <https://www.vive.com/de/product/vive-pro2/specs/> (Zugriff am 08.03.2023).
- [HTM15] Hambach, J.; Tenberg, R.; Metternich, J.: Guideline-based Video Analysis of Competencies for a Target-oriented Continuous Improvement Process. In: Procedia CIRP 32, S. 25–30, 2015.
- [HW07] Hanushek, E. A.; Wößmann, L.: The role of education quality for economic growth. In: World Bank Policy Research Working Paper No. 4122 – SSRN, 2007.
- [Je15] Jerald, J.: The VR book: Human-centered design for virtual reality. ACM Books, 2015.
- [JJS91] Johnson, D. W.; Johnson, R. T.; Smith, K. A.: Active learning: Cooperation in the college classroom. Interaction Book Company, 1991.

-
- [Jo91] Jonassen, D. H.: Objectivism versus constructivism: Do we need a new philosophical paradigm? In: *Educational Technology Research and Development* 39, S. 5–14, 1991.
- [JR99] Jonassen, D. H.; Rohrer-Murphy, L.: Activity theory as a framework for designing constructivist learning environments. In: *Educational Technology Research and Development* 47/1, S. 61–79, 1999.
- [Ju14] Jung, E.: *Kompetenzerwerb*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2014.
- [Ju18] Juraschek, M.; Büth, L.; Posselt, G.; Herrmann, C.: Mixed reality in learning factories. In: *Procedia Manufacturing* 23, S. 153–158, 2018.
- [Ka17] Karre, H.; Hammer, M.; Kleindienst, M.; Ramsauer, C.: Transition towards an Industry 4.0 state of the LeanLab at Graz University of Technology. In: *Procedia Manufacturing* 9, S. 206–213, 2017.
- [Ka84] Kano, N.; Seraku, N.; Takahashi, F.; Tsuji, S.: Attractive quality and must-be quality. In: *The Journal of Japanese Society for Quality Control* 14/2, S. 39–48, 1984.
- [Ke13] Kerres, M.: *Mediendidaktik: Konzeption und Entwicklung mediengestützter Lernangebote*. Oldenbourg Verlag, München, 2013.
- [Ke18] Kersten, T. P.; Tschirschwitz, F.; Lindstaedt, M.; Deggim, S.: The historic wooden model of Solomon’s Temple: 3D recording, modelling and immersive virtual reality visualisation. In: *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development (JCHMSD)* 8/4, S. 448–464, 2018.
- [Ke21] Kerres, M.: *Didaktik – Lernangebote gestalten*. Waxmann UTB, Münster, 2021.
- [KHR19] Karre, H.; Hammer, M.; Ramsauer, C.: Building capabilities for agility in a learning factory setting. In: *Procedia Manufacturing* 31, S. 60–65, 2019.
- [Ki19] Kind, S.; Ferdinand, J.-P.; Jetzke, T.; Richter, S.; Weide, S.: Virtual und augmented reality. In: *Status quo, Herausforderungen und zukünftige Entwicklungen – TAB Arbeitsbericht 180*, 2019.

- [KK05] Kirkley, S.E.; Kirkley, J.R.: Creating next generation blended learning environments using mixed reality, video games and simulations. In: *TechTrends* 49/3, S. 42–53, 2005.
- [KL06] Klieme, E.; Leutner, D.: Kompetenzmodelle zur Erfassung individueller Lernergebnisse und zur Bilanzierung von Bildungsprozessen. Beschreibung eines neu eingerichteten Schwerpunktprogramms der DFG. In: *Zeitschrift für Pädagogik* 52/6, S. 876–903, 2006.
- [Kl06] Klein, G.: *Visual Tracking for Augmented Reality*. Dissertation. University of Cambridge, 2006.
- [KMW07] Kozlov, A.; MacDonald, B.; Wünsche, B.: Towards improving slam algorithm development using augmented reality. In: *Proceedings of Australasian Conference on Robotics and Automation*, 2007.
- [Ko16] Kovar, J.; Mouralova, K.; Ksica, F.; Kroupa, J.; Andrs, O.; Hadas, Z.: Virtual reality in context of Industry 4.0 proposed projects at Brno University of Technology. In: *Proceedings of the 2016 17th International Conference on Mechatronics-Mechatronika (ME)*, S. 1–7, 2016.
- [Ko22] Kolla, S.S.V.K.: *A Holistic Methodology to Deploy Industry 4.0 in Manufacturing Enterprises*. Dissertation. University of Luxembourg, Luxembourg, 2022.
- [Kr19] Kreß, A.; Lieb, N.; Lorenz, V.; Metternich, J.: Kompetenzorientierte Gestaltung mobiler Lernfabrikmodule bei der DB Netz AG. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 114/10, S. 631–634, 2019.
- [Kr20a] Kreß, A.; Riemann, T.; Roth, L.; Klipfel, S.; Metternich, J.; Grell, P.: *Requirements for the Implementation of Virtual Reality in Learning Factories*. TU Prints, Darmstadt, 2020.
- [Kr20b] Kronin, S.: *Anforderungs- und kompetenzorientierte Auswahl von Virtual Reality Hardware für Lernfabriktrainings*. Studienarbeit. Betreuer: Thomas Riemann. Technische Universität Darmstadt, 2020.

-
- [Kr22] Kreß, A.: Methodik zur Konfiguration von Lernfabriken für die schlanke Produktion. Dissertation. Shaker Verlag, Düren, 2022.
- [Kr23] Kreß, A.; Hummel, V.; Ahmad, R.; Hulla, M.; Quadri, W.; Caluque, M.; Gärtner, Q.; Weyand, A.; Barth, J.; Riemann, T.; Fumagalli, L.; Ramsauer, C.; Metternich, J.: Revision of the Learning Factory Morphology. In: SSRN, S. 1–7, 2023.
- [KSP21] Kolla, S. S. V. K.; Sanchez, A.; Plapper, P.: Comparing effectiveness of paper based and Augmented Reality instructions for manual assembly and training tasks. In: SSRN, S. 1–6, 2021.
- [Kü18] Küsters, D.: Methodik zum Aufbau und Betrieb einer Lernfabrik für die digitale Transformation der Produktion. Dissertation. Shaker Verlag, Aachen, 2018.
- [KWM21] Kreß, A.; Wuchterl, S.; Metternich, J.: Design approaches for learning factories—review and evaluation. In: SSRN, S. 1–6, 2021.
- [La15] Lanza, G.; Moser, E.; Stoll, J.; Haefner, B.: Learning factory on global production. In: *Procedia CIRP* 32, S. 120–125, 2015.
- [La16] Lanza, G.; Minges, S.; Stoll, J.; Moser, E.; Haefner, B.: Integrated and modular didactic and methodological concept for a learning factory. In: *Procedia CIRP* 54, S. 136–140, 2016.
- [Lé08] Lécuyer, A.; Lotte, F.; Reilly, R. B.; Leeb, R.; Hirose, M.; Slater, M.: Brain-computer interfaces, virtual reality, and videogames. In: *Computer* 41/10, S. 66–72, 2008.
- [Le23] Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, Prozesse und Systeme (2023): Lernfabrik. URL: <http://wirtschaftsinformatik-potsdam.de/industrie-40-labor/unser-zentrum/forschungsagenda-industrie-40/lernfabrik?lang=de> (Zugriff am 06.03.2023).
- [LFZ20] Leal, L. F.; Fleury, A.; Zancul, E.: Starting up a Learning Factory focused on Industry 4.0. In: *Procedia Manufacturing* 45, S. 436–441, 2020.
- [LKK96] Lix, L. M.; Keselman, J. C.; Keselman, H. J.: Consequences of Assumption Violations Revisited: A Quantitative Review of Alternatives to the One-Way Analysis of Variance F Test. In: *Review of Educational Research* 66/4, S. 579–619, 1996.

- [LN07] Lindeman, R. W.; Noma, H.: A classification scheme for multi-sensory augmented reality. In: Proceedings of the 2007 ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, S. 175–178, 2007.
- [LNP17] Longo, F.; Nicoletti, L.; Padovano, A.: Smart operators in industry 4.0: A human-centered approach to enhance operators' capabilities and competencies within the new smart factory context. In: Computers & Industrial Engineering 113, S. 144–159, 2017.
- [LR14] Laperrière, L.; Reinhart, G.: CIRP encyclopedia of production engineering. Springer, Berlin, 2014.
- [LW91] Lave, J.; Wenger, E.: Situated learning: Legitimate peripheral participation. Cambridge University Press, Cambridge, 1991.
- [Ma13] Mavrikios, D.; Papakostas, N.; Mourtzis, D.; Chryssolouris, G.: On industrial learning and training for the factories of the future: a conceptual, cognitive and technology framework. In: Journal of Intelligent Manufacturing 24/3, S. 473–485, 2013.
- [Ma19] Mavrikios, D.; Alexopoulos, K.; Georgoulas, K.; Makris, S.; Michalos, G.; Chryssolouris, G.: Using Holograms for visualizing and interacting with educational content in a Teaching Factory. In: Procedia Manufacturing 31, S. 404–410, 2019.
- [Mä19] Mäkiö-Marusik, E.; Colombo, A. W.; Mäkiö, J.; Pechmann, A.: Concept and case study for teaching and learning industrial digitalization. In: Procedia Manufacturing 31, S. 97–102, 2019.
- [Ma98] Mackay, W. E.: Augmented reality: linking real and virtual worlds: a new paradigm for interacting with computers. In: Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces, S. 13–21, 1998.
- [MBK17] Mulders, M.; Buchner, J.; Kerres, M.: Gestaltungsprinzipien für immersive Lernszenarien mit und über Virtual Reality. In: Architectural Design 6, S. 442–455, 2017.
- [MBK20] Mulders, M.; Buchner, J.; Kerres, M.: A framework for the use of immersive virtual reality in learning environments. In: International Journal of Emerging Technologies in Learning (IJET) 15/24, S. 208–224, 2020.

-
- [Me06] Mehling, M.: Implementation of a low cost marker based infrared optical tracking system. Diplomarbeit. Fachhochschule Stuttgart - Hochschule der Medien, 2006.
- [Me18a] Menn, J. P.; Sieckmann, F.; Kohl, H.; Seliger, G.: Learning process planning for special machinery assembly. In: *Procedia Manufacturing* 23, S. 75–80, 2018.
- [Me18b] Metternich, J.; Hertle, C.; Tisch, M.; Jokovic, B.; König, C.; Bruder, R.; Weber, C.; Tenberg, R.; Ardelt, T.: Betriebliche Kompetenzentwicklungsansätze zur Weiterentwicklung fachlich-methodischer und sozial-kommunikativer Kompetenzen in produktionsnahen Bereichen. In (Ahrens, D.; Molzberger, G., Hrsg.): *Kompetenzentwicklung in analogen und digitalisierten Arbeitswelten – Gestaltung sozialer, organisationaler und technologischer Innovationen*. Springer, Berlin, S. 73–87, 2018.
- [MGC18] Mavrikios, D.; Georgoulas, K.; Chryssolouris, G.: The teaching factory paradigm: Developments and outlook. In: *Procedia Manufacturing* 23, S. 1–6, 2018.
- [MH12] Mahnič, V.; Hovelja, T.: On using planning poker for estimating user stories. In: *Journal of Systems and Software* 85/9, S. 2086–2095, 2012.
- [Mi15] Milella, F.: Problem-solving by immersive virtual reality: Towards a more efficient product emergence process in automotive. In: *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)* 2/4, S. 860–867, 2015.
- [MK94] Milgram, P.; Kishino, F.: A taxonomy of mixed reality visual displays. In: *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems* 77/12, S. 1321–1329, 1994.
- [Mo18a] Mourtzis, D.; Boli, N.; Dimitrakopoulos, G.; Zygomas, S.; Koutoupes, A.: Enabling Small Medium Enterprises (SMEs) to improve their potential through the Teaching Factory paradigm. In: *Procedia Manufacturing* 23, S. 183–188, 2018.
- [Mo18b] Mourtzis, D.; Vlachou, E.; Dimitrakopoulos, G.; Zogopoulos, V.: Cyber-physical systems and education 4.0 – the teaching factory 4.0 concept. In: *Procedia Manufacturing* 23, S. 129–134, 2018.

- [MR20] Macedo, V.; Runde, C. (2020): Head-Mounted Displays: Messung räumlicher Präzision bei VR-Trackingsystemen. URL: https://www.vdc-fellbach.de/fileadmin/user_upload/Applicationszentrum_VAR_-_Bericht__04_2_-_AP2_-_Werkstattbericht__02_-_Messung_VR-Tracking-Präzision_-_Update.pdf (Zugriff am 10.10.2022).
- [MRD14] Matt, D.; Rauch, E.; Dallasega, P.: Mini-factory – A Learning Factory Concept for Students and Small and Medium Sized Enterprises. In: *Procedia CIRP* 17, S. 178–183, 2014.
- [Mü11] Müller-Benedict, V.: *Grundkurs Statistik in den Sozialwissenschaften*. VS Verlag, Wiesbaden, 2011.
- [Mü16] Müller, B. C.; Reise, C.; Duc, B. M.; Seliger, G.: Simulation-games for learning conducive workplaces: a case study for manual assembly. In: *Procedia CIRP* 40, S. 353–358, 2016.
- [MWS89] Mendenhall, W.; Wackerly, D. D.; Scheaffer, R. L.: Nonparametric statistics. In: *Mathematical Statistics with Applications*, S. 674–679, 1989.
- [No11] North, K.: *Wissensorientierte Unternehmensführung: Wissensmanagement gestalten*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2011.
- [NRS13] North, K.; Reinhardt, K.; Sieber-Suter, B.: *Kompetenzmanagement in der Praxis: Mitarbeiterkompetenzen systematisch identifizieren, nutzen und entwickeln*. Springer, Wiesbaden, 2013.
- [NW21] Niedermayr, D.; Wolfartsberger, J.: Design and Evaluation of a Virtual Training Environment for Industrial Assembly Tasks. In: *SSRN*, S. 1–6, 2021.
- [NZ88] Nickerson, R. S.; Zodhiates, P. P.: *Technology in education: Looking toward 2020*. Routledge, New York, 1988.
- [Oc20] Oculus (2020): Oculus Touch. URL: <https://www.oculus.com/rift/accessories/> (Zugriff am 30.08.2022).
- [Og17] Ogorodnyk, O.; Granheim, M.; Holtskog, H.; Ogorodnyk, I.: Roller skis assembly line learning factory–development and learning outcomes. In: *Procedia Manufacturing* 9, S. 121–126, 2017.

-
- [PB88] Pfeiffer, J. W.; Ballew, A. C.: Design Skills in human resource development. Univ. Assoc., San Diego, CA, 1988.
- [Pe19] Petrusch, N.; Sieckmann, F.; Menn, J. P.; Kohl, H.: Integration of active pharmaceutical ingredient production into a pharmaceutical lean learning factory. In: *Procedia Manufacturing* 31, S. 245–250, 2019.
- [Pi14] Pittich, D.: Diagnostik fachlich-methodischer Kompetenzen. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2014.
- [Pl15] Plorin, D.; Jentsch, D.; Hopf, H.; Müller, E.: Advanced Learning Factory (aLF) – Method, Implementation and Evaluation. In: *Procedia CIRP* 32, 2015.
- [Pl16] Plorin, D.: Gestaltung und Evaluation eines Referenzmodells zur Realisierung von Lernfabriken im Objektbereich der Fabrikplanung und des Fabrikbetriebes. Dissertation. Technische Universität Chemnitz, Institut für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme, Chemnitz, 2016.
- [Po18] Posada, J.; Zorrilla, M.; Dominguez, A.; Simoes, B.; Eisert, P.; Stricker, D.; Rambach, J.; Döllner, J.; Guevara, M.: Graphics and media technologies for operators in industry 4.0. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* 38/5, S. 119–132, 2018.
- [Pr23] Prozesslernfabrik CiP (2023): Unsere aktuellen Partner & Referenzen. URL: https://www.ptw.tu-darmstadt.de/prozesslernfabrik/partner_cip/aktuelle_partner_cip/index.de.jsp (Zugriff am 21.02.2023).
- [Ps95] Psotka, J.: Immersive training systems: Virtual reality and education and training. In: *Instructional Science* 23/5-6, S. 405–431, 1995.
- [PV18] Perret, J.; Vander Poorten, E.: Touching virtual reality: a review of haptic gloves. In: *ACTUATOR 2018; 16th International Conference on New Actuators*, S. 1–5, 2018.
- [QMG15] Quint, F.; Mura, K.; Gorecky, D.: In-factory learning - qualification for the factory of the future. In: *Acta Universitatis Cibiniensis. Technical Series* 66/1, S. 159–164, 2015.

- [Ra11] Rauer, M. (2011): Quantitative Usability-Analysen mit der System Usability Scale (SUS). URL: <https://blog.seibert-media.net/blog/2011/04/11/usability-analysen-system-usability-scale-sus/> (Zugriff am 26.02.23).
- [Re09] Reiner, D.: Methode der kompetenzorientierten Transformation zum nachhaltig schlanken Produktionssystem. Dissertation. Shaker, Aachen, 2009.
- [Re15] Rebenitsch, L.: Managing cybersickness in virtual reality. In: XRDS: Crossroads, The ACM Magazine for Students 22/1, S. 46–51, 2015.
- [Re17] Reinhart, G.: Handbuch Industrie 4.0 - Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. Carl Hanser, München, 2017.
- [Re94] Renkl, A.: Träges Wissen: Die unerklärliche Kluft zwischen Wissen und Handeln. LMU München: Lehrstuhl für Empirische Pädagogik und Pädagogische Psychologie, München, 1994.
- [Ri11] Riset, T.: SoC (System on Chip). In (Padua, D., Hrsg.): Encyclopedia of Parallel Computing. Springer, Boston, MA, S. 1837–1842, 2011.
- [Ri13] Riffelmacher, P.: Konzeption einer Lernfabrik für die variantenreiche Montage. Dissertation. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2013.
- [Ri20a] Riemann, T.; Kreß, A.; Roth, L.; Gorge, D.; Glass, R.; Metternich, J.; Grell, P.: Gestaltung von personalisierten Lernfabrik-schulungen in Virtual Reality im Kontext schlanker Produktion. In: Digitaler Wandel, Digitale Arbeit, Digitaler Mensch? GfA-Press, Dortmund, S. 1–6, 2020.
- [Ri20b] Riemann, T.; Kreß, A.; Roth, L.; Klipfel, S.; Metternich, J.; Grell, P.: Agile implementation of virtual reality in learning factories. In: Procedia Manufacturing 45, S. 1–6, 2020.
- [Ri20c] Riemann, T.; Kreß, A.; Roth, L.; Staiger, B.; Metternich, J.; Grell, P.: Virtual Reality in der betrieblichen Bildung. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 115/10, S. 673–676, 2020.

-
- [Ri21a] Riemann, T.; Kreß, A.; Klassen, L.; Metternich, J.: Hybrid Learning Factories for Lean Education: Approach and Morphology for Competency-Oriented Design of Suitable Virtual Reality Learning Environments. In: Proceedings of the 7th European Lean Educator Conference (ELEC), S. 60–67, 2021.
- [Ri21b] Riemann, T.; Kreß, A.; Roth, L.; Metternich, J.; Grell, P.: Approach for Conceptualization and Implementation of Virtual Reality in Learning Factories. In: SSRN, S. 1–6, 2021.
- [Ri21c] Riemann, T.; Kreß, A.; Roth, L.; Metternich, J.; Grell, P.: User-oriented Design of Virtual Reality Supported Learning Factory Trainings: Methodology for the Generation of Suitable Design Elements. In: SSRN, S. 1–6, 2021.
- [RKM22] Riemann, T.; Kronin, S.; Metternich, J.: Guidelines for the Systematic Selection of Virtual Reality Hardware for Learning Factories. In: SSRN, S. 1–6, 2022.
- [RKW95] Rheingold, H.; Kober, H.; Willim, B.: Virtuelle Welten: Reisen im Cyberspace. Rowohlt, Reinbek bei Hamburg, 1995.
- [RM21] Riemann, T.; Metternich, J.: Ansatz zur Konzeptionierung und Implementierung von Virtual Reality in Lernfabriken. In: WING-business 3/2021, S. 26–30, 2021.
- [RM22a] Riemann, T.; Metternich, J.: Building Competencies for Value Stream Mapping – Evaluation of a Virtual Learning Scenario. In: SSRN, S. 1–6, 2022.
- [RM22b] Riemann, T.; Metternich, J.: Virtual reality supported trainings for lean education: conceptualization, design and evaluation of competency-oriented teaching-learning environments. In: International Journal of Lean Six Sigma (IJLSS), S. 1–19, 2022.
- [RMC15] Rentzos, L.; Mavrikios, D.; Chryssolouris, G.: A two-way knowledge interaction in manufacturing education: The teaching factory. In: Procedia CIRP 32, S. 31–35, 2015.
- [RN95] Rekimoto, J.; Nagao, K.: The world through the computer: Computer augmented interaction with real world environments. In: Proceedings of the 8th Annual ACM Symposium on User Interface and Software Technology, S. 29–36, 1995.

- [RVB01] Rheinberg, F.; Vollmeyer, R.; Burns, B.: FAM: Ein Fragebogen zur Erfassung aktueller Motivation in Lern- und Leistungssituationen. In: *Diagnostica* 47, S. 57–66, 2001.
- [Sc18] Schmid, U.; Goertz, L.; Behrens, J.; Michel, L. P.; Radomski, S.; Thom, S.: *Monitor Digitale Bildung: Die Weiterbildung im digitalen Zeitalter*. Bertelsmann Stiftung, Gütersloh, 2018.
- [Sc22] Schweizer Radio und Fernsehen (SRF) (2022): Sternstunde Philosophie [Audio Podcast] – Schöner leben im Metaverse? Der philosophische Stammtisch. URL: <https://www.srf.ch/play/tv/redirect/detail/fa2bc93b-dd4d-4210-86b5-d9135472c906> (Zugriff am 07.07.2022).
- [Sc23] Schuhmacher, J.; Barth, J.; Ruzicic, N.; Kreß, A.; Knott, M.; Pagniotopoulou, V. C.; Stavropoulos, P.; Kuhlenkötter, B.; Hummel, V.: Development of an Approach for a “Cross Learning Factory Product Production System” for Circular Economy. In: *SSRN*, S. 1–7, 2023.
- [Sc90] Schunk, D. H.: Goal setting and self-efficacy during self-regulated learning. In: *Educational Psychologist* 25/1, S. 71–86, 1990.
- [SD18] Sames, G.; Diener, A.: Stand der Digitalisierung von Geschäftsprozessen zu Industrie 4.0 im Mittelstand. Technische Hochschule Mittelhessen, 2018.
- [SD21] Sautter, B.; Daling, L.: Mixed reality supported learning for Industrial on-the-job Training. In: *SSRN*, S. 1–6, 2021.
- [Sh00] Shippmann, J. S.; Ash, R. A.; Batjtsta, M.; Carr, L.; Eyde, L. D.; Hesketh, B.; Kehoe, J.; Pearlman, K.; Prien, E. P.; Sanchez, J. I.: The practice of competency modeling. In: *Personnel Psychology* 53/3, S. 703–740, 2000.
- [Sh92] Sheridan, T. B.: Musings on telepresence and virtual presence. In: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 1/1, S. 120–125, 1992.
- [SHR20] Sadaj, E. A.; Hulla, M.; Ramsauer, C.: Design approach for a learning factory to train services. In: *Procedia Manufacturing* 45, S. 60–65, 2020.

-
- [Si05a] Siemens, G.: Connectivism: A learning theory for the digital age. In: *International Journal of Instructional Technology and Distance Learning* 2/1, S. 3–10, 2005.
- [Si05b] Siemens, G.: Connectivism: Learning as network-creation. In: *ASTD Learning News* 10/1, S. 1–28, 2005.
- [Si20] Sievers, T. S.; Schmitt, B.; Rückert, P.; Petersen, M.; Tracht, K.: Concept of a mixed-reality learning environment for collaborative robotics. In: *Procedia Manufacturing* 45, S. 19–24, 2020.
- [Sk78] Skinner, B. F.: *Was ist Behaviorismus?* Rowohlt, Reinbek bei Hamburg, 1978.
- [SI09] Slater, M.: Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 364/1535, S. 3549–3557, 2009.
- [SL20] Schallmo, D.; Lohse, J.: *Digitalstrategien erfolgreich entwickeln - Grundlagen, Ansätze und Vorgehensweisen.* Springer Gabler, Wiesbaden, 2020.
- [SNT21] Sievers, T. S.; Neumann, F.; Tracht, K.: Augmented virtuality in a digital learning factory for collaborative robotics. In: *SSRN*, S. 1–6, 2021.
- [SPK20] Sudhoff, M.; Prinz, C.; Kuhlenkötter, B.: A systematic analysis of learning factories in Germany-Concepts, production processes, didactics. In: *Procedia Manufacturing* 45, S. 114–120, 2020.
- [SS14] Sadowski, W.; Stanney, K.: Presence in virtual environments. In (Hale, K. S.; Stanney, K. M., Hrsg.): *Handbook of virtual environments: Design, implementation, and applications.* CRC Press, Boca Raton, S. 791–806, 2014.
- [SS16] Slater, M.; Sanchez-Vives, M. V.: Enhancing our lives with immersive virtual reality. In: *Frontiers in Robotics and AI* 3, S. 74, 2016.
- [SS20] Schlömer-Laufen, N.; Schneck, S.: Data for Mittelstand companies in Germany at the IfM Bonn. In: *Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik* 240/6, S. 849–859, 2020.

- [SSJ98] Sonntag, K.; Stegmaier, R.; Jungmann, A.: Implementation arbeitsbezogener Lernumgebungen. Konzepte und Umsetzungserfahrungen. In: *Unterrichtswissenschaft* 26/4, S. 327–347, 1998.
- [SSK20] Scholz, J.-A.; Sieckmann, F.; Kohl, H.: Implementation with agile project management approaches: Case Study of an Industrie 4.0 Learning Factory in China. In: *Procedia Manufacturing* 45, S. 234–239, 2020.
- [St19] Statistisches Bundesamt: Statistisches Jahrbuch 2019 - Deutschland und Internationales. Statistisches Bundesamt (Destatis), 2019.
- [St20] Strasburger, H.: Seven myths on crowding and peripheral vision. In: *i-Perception* 11/3, S. 1–46, 2020.
- [St23] Steam (2023): SteamVR Knuckles Driver. URL: <https://steamcommunity.com/sharedfiles/filedetails/?id=1508356684> (Zugriff am 26.02.2023).
- [St92] Steuer, J.: Defining virtual reality: Dimensions determining telepresence. In: *Journal of Communication* 42/4, S. 73–93, 1992.
- [SW13] Schuh, G.; Warschat, J.: Potentiale einer Forschungsdisziplin Wirtschaftsingenieurwesen. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, München, 2013.
- [SW65] Shapiro, S. S.; Wilk, M. B.: An analysis of variance test for normality. In: *Biometrika* 52/3, S. 591–611, 1965.
- [SW97] Slater, M.; Wilbur, S.: A framework for immersive virtual environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments. In: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 6/6, S. 603–616, 1997.
- [SY08] Shih, Y.-C.; Yang, M.-T.: A collaborative virtual environment for situated language learning using VEC3D. In: *Journal of Educational Technology & Society* 11/1, S. 56–68, 2008.
- [Ta22] Tan, C.; Tay, J.; Tan, P. Y.; Ong, W. K.: Introducing basic manufacturing concepts to secondary school students through Virtual Reality gamification. In: *SSRN*, S. 1–6, 2022.

-
- [TCT19] Tolio, T.; Copani, G.; Terkaj, W.: *Factories of the Future: The Italian Flagship Initiative*. Springer, Cham, 2019.
- [Te11] Tenberg, R.: *Vermittlung fachlicher und überfachlicher Kompetenzen in technischen Berufen*. Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 2011.
- [Th22] Thiede, B.; Mindt, N.; Mennenga, M.; Herrmann, C.: *Creating a Hybrid Multi-User Learning Experience by Enhancing Learning Factories Using Interactive 3D-Environments*. In: SSRN, S. 1–6, 2022.
- [Ti13] Tisch, M.; Hertle, C.; Cachay, J.; Abele, E.; Metternich, J.; Tenberg, R.: *A systematic approach on developing action-oriented, competency-based Learning Factories*. In: *Procedia CIRP* 7, S. 580–585, 2013.
- [Ti14] Tisch, M.; Adolph, S.; Metternich, J.; Bauernhansl, T.; Reinhardt, G.: *Innovative Ansätze zur Kompetenzentwicklung für die Produktion der Zukunft*. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 109/9, S. 587–590, 2014.
- [Ti15a] Tisch, M.; Hertle, C.; Metternich, J.; Abele, E.: *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, 2015.
- [Ti15b] Tisch, M.; Ranz, F.; Abele, E.; Metternich, J.; Hummel, V.: *Learning Factory Morphology – Study Of Form And Structure Of An Innovative Learning Approach In The Manufacturing Domain*. In: *Turkish Online Journal of Educational Technology Special Issue*, S. 356–363, 2015.
- [Ti16] Tisch, M.; Hertle, C.; Abele, E.; Metternich, J.; Tenberg, R.: *Learning factory design: a competency-oriented approach integrating three design levels*. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 29/12, S. 1355–1375, 2016.
- [Ti18] Tisch, M.: *Modellbasierte Methodik zur kompetenzorientierten Gestaltung von Lernfabriken für die schlanke Produktion*. Dissertation. Shaker, Aachen, 2018.

- [TM17] Tisch, M.; Metternich, J.: Potentials and limits of learning factories in research, innovation transfer, education, and training. In: *Procedia Manufacturing* 9, S. 89–96, 2017.
- [TMK16] Tvenge, N.; Martinsen, K.; Kolla, S. S. V. K.: Combining learning factories and ICT-based situated learning. In: *Procedia CIRP* 54, S. 101–106, 2016.
- [TMS20] Tschandl, M.; Mayer, B.; Sorko, S. R.: An interdisciplinary digital learning and research factory: The Smart Production Lab. In: *Procedia Manufacturing* 45, S. 491–496, 2020.
- [To18] Toivonen, V.; Lanz, M.; Nylund, H.; Nieminen, H.: The FMS Training Center - a versatile learning environment for engineering education. In: *Procedia Manufacturing* 23, S. 135–140, 2018.
- [TP11] Tönnis, M.; Plecher, D. A.: Presentation principles in augmented reality-classification and categorization guidelines. Institut für Informatik der Technischen Universität München, München, 2011.
- [Tv20] Tvenge, N.; Ogorodnyk, O.; Østbø, N. P.; Martinsen, K.: Added value of a virtual approach to simulation-based learning in a manufacturing learning factory. In: *Procedia CIRP* 88, S. 36–41, 2020.
- [UH76] Ulrich, P.; Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. In: *Wirtschaftswissenschaftliches Studium: Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt* 5/7-8, S. 304–309, 1976.
- [Ul19] Ullrich, A.; Enke, J.; Teichmann, M.; Kreß, A.; Gronau, N.: Audit-and then what? A roadmap for digitization of learning factories. In: *Procedia Manufacturing* 31, S. 162–168, 2019.
- [VS08] Van Raaij, E. M.; Schepers, J. J.: The acceptance and use of a virtual learning environment in China. In: *Computers & Education* 50/3, S. 838–852, 2008.
- [Wa15] Wagner, U.; AlGeddawy, T.; ElMaraghy, H.; Müller, E.: Developing products for changeable learning factories. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 9, S. 146–158, 2015.

-
- [We14] Weidig, C.; Menck, N.; Winkes, P. A.; Aurich, J. C.: Virtual learning factory on VR-supported factory planning. In: Working Conference on Virtual Enterprises, S. 455–462, 2014.
- [We16] Weeber, M.; Gebbe, C.; Lutter-Günther, M.; Böhner, J.; Glaschröder, J.; Steinhilper, R.; Reinhart, G.: 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, 2016.
- [We20] Weyand, A.; Seyfried, S.; Gosch, B.; Fuhrländer-Völker, D.; Panten, N.; Abele, E.: Method for transforming energy and production systems into mobile demonstrators. In: *Procedia Manufacturing* 45, S. 134–139, 2020.
- [We21] Weyand, A.; Schmitt, S.; Petruschke, L.; Elserafi, G.; Weigold, M.: Approach for Implementing New Topics in Learning Factories–Application of Product-specific Carbon Footprint Analysis. In: SSRN, S. 1–6, 2021.
- [Wh59] White, R. W.: Motivation reconsidered: the concept of competence. In: *Psychological Review* 66/5, S. 297, 1959.
- [WHR19] Wolf, M.; Herstätter, P.; Ramsauer, C.: Using the IIM LEAD factory to identify countermeasures for the demographic challenge. In: *Procedia Manufacturing* 31, S. 123–128, 2019.
- [Wi07] Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N.; Brieke, M.: Changeable manufacturing-classification, design and operation. In: *CIRP Annals* 56/2, S. 783–809, 2007.
- [WS98] Witmer, B. G.; Singer, M. J.: Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. In: *Presence* 7/3, S. 225–240, 1998.
- [WSS20] Wohlgenannt, I.; Simons, A.; Stieglitz, S.: Virtual Reality. In: *Business & Information Systems Engineering* 62/5, S. 455–461, 2020.

- [Ze18] Zender, R.; Weise, M.; von der Heyde, M.; Söbke, H.: Lehren und Lernen mit VR und AR–Was wird erwartet? Was funktioniert? In: Proceedings der Pre-Conference-Workshops der 16. E-Learning Fachtagung Informatik (DeLFI 2018), 2018.

A Anhang

A.1 Kompetenzmessung

In den Folgenden Abschnitten werden die verwendeten Motivations- und Wissensfragebögen sowie der verwendete Beobachtungsbogen für die Kompetenzmessung auf Basis von GLASS dargestellt [Gl21].

A.1.1 Motivationsfragebogen

Fragebogen zur Erfassung aktueller Motivation in Lern- und Leistungssituationen

Dauer: ca 3 Minuten

Probant*innen-Kennung:

Bitte verwenden Sie auf allen Fragebögen eine eindeutige und einheitliche Kennung (Nickname, z.B. "Washington_34").

Diese ermöglicht eine anonyme Zuordnung bei der Auswertung aller Messinstrumente.

Kreuzen Sie bitte an, was zutrifft!			Trifft						
			zu			nicht zu			
			7	6	5	4	3	2	1
Interesse	Inte_1	Ich mag solche Aufgaben.							
	Inte_2	Bei der Aufgabe mag ich die Rolle des Teilnehmers, der Zusammenhänge entdeckt.							
	Inte_3	Bei Aufgaben wie dieser bräuchte ich keine Belohnung, sie machen mir auch so viel Spaß.							
	Inte_4	Eine solche Aufgabe würde ich gerne auch in meiner Freizeit bearbeiten.							
Erfolgs- wahrscheinlichkeit	Erf.wahr_1	Ich glaube der Schwierigkeit dieser Aufgabe gewachsen zu sein.							
	Erf.wahr_2	Wahrscheinlich werde ich die Aufgabe nicht schaffen.							
	Erf.wahr_3	Ich glaube, das kann jeder schaffen.							
	Erf.wahr_4	Ich glaube, ich schaffe diese Aufgabe nicht.							
Herausforderung	Hera_1	Die Aufgabe ist eine richtige Herausforderung für mich.							
	Hera_2	Ich bin sehr gespannt darauf, wie gut ich hier abschneiden werde.							
	Hera_3	Ich bin fest entschlossen, mich bei voll anzustrengen. / Ich werde mich bei zukünftigen Aufgaben voll anstrengen.							
	Hera_4	Wenn ich die Aufgabe schaffe, werde ich schon ein wenig stolz auf meine Tüchtigkeit sein.							
Zusätzliche Anmerkungen:									

Abbildung A.1: Motivationsfragebogen

A.1.2 Wissensfragebogen

Wissenstest

Probanden-Kennung:

Seite 1

Wissenstest zur Übung Wertstromanalyse zur Durchführung

Bitte verwenden Sie heute auf **allen Fragebögen die gleiche** Kennung (Nickname). Diese ermöglicht eine anonyme Zuordnung bei der Auswertung aller Messinstrumente.

Der vorliegende Test wird einmal nach der Schulung durchgeführt.

Bearbeitungsdauer beträgt 15 min

Durch Prüfer auszufüllen:

Wissensart	Punkte
Sachwissen (Wite_Sach)	___ von 11
Prozesswissen (Wite_Proz)	___ von 15
Gesamtergebnis	___ von 26

Durch Anwender*in auszufüllen:

Frage 1: Punkte ___ von 4

Kodierung: Wite_Sach1

Nennen Sie 4 Verschwendungsarten (keine Beispiele nennen)

Frage 2: Punkte ___ von 2

Kodierung: Wite_Sach2

Wie lautet die Formel zu Berechnung des Kundentakts?

Abbildung A.2: Wissensfragebogen - Teil 1

Wissenstest

Probanden-Kennung:

Seite 2

Frage 3: Punkte ___ von 5

Kodierung: Wite_Sach3

Bitte benennen Sie die folgenden Symbole der Wertstromanalyse:

A =

B =

C =

D =

E =

Frage 4: Punkte ___ von 2

Kodierung: Wite_Proz1

Wann wird der Kundentakt bei der Durchführung der Wertstromanalyse berechnet?**Frage 5:** Punkte ___ von 2

Kodierung: Wite_Proz2

Wie werden Daten zum Füllen von Prozesskästen aufgenommen?

Abbildung A.3: Wissensfragebogen - Teil 2

Wissenstest

Probanden-Kennung:

Seite 3

Frage 6: Punkte ___ von 5

Kodierung: Wite_Proz3

Bitte skizzieren Sie den folgenden Fall mittels Wertstromsymboliken:

Am Prozess „Montage“ wird die Kennzahl „Bearbeitungszeit (30s)“ erfasst. Der Montageprozess wird von 2 Personen im 1-Schicht-Betrieb betreut. Zwischen dem Prozess Montage und dem vorgelagerten Prozess „Waschen“ befindet sich ein unkontrollierter Bestand bestehend aus 30 Teilen.

**Frage 7:** Punkte ___ von 6

Kodierung: Wite_Proz4

Bitte bringen Sie die sechs Schritte der WSA in die richtige Reihenfolge:

- A = Durchlaufzeit und Wertschöpfende Zeit
- B = Externe / interne Material- und infor. Flüsse
- C = Aufnahme von Prozessdaten
- D = Prozessschritte einzeichnen
- E = Kundennachfrage bestimmen
- F = Bestände aufnehmen
- G = Verschwendungen identifizieren

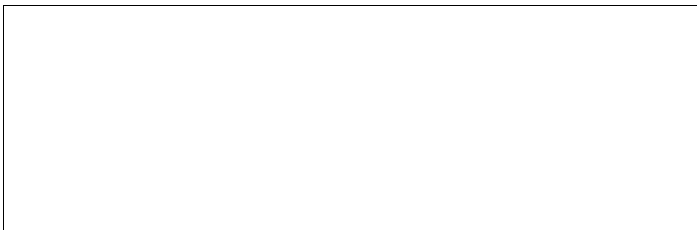


Abbildung A.4: Wissensfragebogen - Teil 3

A.1.3 Beobachtungsbogen

Beobachtungsbogen zur Bewertung von Teilkompetenzen anhand korrespondierender Handlungen

TK-Kennung:	Beobachtungsin:		
Teilkompetenz	Aufgabe	Anforderungen	[Präfix]_All_Bew_ Allgemeine Bewertung des Beobachters zur Erfüllung der Anforderungen
Beob_TK0_Kundenkontakthilfe	Kundenzaktsverarbeiten	Kenntnis der Formal Kundentakt = prof. Absatzzeit; Bedarf für diese	[Präfix]_All_Bew_ Allgemeine Bewertung des Beobachters zur Erfüllung der Anforderungen
Beob_TK0_WSA - Symbolik anwenden	Befragen/ Erfassen von: Kunden, Lieferanten, PPS Einträgen in WSA / Aufgabentabell	Kenntnis der Symbole/ Prozessschritte Kenntnis der Symbole/ Prozessschritte	[Präfix]_Fehl_Rück_ Fehlernis, Pflichtigkeits- vs. systematische Fehler
Beob_TK0_Produktionsdaten sammeln	Aufnahme der Prozessdaten = IST Werte der Kennzahlen Eintragen der ermittelten Daten Erfassung der Bestände Eintragen der Bestände	Kenntnis über die Ermittlung (Stamps) über Befragen, Abschätzen Kenntnis der Anordnungsfolge/ des richtigen Ortes für die Daten Erechnen der Bestände Kenntnis der Symbole	[Präfix]_Anz_Rück_ Anzahl der Rückfragen/Abstimmung mit Tz0/ Selbstständigkeit
			Es ist möglich, dass bestimmte Arbeitsproben nicht von jedem Übungssteilnehmer durchgeführt werden oder aufgrund von zeitlichen Einschränkungen komplett weggelassen werden Dies ist in den Anmerkungen zu notieren

Abbildung A.5: Beobachtungsbogen - Teil 1

Teilkompetenz	Aufgabe	Anforderungen	[Prüf]_All_Bew_ Allgemeine Bewertung	[Prüf]_Fall_Flück_ Fehlerrate, Flüchtigkeits- us. systematische Fehler	[Prüf]_Anz_Rück_ Anzahl der Rückfragen/Abstimmung mit T02/Selbstständigkeit	Anmerkungen des Beobachter
Beob_TK4_ Ermittlung der externen Material- und Informationsflüsse	Externer Informationsfluss ermitteln	Kenntnis über Material- und Informationsfluss zwischen der Firma und der Umwelt. Kenntnis über richtige Symbolik Kenntnis über Material- und Informationsfluss innerhalb der Firma Kenntnis über richtige Symbolik	4 = sehr gut (Handlung korrekt ausgeführt)	4 = sehr gut (eindeutig selbstständige Bearbeitung)	4 = sehr gut (eindeutig selbstständige Bearbeitung nach kurzen Team-Diskussion)	Es ist möglich, dass bestimmte Arbeitsproben nicht von jedem Umgestellnehmer durchgeführt werden oder aufgrund von zeitlichen Einschränkungen komplett weggelassen werden. Dies ist in den Anmerkungen zu notieren.
	Externer Informationsfluss ermitteln		3 = gut (viele Flüchtigkeitsfehler)	3 = gut (Bearbeitung nach kurzen Team-Diskussion)		
	Den externen Material und Informationsfluss ermitteln		2 = mittel (mehrfache Flüchtigkeitsfehler)	2 = mittel		
	Interner Informationsfluss ermitteln		1 = schlecht (mindestens 1 Flüchtigkeitsfehler)	1 = schlecht (keine eindeutige selbstständige Bearbeitung)		
Beob_TK5_ Verschwendungen	Interner Material- und Informationsfluss ermitteln	Kenntnis über richtige Symbolik	4 = sehr gut			
	Informationsfluss ermitteln		3 = gut			
TK6_ Ableiten von Kabin- Aktivitäten und Priorisierung	Ermittlung der Verschwendungen	Kenntnis der Verschwendungsarten 1. Problem pro Prozess = gute Bewertung	4 = sehr gut			
	Ausfüllen der Kästen für Kästen (für Materialfluss)		3 = gut			

Abbildung A.6: Beobachtungsbogen - Teil 2

A.2 Virtual Reality

A.2.1 Virtual-Reality-Nutzung im privaten Sektor

Die nachfolgend dargestellte Abbildung zeigt die Nutzung von VR im privaten Sektor laut BITKOM E.V. [Bi21].

Dafür wird VR eingesetzt



Abbildung A.7: Nutzung von Virtual Reality im privaten Sektor gemäß BITKOM E.V. [Bi21].

A.2.2 Entwicklungsthesen

Im Folgenden werden die Entwicklungsthesen für VR nach KIND ET AL. dargestellt [Ki19].

Tabelle A.1: Entwicklungsthesen zu Virtual Reality

These	Beschreibung
1	Die wesentlichen technologischen Herausforderungen für die weitere Entwicklung von VR und AR bestehen in Grafikkarten- und Rechnerleistung, der Erweiterung des Sichtfelds, der Erstellung von 3-D-Daten sowie der Echtzeitfähigkeit der Bewegungserfassung (Tracking und Capturing).
2	Auch in Zukunft bilden der Ausbau der digitalen Infrastruktur und die Erhöhung von Bandbreiten für die mobile Datenübertragung zentrale Grundvoraussetzungen, um die Anwendungspotenziale von VR und AR voll ausschöpfen zu können.
3	Die technologischen Entwicklungspfade von VR und AR weisen unterschiedliche Dynamiken auf. Gegenwärtig überholt vor allem die Entwicklung mobiler AR den Bereich VR, zieht diesen aber weiter mit. Es kommt dementsprechend zu einer vorübergehenden Entkopplung. Langfristig gesehen konvergieren die technologischen Entwicklungspfade.
4	Aktuell werden für einen hohen Immersionsgrad durch VR-Systeme vor allem die Sinne Sehen und Hören angesprochen. Nächste Entwicklungsschritte gehen in Richtung der Verbesserung der haptischen Erfahrungen und der Wahrnehmung der eigenen Positionierung im Raum sowie der Bewegung.
5	Auf dem technologischen Pfad der Mensch-Technik-Schnittstellen, auf dem beispielsweise Touchdisplays konventionelle Eingabemedien wie Tastaturen als führende Interfaces für mobile Geräte abgelöst haben, stellen VR und AR eine neue Entwicklungsstufe dar.

Fortgesetzt auf nächster Seite

Fortgesetzt von vorheriger Seite

These	Beschreibung
--------------	---------------------

- | | |
|----|---|
| 6 | Aktuell reicht die Nutzerfreundlichkeit von VR- und AR-basierten Benutzerschnittstellen noch nicht aus, um sich zu einem Standardmedium für Computerinteraktion zu etablieren. Die Nutzerfreundlichkeit der VR- und ARSysteme wird sich in den nächsten Jahren jedoch maßgeblich verbessern, da die Geräte deutlich ergonomischer, kleiner und kabellos werden. |
| 7 | Die Erzeugung virtueller Welten, die neben ihrem visuellen Detailreichtum auch ein immersives Abbild aller anderen Sinneserfahrungen bietet, ist generell eher unwahrscheinlich. |
| 8 | Aktuell entstehen bei der Nutzung von VR- und AR-Systemen mitunter Begleiterscheinungen wie VR-Sickness bzw. Cybersickness. Technologische Lösungen genauso wie Gewöhnungseffekte im Umgang mit den Systemen werden zukünftig zu einer Verminderung der Cybersickness beitragen. |
| 9 | Maschinelles Sehen (Computer Vision) und maschinelles Lernen (Machine Learning) als konkrete Anwendungen von künstlicher Intelligenz (KI) können die zukünftige Entwicklung von VR und AR vorantreiben. |
| 10 | VR und AR werden die Digitalisierung des Alltags weiter vorantreiben, indem sie die Integration von sozialer Interaktion, Mediennutzung, Konsum und Unterhaltung im digitalen Raum befördern und zu deren Verschränkung beitragen. Kernaspekte des alltäglichen Lebens verlagern sich dadurch noch stärker als bisher in die digitale Sphäre. |
| 11 | AR-Technologien werden in Form von Brillen, Kontaktlinsen o. Ä. zu einem ständigen Begleiter des Menschen und werden dessen Fähigkeiten durch die Einblendung zusätzlicher situationsrelevanter Informationen erweitern. |

Fortgesetzt auf nächster Seite

 Fortgesetzt von vorheriger Seite

These	Beschreibung
12	Im virtuellen Raum lösen sich die räumlichen Distanzen der realen Welt vollständig auf. Für Nutzer der virtuellen Realität werden so ortsunabhängige Zugänge und Kommunikationsmittel geschaffen, um die Chancen zur Teilhabe an intensiven sozialen Interaktionsprozessen zu erhöhen. Im professionellen wie privaten Umfeld erweitern sich dadurch die Möglichkeiten, um neue Kontakte zu knüpfen bzw. bestehende Beziehungen zu pflegen.
13	Im Fall von VR besteht das Risiko, dass Eintauchen und Interagieren in zum Teil hyperreal simulierten Welten so attraktiv für einige Nutzer werden, dass diese die virtuelle der realen Welt vorziehen. Infolgedessen können sich die Suchtgefahr der Medienutzung sowie das Risiko sozialer Entfremdung erhöhen.
14	In virtuellen Welten kann Interaktion sowohl zwischenmenschlich als auch zwischen menschlichen Avataren und künstlichen Agenten stattfinden. Perspektivisch werden sich die künstlichen Agenten den menschlichen Verhaltens- und Kommunikationsweisen angleichen. In der Folge wird sich die Interaktion zwischen Menschen und algorithmengesteuerten Agenten in der virtuellen Realität zukünftig intensivieren.
15	Ursprung, Zuschnitt und Verfügbarkeit von Inhalten sind entscheidend für die zukünftige Nutzung von VR und AR. Es ist davon auszugehen, dass die Bereitstellung von Content stark kommerziell getrieben wird und proprietäre Plattformen wie die heutigen App Stores oder Streamingdienste deren Verbreitung regulieren.
16	Das immersive Erleben neuer Perspektiven und Blickwinkel kann zur Stärkung von Toleranz und zum Verständnis für andere Menschen führen.
17	VR und AR können als neuer Kanal für die Vermittlung politisch-gesellschaftlicher Themen genutzt werden.

 Fortgesetzt auf nächster Seite

Fortgesetzt von vorheriger Seite

These	Beschreibung
--------------	---------------------

- | | |
|----|--|
| 18 | Indem Informationen in der virtuellen Realität sehr anschaulich vermittelt werden können, bergen sie die erhöhte Gefahr, manipulierten Inhalten den Anschein einer hohen Glaubwürdigkeit zu verleihen. |
| 19 | Neben bewusst fingierten Inhalten schaffen VR und AR außerdem neue technologische Möglichkeiten, um über suggestive Inhalte und Werbung die Reaktionen und Emotionen der Nutzer zu manipulieren. |
| 20 | VR und AR schaffen durch ihre breiten und innovativen Anwendungsmöglichkeiten in vielen unterschiedlichen Branchen zukünftig große Verwertungspotenziale, die bisher nur ansatzweise erschlossen wurden. |
| 21 | Die Märkte für VR und AR werden sich unterschiedlich schnell und in verschiedene Richtungen entwickeln. |
| 22 | Die Entwicklung von VR- und AR-Geräten und -Anwendungen zu Massenprodukten ist aktuell von einem für junge Technologien typischen Etablierungsproblem geprägt: Einerseits sind höherwertige Endgeräte noch vergleichsweise teuer, wenig nutzerfreundlich und schnell veraltet. Andererseits gibt es nur ein geringes Angebot ansprechender, hochqualitativer Inhalte, die nötig sind, um potenzielle Nutzer für die Anschaffung entsprechender Technologien zu motivieren. |
| 23 | Start-ups tragen entscheidend zur wirtschaftlichen und technologischen Entwicklung von VR und AR bei. Die Übernahmen von VR- und AR-Start-ups durch große Akteure wie Google, Facebook und Apple führen aktuell jedoch zu einer tendenziellen Konsolidierung des Gründungsgeschehens, die auch auf Deutschland abstrahlt. |

Fortgesetzt auf nächster Seite

Fortgesetzt von vorheriger Seite

These	Beschreibung
--------------	---------------------

- | | |
|----|--|
| 24 | Erfolgt die ökonomische Wertschöpfung aktuell insbesondere über HMDs, wird sie sich zukünftig klar in Richtung Content verschieben. Der Vertrieb von VR- und AR-Inhalten wird primär über bereits vorhandene App Stores oder Streamingdienste erfolgen. Daneben werden sich alternative Vertriebsplattformen etablieren, wie z. B. Selfpublishing oder offene Plattformen. Zusätzlich wird Content vergleichbar mit In-App-Käufen auch innerhalb virtueller Räume vertrieben werden. |
| 25 | Neben dem Verkauf von VR- und AR-Hardware sowie entsprechendem Hardwarezubehör werden Geschäftsmodelle auch auf den vermittelten Inhalten und Anwendungen von VR und AR basieren. Schwerpunkte dieser Geschäftsmodelle werden vorwiegend in folgenden Bereichen liegen: Content/ Premium-Apps, E-Commerce, Streamingabonnements, In-App-Käufe, Social VR/Kommunikation, Werbung sowie Auswertung von Nutzerdaten. |
-

A.3 Lernfabriken

A.3.1 Lernfabrik-Morphologie

Nachfolgend wird die Lernfabrik-Morphologie nach KRESS ET AL. basierend auf TISCH ET AL. dargestellt [Kr23; Ti15b; Ti18]:

Design dimension 1: operating & business model									
#	design element	characteristics							
1.1	operator	academic institution		non-academic institution		profit-oriented operator		not-for-profit organizations	
1.2	trainer	professor	researcher	student assistant	technical expert	manager	consultant	educationalist	external trainer
1.3	development of concept	internal			external assisted			external	
1.4	initial funding	internal funds			external funds				
				public funds	company funds	funds from associations			
1.5	ongoing funding	internal funds		external funds					funds through product sale
		public funds	industrial funds	funds from associations					
1.6	funding continuity	short term funding (e. g. single events)		mid term funding (projects and programs < 3 years)			long term funding (projects and programs ≥ 3 years)		
1.7	business model for training	open models				closed models			
		club model		course fees					
1.8	key partnerships	universities	manufacturers	consultancies	industry	incubators	service organizations	NGO	
1.9	business model for research	open models				closed models			
		club model		course fees					

Abbildung A.8: Gestaltungsdimension 1: Betriebsmodell

Design dimension 2: target & purpose																		
#	design element	characteristics																
2.1	main purpose	education				vocational training				research								
2.2	secondary purpose	test/pilot environment			industrial production		innovation transfer		public image		innovation		demonstration					
2.3	target groups for education & training	schoolchildren/ pupil	students			employees							entrepreneurs	freelancers	labor union	open-public	elderly people	
			bachelor	master	PhD	job-seeking	apprentices	unskilled	semi-skilled	skilled	managers							
											lower	middle						top
2.4	participant constellation	homogenous				heterogenous												
				knowledge		hierarchy		mixed target groups		...								
2.5	targeted industry	mechanical & plant eng.		automotive		logistics		transportation		FMCG		aerospace						
		chemical industry		electronics		construction		insurance / banking		textile industry		health care						
		agriculture		life science		pharma		mining		new economy		...						
2.6	subject-related learning contents	lean management		energy & resource efficiency		industrial engineering		global production		Industry 4.0		Industry 5.0						
		product creation process		circular economy		sustainability/ social impact		business engineering		artificial intelligence		smart information logistics						
		object recognition		engineering education		digital twin/ service twin/ human twin		factory planning		additive manufacturing		workers participation						
2.7	role of LF for research	research object (e.g., research on LF improvement)						research enabler (e.g., development of new methods in 2.8)										

Abbildung A.9: Gestaltungsdimension 2: Ziele

Design dimension 3: process										
#	design element	characteristics								
3.1	demonstrated product life cycle phase	product planning	product development	product design	rapid prototyping	manufacturing assembly logistics	service	recycling/ remanufacturing		
3.2	factory life cycle	investment planning	factory concept	process planning	ramp-up			picking, packaging	recycling/ remanufacturing	
3.3	order life cycle	configuration & order	order sequencing	production planning & scheduling					shipping	
3.4	technology life cycle	planning	development	virtual testing				maintenance	modernization/ modification	
3.5	indirect functions	primary activities			secondary activities					
		inbound & outbound logistics		marketing & sales	service	firm infrastructure	HR	technology development	procurement	
3.6	material flow	continuous production			discrete production					
3.7	process type	mass production		serial production		small series production		one-off production		
3.8	manufacturing organization	fixed-site manufacturing	work bench manufacturing	workshop manufacturing	flow production	changeable manufacturing principles				
3.9	process automation	manual		partly automated/ hybrid production		fully automated				
3.10	manufacturing methods	cutting	primary shaping	forming	joining	coating	change material properties		additive manufacturing	
3.11	manufacturing technology	physical		chemical			biological			
3.12	number of factory areas	<3	3-5		6-9		10-15		15-20	>20
3.14	intralogistics automation	manual		semi-automatic		automatic				
						without robotics		with robotics		

Abbildung A.10: Gestaltungsdimension 3: Prozess

Design dimension 4: setting											
#	design element	characteristics									
4.1	learning environment	purely physical (planning + execution)	physical LF supported by digital factory (see line "IT integration")			physical value stream of LF extended virtually		purely virtual (planning + execution)			
4.2	environment scale	scaled down				life-size					
4.3	work system levels	workplace		work system		factory		network			
4.4	enablers for changeability	mobility		modularity		compatibility		scaleability		universality	
4.5	changeability dimensions	product		process		organization		building & layout	material flow		
4.6	IT integration	IT before SOP (CAD, CAM, simulation)			IT after SOP (PPS, ERP, MES)			IT after production (CRM, PLM etc.)			
4.7	number of different states	1	2-3		3-5		>5		individualized to target groups		
4.8	integrated digital technologies	data acquisition	traceability		data processing (e.g., AI)		assistance systems	digital fabrication	simulation		
		data management & visualization			automation technology		cybersecurity		network technologies		
4.9	location of the LF	own location		integrated in another factory		integrated in another building		digital location			
4.10	role of the operator	participants		human resource of the organization			trainer		salaried personnel		
4.11	meeting room	no separated room			integrated in the shop floor			separated room			
4.12	automation pyramid	sensors & actuators			PLC	SCADA	MES		ERP	SES	
4.13	ICT protocol	physical	data	network	transport	session	presentation	application	more than application		
4.14	assistance systems	digital assistance	physical assistance		robots						
					industrial robots		light weight robots		wearable robots		
4.15	traceability	radio based technology				optical technology					

Abbildung A.11: Gestaltungsdimension 4: Umgebung

Design dimension 5: product									
#	design element	characteristics							
5.1	materiality	material (physical product)			immaterial (service)			digital (data, software)	
5.2	form of product	general cargo			bulk goods			flow products	
5.3	product origin	own development		development by participants (changing ideas)			partial development	external development	
5.4	marketability	available on the market			available on the market but didactically simplified			not available on the market	
5.5	functionality	functional product			didactically adapted product with limited functionality			without function/application, for demonstration only	
5.6	no. of different product	1 product	2 products	3-4 products	>4 products	flexible, developed by participants		acceptance of real order	
5.7	no. of variants	1 variant	2-4 variants	5-20 variants	>20 variants	flexible, depending on participants		determined by real orders	customizable
5.8	no. of components	1 comp.	2-5 comp.	6-20 comp.	21-50 comp.	51-100 comp.	>100 comp.	customizable	
5.9	further product use	re-use/ recycling		exhibition/ display		give-away		sale	disposal
5.10	weight of the product	≤ 1kg			1 kg – 10 kg		10 kg – 25 kg		≥ 25 kg
5.11	components	physical						digital	
		mechanical		electric		eletronic			

Abbildung A.12: Gestaltungsdimension 5: Produkt

Design dimension 6: pedagogy									
#	design element	characteristics							
6.1	competence class	technical and methodological competences				social and communication competences			
		personal competences				activity-oriented competences			
6.2	dimension of learning targets	cognitive			affective			psychomotor	
6.3	learning scenario strategy	instruction	demonstration		closed scenario		open scenario		
6.4	type of learning environment	greenfield (development of factory environment)				brownfield (improvement of existing factory environment)			
6.5	communication channel	onsite learning (in factory environment)				remote connection (to the factory environment)			
6.6	degree of autonomy	instructed			self-guided/ self-regulated			self-determined/ self-organized	
6.7	role of the trainer	presenter		moderator		coach		instructor	
6.8	type of learning activities	tutorial	practical lab course	seminar	workshop	project work	flipped classroom	business scenario (e.g., product life cycle)	
6.9	standardization of trainings	standardized learning modules			customized learning modules			modular learning modules	
6.10	theoretical foundation	prerequisite		in advance (en bloc)		alternating with practical parts		based on demand	
6.11	evaluation levels	feedback of participants	competency measurement	transfer to real factory	economic impact of training		return on training		
6.12	evaluation methods	knowledge test		written report	oral presentation	practical exam	360-degree assessment	none	
		written test	oral test						
6.13	learning factory extensions	case study			role play		simulation		none
6.14	degree of personalization	participant personalization				group personalization			none
6.15	participation capability	in-person participation			hybrid participation			remote participation	

Abbildung A.13: Gestaltungsdimension 6: Pädagogik

Design dimension 7: metrics												
#	design element	characteristics										
7.1	no. of participants per learning module	1-5		6-10		10-15		16-20		>20		
7.2	no. of stand. learning modules	1		2-4		5-10		>10		modularized		
7.3	no. of integrated learning modules	undergraduate program					graduate program					
		1	2-4	5-10	>10	modularized	1	2-4	5-10	>10	modularized	
7.4	aver. duration of a learning module	≤ 0,5 day	0,5 days – 1 days	1 day – 2 days	2 days – 5 days	2 days – 5 days	5 days – 10 days	10 days – 20 days	> 20 days			
7.5	no. of highly qualified people trained per year	< 50		50-200		201-500		501-1000		>1000		
7.6	size of LF	< 50 sqm		50 sqm - 100 sqm		100 sqm - 300 sqm		300 sqm - 500 sqm		500 sqm - 1000 sqm		> 1000 sqm
7.7	FTE in LF (trainers, operators etc.)	< 1		2-4		5-9		10-15		<15		
7.8	no. of education sessions per year	< 5		5-15		15-30		30-50		>50		
7.9	no. of industry trainings per year	< 5		5-15		15-30		30-50		>50		
7.10	no. of dissemination events per year	< 5		5-15		15-30		30-50		>50		
7.10	setup costs	< 10,000 \$			10,000 \$ - 100,000 \$			100,000 \$ - 1 million \$			> 1 million	
7.11	operational costs per year	< 10,000 \$			10,000 \$ - 100,000 \$			100,000 \$ - 1 million \$			> 1 million	
7.12	peer-reviewed publications related to LF per year	< 5		5-15		15-25		> 25				
7.13	third party funds related to LF per year	< 10,000 \$			10,000 \$ - 1 million \$			1 million \$ - 20 million \$			> 20 million	

Abbildung A.14: Gestaltungsdimension 7: Metrik

Design dimension 8: research									
#	design element	characteristics							
8.1	research topics	lean management	energy & resource efficiency	industrial engineering	global production	Industry 4.0	Industry 5.0		
		product creation process		circular economy	sustainability/ social impact	business engineering	artificial intelligence	smart information logistics	
		object recognition	engineering education	digital twin/ service twin/ human twin		factory planning	additive manufacturing	workers participation	
8.2	research object	new technologies	new processes	new methods	new management tools	new materials	new didactical methods	new fundamental discoveries	
8.3	involved persons in the research process	top grade researcher (e.g., full professor, director of research)		senior researcher (e.g., associate professor, senior researcher)		recognized researcher (e.g., assistant professor, post-doc)		first stage researcher (e.g., PhD student)	
8.4	research scope	LF as research object			LF as research enabler				

Abbildung A.15: Gestaltungsdimension 8: Forschung

A.3.2 Vertikaler und horizontaler Abbildungsumfang

Im Folgenden wird der vertikale und horizontale Abbildungsumfang aus dem Gestaltungsansatz von TISCH dargestellt [AMT18; Ti18].

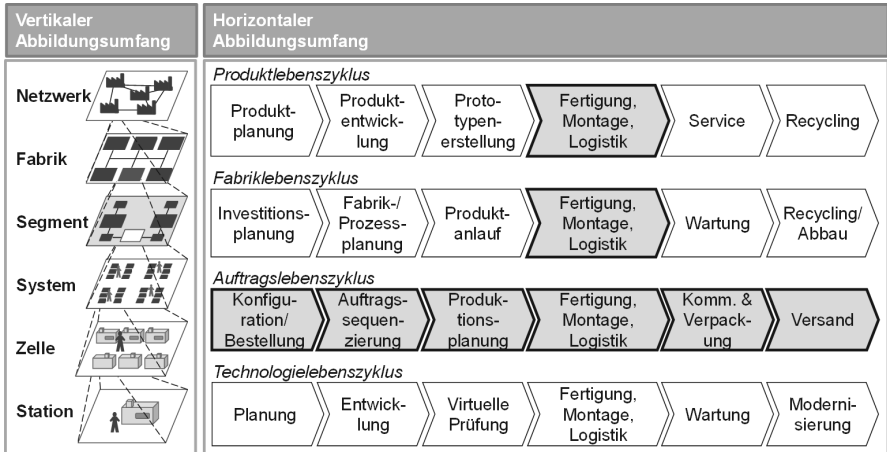


Abbildung A.16: Vertikaler und horizontaler Abbildungsumfang nach TISCH [AMT18; Ti18]

A.4 Methodik

A.4.1 Kompetenzmatrix

Nachfolgend wird eine exemplarische Kompetenzmatrix in Anlehnung an [Ti18] dargestellt.

Kompetenz	Unterkompetenz	Handlung	Wissenselement
Kompetenz 1	Unterkompetenz 1.1	Handlung 1.1.1	Wissenselement 1.1.1.1
			...
			...

⋮

Abbildung A.17: Kompetenzmatrix in Anlehnung an TISCH [Ti18]

A.4.2 Anforderungsliste

Nachfolgend wird eine Liste mit allgemeinen Anforderungen an virtuelle Lehr-Lern-Konzepte in Anlehnung an [Kr20a; Ri20b] dargestellt.

Tabelle A.2: Anforderungen an Virtual Reality

Anforderung	Beschreibung	Quelle
Inklusion körperlich eingeschränkter Menschen	Behinderte Menschen im Rollstuhl sollten nicht ausgeschlossen werden und ihre Fähigkeiten einbringen können.	[Po18]
Ressourceneinsparung	Ressourceneinsparung durch die Nutzung von Synergieeffekten zwischen verschiedenen Lernfabriken, um physische Ausrüstung gemeinsam zu nutzen und eine gemeinsame Cloud für VR-Software zu schaffen.	[We16]
Kosteneinsparung	Die virtuelle Simulation verschiedener Szenarien spart Kosten im Vergleich zur Ausbildung in einer realen Umgebung.	[Ha14]
Permanentes Feedback	ständige Rückmeldung über den Lernfortschritt geben. (ein Lerneffekt ist ohne Feedback sehr schwierig)	[Ab16]
Visuelles, akustisches und haptisches Feedback	Der Einsatz verschiedener Sinne bei der Rückmeldung stimuliert die Fähigkeit, sich etwas zu merken.	[TCT19]

Fortgesetzt auf nächster Seite

Fortgesetzt von vorheriger Seite

Anforderung	Beschreibung	Quelle
Motivierende, warnende Soundeffekte	Um die Lernenden zu motivieren, werden Geräusche und Erfahrungspunkte verwendet, um den Arbeiter für korrekte Aktionen zu belohnen. Töne werden auch verwendet, um bei falschen Handlungen zu warnen.	[Mü16]
Trainerunterstützung	Dabei unterstützen die Ausbilder die Lernenden in den Prozessen, die zum Erwerb der angestrebten Kompetenzen notwendig sind.	[U119]
Unterstützende Animationen	Animationen mit Informationen über den Prozess, das Produkt usw.	[Ha14]
Unterstützung beim Austesten von Grenzen	Der Nutzer sollte motiviert werden, die Grenzen des Systems auszutesten und die Folgen einer Überschreitung zu erfahren. Dies soll ihm helfen, in der Praxis reflektiert zu handeln.	[QMG15]
Virtuelle Kontaktperson	Experte zur Unterstützung des Benutzers bei Fragen oder wenn er nicht weiß, was er tun soll.	[We14]
Visuelle Hervorhebungen	Zum Beispiel durch die Hervorhebung von Objekten mit Signalfarben, um die Aufmerksamkeit des Nutzers zu erregen.	[Ma19]

Fortgesetzt auf nächster Seite

Fortgesetzt von vorheriger Seite

Anforderung	Beschreibung	Quelle
Berücksichtigung verschiedener Hintergründe	Die Teilnehmer sind nicht nur Arbeitskräfte, sondern auch Manager, Studenten und Auszubildende im Produktionssektor.	[Ha14]
Berücksichtigung verschiedener Lerntypen	Anpassung der Lehrmethoden an verschiedene Lerntypen, um einen optimalen Lernerfolg zu erzielen.	[Ha14]
Schwierigkeitsgrade	Vereinfachungen für Teilnehmer, die nicht über das erforderliche Know-how verfügen.	[P115]
Berücksichtigung verschiedener Lerngeschwindigkeiten	Nach der Einführung führen die Schüler die erforderlichen Aufgaben in getrennten Gruppen in ihrem eigenen Tempo durch.	[To18]
Zugänglichkeit für Anwender:innen	Einige (ältere) Arbeitnehmer haben Probleme, sich auf neue Technologien einzustellen. Dieses Problem wird durch den demografischen Wandel noch verschärft.	[U119]
Berücksichtigung von Individualisierungsmöglichkeiten	Die Modularisierung der Lerninhalte ermöglicht eine individuelle Gestaltung des Trainings.	[La15]
Überbrückung von Transferbarrieren	Die beruflichen Anforderungen stimmen oft nicht mit dem Inhalt der Ausbildung überein oder gehen darüber hinaus.	[Co19]

Fortgesetzt auf nächster Seite

Fortgesetzt von vorheriger Seite

Anforderung	Beschreibung	Quelle
Berücksichtigung des Vorwissens	Vorwissen verknüpfen, z.B. durch kleine Spiele wie Bilder- oder Wortpaare. Trainingsinhalte mit den Ergebnissen abgleichen.	[Mü16]
Vermeidung komplexer Darstellungen	Das richtige Maß an Immersion und Interaktion sollte von Fall zu Fall sorgfältig abgewogen werden, um zu komplexe IVEs mit den damit verbundenen möglichen Nachteilen zu vermeiden	[Mi15]
Realistische Beleuchtung	Berücksichtigung einer realistischen Beleuchtung	[Mi15]
Berücksichtigung von Augensteuerung	Ermöglichung der Nutzung der Hände für andere Zwecke sowie für die Integration von Menschen mit Behinderungen.	[Po18]
Intuitive Bedienung	Intuitive Handhabung von virtuellen Objekten.	[Mü16]
Gestensteuerung	Ersetzen Sie Klicks durch Gesten, um sie der Realität näher zu bringen.	[QMG15]
Vorsehen von Sprachsteuerung	Ermöglichung der Nutzung der Hände für andere Zwecke sowie für die Integration von Menschen mit Behinderungen.	[Po18]

Fortgesetzt auf nächster Seite

 Fortgesetzt von vorheriger Seite

Anforderung	Beschreibung	Quelle
Ergänzendes reales Training	erworbene Lernerfahrungen haben ein größeres Potenzial, ohne weitere körperliche Übung vergessen zu werden	[Ha14]
Moderne IT Infrastruktur	Für den Einsatz von Virtual Reality ist eine moderne IT-Infrastruktur erforderlich. Andernfalls ist eine Anfangsinvestition erforderlich, um sie einzurichten.	[Ha14]
Ausrichtung an Benutzungshandbüchern und Sicherheitsvorgaben	Das Verhalten muss den Richtlinien und Gesetzen entsprechen. LF-Schulungen dürfen nicht zu Fehlverhalten in der Praxis führen (z.B. Maschine vor Reinigungsvorgängen komplett abschalten).	[LNP17]
Datensicherheit	Datensicherheit wird als eine aktuelle und zukünftige Anforderung an Lernfabriken genannt.	[U119]
Räumliche Unabhängigkeit	Die physische Anwesenheit der Teilnehmer ist aufgrund der großen Entfernungen oft schwierig.	[Ha14]

 Fortgesetzt auf nächster Seite

 Fortgesetzt von vorheriger Seite

Anforderung	Beschreibung	Quelle
Zeitliche Unabgängigkeit	Eine Anpassung der Schulung an den Zeitplan der Teilnehmer ist möglich, sofern sie von zu Hause oder ihrem Arbeitsplatz aus trainieren können. (insbesondere Module ohne Ausbildungsunterstützung)	[Ha14]
Realistische Handlungen	Lernende Fabriken [...] stellen Herausforderungen dar, die mit denen realer Fabriken vergleichbar sind.	[U119]
Einsatz aktueller Technologien	Ein übergeordnetes strategisches Ziel ist es, direkte oder simulierte Erfahrungen mit praxisrelevanten, aktuellen Technologien in der Produktion anzubieten.	[U119]
Breite Darstellungsmöglichkeiten nutzen	Die begrenzte Ausstattung von physischen Lernfabriken mit Maschinen aufgrund der hohen Kosten schränkt die Möglichkeiten ein.	[Mo18a]
Proaktive und innovative Handlungen fördern	Ein wirksamer Wissenstransfer setzt voraus, dass die Unternehmen ein Lernumfeld schaffen, in dem die Mitarbeiter ermutigt werden, bei der Problemlösung proaktiv und innovativ vorzugehen.	[KHR19]

 Fortgesetzt auf nächster Seite

Fortgesetzt von vorheriger Seite

Anforderung	Beschreibung	Quelle
	Unerwartete Ereignisse, die flexibles Handeln erfordern. Beispiele sind Nachfrageschwankungen und Versorgungsprobleme.	[KHR19]
Vorsehen von Perspektivwechseln	Nach der Schulung Gruppendiskussionen mit Fachleuten, um deren Sichtweise zu verstehen.	[Co19]
Plattformkompatibilität	Möglichkeit, gemeinsam mit anderen Schulungsteilnehmern in der virtuellen Realität an Teamaufgaben zu arbeiten.	[Po18]
Standardisierung	Entkopplung des Wissenstransfers vom Know-how der erfahreneren Mitarbeiter durch validierte Lehrinhalte in Software.	[Ha14]
Gamification	Unterhaltsame Spielelemente steigern die Motivation der Lernenden.	[Ab17]

A.4.3 Fragen der System-Usability-Scale

Nachfolgend werden die Standardfragen der System-Usability Scale übersetzt aus [Br96a] dargestellt:

- Ich kann mir sehr gut vorstellen, das System regelmäßig zu nutzen
- Ich empfinde das System als unnötig komplex.
- Ich empfinde das System als einfach zu nutzen.
- Ich denke, dass ich technischen Support brauchen würde, um das System zu nutzen.
- Ich finde, dass die verschiedenen Funktionen des Systems gut integriert sind.
- Ich finde, dass es im System zu viele Inkonsistenzen gibt.
- Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Menschen das System schnell zu beherrschen lernen.
- Ich empfinde die Bedienung des Systems als sehr umständlich.
- Ich habe mich bei der Nutzung des Systems sehr sicher gefühlt.

A.5 Anwendungsfall Portal

A.5.1 Kompetenzmatrix zur Wertstromanalyse

Im Folgenden wird die verwendete Kompetenzmatrix zur WSA auf Basis von GLASS dargestellt [Gl21].

Hauptkompetenz: Die Teilnehmer:innen (TN) besitzen die Fähigkeit eine Wertstromanalyse (WSA) durchzuführen			
Teilkompetenz	zugehörige Handlungen	Wissenselemente	
Die Teilnehmende besitzen die Fähigkeit, die Kundenanforderungen zu ermitteln	Kundenanforderungen bezüglich verschiedener Aspekte ermitteln & Berechnen des Kundentakts	Kenntnis der verschiedenen Anforderungsarten der Kunden, z. B. was die Bestellung von Produkten oder die Lieferung der Produkte betrifft Kenntnis der Formel für den Kundentakt	Die Anforderungen des Kunden (bezgl. Abnahmemengen pro Zeiteinheit, Transportanforderungen und Behälterbestimmungen etc.) ermitteln Division der effektiven Arbeitszeit pro Arbeitstag durch den Kundenbedarf pro Arbeitstag
Die Teilnehmende besitzen die Fähigkeit, die Symbolik der WSA anzuwenden und die Prozessschritte einzeichnen.	Zuordnung und Einzeichnung der Symbole zu den Prozessen	Kenntnis der Symbole der außenstehenden Prozesse und der internen Produktionsplanung und -Steuerung	Einzeichnen von Kunden, Lieferanten und Produktionsplanungs- & -steuerungssystem (PPS)
		Kenntnis über die Anordnungsfolge der internen Prozesse bei der Wertstromanalyse (Kenntnis über die Prozesskästen der WSA).	Einzeichnen der Prozessschritte bzw. Prozesskästen, sowie der Bestände entlang des Wertstroms
		Kenntnisse der Symbole für die unterschiedlichen Bestandsarten (unkontrollierter Bestand, Supermarkt, FIFO).	Einzeichnen des jeweiligen Symbols für die Bestandsart oberhalb der Bestands-Prozesskästen
Die Teilnehmende besitzen die Fähigkeit Produktionsdaten zu sammeln	Aufnahme der Daten	Kenntnis der Kennzahlen (Anzahl Mitarbeiter, Anzahl Schichten, Zykluszeit, Rüstzeit, Bestände, Verfügbarkeit, usw.) Kenntnis über die Ermittlung der Kennzahlen	Definition und Auswahl der für die WSA relevanten Kennzahlen Aufnahme von Kennzahlen im Prozess (z. B. mit Stoppuhr, Zählen von Beständen, (Befragen der MA))
	Eintragen der Daten in die Symbolik	Kenntnis über die Anordnungsfolge der Daten in den Prozesskästen	Ausfüllen der Datenfelder (Name der Kennzahl, Ist-Wert der Kennzahl, Anzahl Mitarbeiter, Anzahl der Schichten, Belieferungsfrequenz) der Prozesskästen der einzelnen Prozess- und Logistikschritte
Die Teilnehmende besitzen die Fähigkeit externe Material- und Informationsflüsse zu erfassen	Externen Materialfluss ermitteln	Kenntnis über den Materialfluss zwischen der Firma und der Umwelt (Lieferanten und Kunden) und Art und Weise des Materialflusses (Lkw-Transport, ..., wöchentliche Lieferungen,)	Den Materialfluss vom Lieferanten bzw. zum Kunden mit den jeweiligen Bestimmungen und der jeweiligen Art ermitteln (durch bspw. Erfragen, Herauslesen aus Dokumenten (z. B. Lieferschein, ...), etc.)

Abbildung A.18: Kompetenzmatrix der WSA - Teil 1

	Externen Materialfluss einzeichnen	Kenntnis der Symbole für die Transportart (Flugzeug, Lkw, ...) und über den Standort der belieferten Lager innerhalb des Prozesses	Den Materialfluss mit breiten Pfeilen von den Lieferanten zu den jeweiligen Lagern bzw. von den Prozessen oder Lagern zum Kunden einzeichnen. Dabei die Art der Lieferung anhand des passenden Symbols darstellen und die Lieferhäufigkeit unter das Symbol schreiben
	Externen Informationsfluss ermitteln	Kenntnis über den Informationsfluss und die Art und Weise (elektronisch, manuell) des Informationsflusses zwischen der Firma und der Umwelt.	Den Informationsfluss vom Lieferanten bzw. zum Kunden mit den jeweiligen Bestimmungen ermitteln. (durch bspw. Erfragen, Herauslesen aus Dokumenten (z. B. Lieferschein) etc.)
	Externen Informationsfluss einzeichnen	Kenntnis über die Symbolik der Verknüpfungselemente für den externen Informationsfluss (gezackter Pfeil für elektronische Informationsflüsse, normaler Pfeil für manuelle Informationsübertragung)	Einzeichnen von Pfeilen (der richtigen Art: manuell/elektronisch) in Richtung des Informationsflusses und Einzeichnen von Kästen, die die Informationen in kurzen Stichpunkten geschrieben enthalten, an diesen Pfeilen.
Die Teilnehmende besitzen die Fähigkeit interne Material- und Informationsflüsse zu erfassen	Internen Materialfluss ermitteln	Kenntnis über Materialfluss innerhalb der Firma und zwischen den einzelnen Prozessen	Den Materialfluss zwischen den Prozessen ermitteln (beobachten, erfragen, etc.)
	Internen Materialfluss einzeichnen	Kenntnis der Verknüpfungselemente = Symbole für die Art des Materialflusses (Push oder Pull) an den jeweiligen Stellen zwischen den Prozessen	Das entsprechende Verknüpfungselement des Materialflusses zwischen den Prozessen einzeichnen.
	Internen Informationsfluss ermitteln	Kenntnis über den Informationsfluss innerhalb einer Firma und zwischen den einzelnen Prozessen und über Art und Weise des Informationsflusses (elektronisch, manuell).	Den Informationsfluss und die informationslogistischen Verknüpfungen der Prozesse untereinander ermitteln. Zum Beispiel die Stationen des Kanban Karten System ermitteln durch Beobachten des Milkruns, oder durch Erfragen, etc.
	Internen Informationsfluss einzeichnen	Kenntnis über die Symbolik für den internen Informationsfluss (Produktions-, Lieferanten-, Entnahme-Kanban) und der Verknüpfungselemente	Einzeichnen von Pfeilen in Richtung des Informationsflusses mit Kennzeichnung um welche Art von Kanban oder andere Art von Informationsträger es sich handelt.

Abbildung A.19: Kompetenzmatrix der WSA - Teil 2

Die Teilnehmende besitzen die Fähigkeit die klassische Wertstromanalyse auszuwerten	Berechnen der Durchlaufzeit	Kenntnis der Formel für die Durchlaufzeit	Addition der Zykluszeiten und der Liegezeiten und Einzeichnen in die Wertstromkarte
	Berechnen des Wertschöpfungsanteils	Kenntnis der Formel für den Wertschöpfungsanteil	Division der Zykluszeiten durch die Durchlaufzeit
Die Teilnehmende besitzen die Fähigkeit die klassische Wertstromanalyse zu bewerten	Einzeichnen der Handlungsfelder in Form der Verlustarten (Verschwendung, Inflexibilität, Instabilität)	Kenntnis von Schwachstellen in Wertströmen (Verlustarten)	Identifizieren und Kennzeichnen der Verlustquellen mit einem Kaizen-Blitz
		Kenntnis der Anordnung des Templates der WSA	Hineinschreiben der Verlustquellen in die Kästen für Produktion- und informationslogistische Kaizen unterhalb der betroffenen Prozesse
	Ableiten von Handlungsmaßnahmen zur Verbesserung des Wertstroms	Kenntnis über den Abgleich der Ist-Situation mit den Kundenanforderungen	Definition der aus den Kaizen-Blitzen abzuleitenden Maßnahmen
	Priorisierung von Kaizen-Aktivitäten	Kenntnis über die Auswirkung der einzelnen Verlustarten	Kosten-Nutzen-Abschätzung der einzelnen Verlustarten

Abbildung A.20: Kompetenzmatrix der WSA - Teil 3

A.5.2 Matrix zur Ableitung von Herausforderungen

Soll	Ist	Abweichung	Herausforderung
Szenario zur Adressierung der Elektronikindustrie	Szenario zur Adressierung der Maschinenbaubranche	Ja	Fehlende Lernumgebung
			Platzbedarf
			Finanzieller Aufwand
Verschiedene Schwierigkeitsgrade	Ein Schwierigkeitsgrad	Ja	Wenig wandlungsfähige Umgebung
			Umsetzungsaufwand
			Höhere Anforderungen an studentische Hilfskräfte (mehr Zustände)
			Darstellbarkeit unterschiedlicher Schwierigkeitsgrade im selben Workshop
Zusätzliches Transferszenario zur Festigung der Lerninhalte	Kein Transferszenario vorhanden	Ja	Fehlende Lernumgebung
			Platzbedarf
			Finanzieller Aufwand
...

Abbildung A.21: Abgeleitete Herausforderungen

A.5.3 Produktmerkmale

Basis	Leistung	Begeisterung	
<ul style="list-style-type: none"> • Intuitive Bedienbarkeit (.58) • Realistische Aufgaben (.16) • Unterstützende Informationen (.13) • Unterstützung durch den Trainer (.00) 	<ul style="list-style-type: none"> • Kostenreduktion (.00) 	<ul style="list-style-type: none"> • Realistische Haptik (.53) • Mehrspielermodus (.50) 	<ul style="list-style-type: none"> • Unterstützt das Selbstmanagement der Lernenden (0.21) • Gamification-Elemente (.13)
	Neutral		
	<ul style="list-style-type: none"> • Akustische Rückmeldung (.38) • Multimodale Rückmeldung (.25) • Sicherheitsrichtlinien (.21) • Wiedererkennbarkeit der Umgebung (.06) 	<ul style="list-style-type: none"> • Unterstützt innovative Aktionen (.45) • Visuelle Hinweise (.38) • Ermuntert zum Austesten von Grenzen (.33) • Verschiedene Schwierigkeitsgrade (.29) • Unterschiedliche Szenarien (.29) • Multimodaler Input (.26) • Kontinuierliches Feedback (.25) 	<ul style="list-style-type: none"> • Unterstützende 3D-Animationen (.13) • Barrierefreie Funktionen (.10) • Virtueller Trainer (.06) • Warnt Benutzer (.06) • Zusätzliches reales Training (.04) • Unterstützt unterschiedliche Lerngeschwindigkeiten (.04)

Abbildung A.22: Abgeleitete und bewertete Produktmerkmale (Kategoriestärke des Merkmals jeweils in Klammern), eigene Darstellung.

A.5.4 Bildschirmfotos 3D-Umgebung

Nachfolgend werden Bildschirmfotos der im Forschungsprojekt entwickelten 3D-Umgebung gezeigt. Die 3D-Umgebung wurde von der Firma UReality, einem Geschäftsbereich der Kirchner Konstruktionen GmbH, erstellt.



Abbildung A.23: 3D-Umgebung: Minimum-Viable-Product



Abbildung A.24: 3D-Umgebung: Darstellung des Rüstvorgangs mittels Zahnrad



Abbildung A.25: 3D-Umgebung: Materialbestände

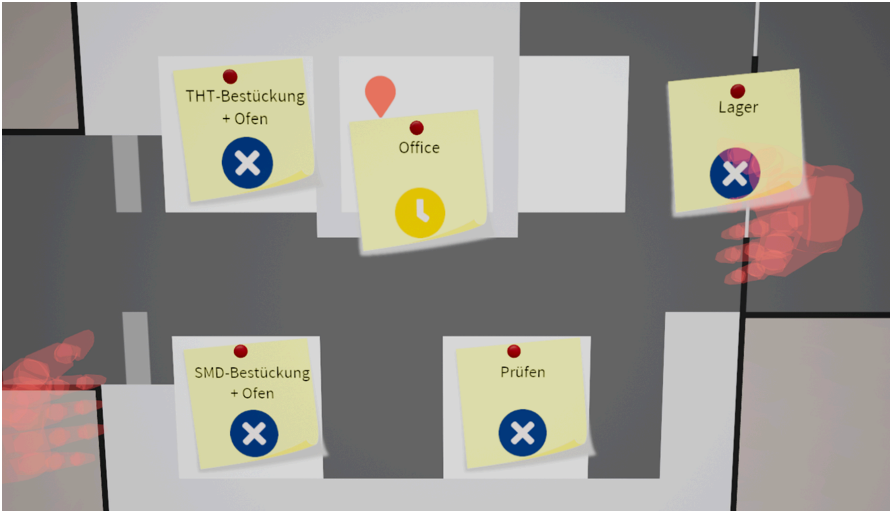


Abbildung A.26: 3D-Umgebung: Minimap

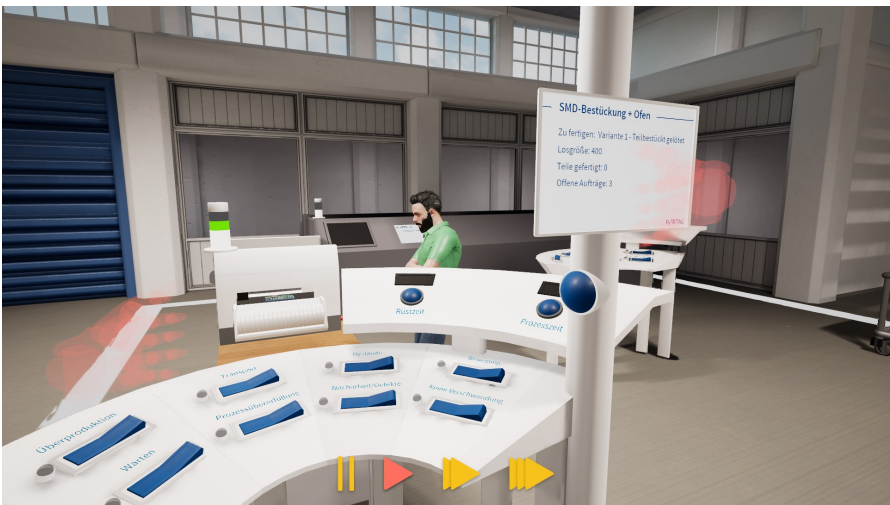


Abbildung A.27: 3D-Umgebung: Verschwendung

A.5.5 Matrix zur Ableitung Szenarioelementen

SzA	SE	Beschreibung	Ort (P/V)
Leiterplattenherstellung	Produktionsplanung und Steuerung	Das Szenario soll die Produktionsplanung und Steuerung mit allen relevanten Kennzahlen und Kundendaten darstellen.	V
	Produktionsprozesse	Das Szenario soll drei Produktionsprozesse zur Abbildung einer Leiterplattenfertigung beinhalten	V
	Prozessverknüpfungen: Material	Das Szenario soll den Materialfluss zwischen den verschiedenen Prozessen beinhalten	V
	Prozessverknüpfungen: Informationen	Das Szenario soll den Informationsfluss (z. B. Auftragsdaten) zwischen den Prozessen darstellen	V
	Bestände	Das Szenario soll Materialbestände für das Rohmaterial, Halbfertigprodukte und Fertigprodukte beinhalten	V
	Aufnahme von Prozessdaten	Das Szenario soll die Aufnahme von prozessrelevanten Prozessdaten (z. B. Prozess-, Rüst- und Zykluszeiten) ermöglichen.	V
	Darstellung der WSA Ergebnisse als Wertstromkarte	Die Ergebnisse der WSA sollen als Wertstromkarte abgebildet werden können	P

Abbildung A.28: Auszug aus der Matrix zur Ableitung von Szenarioelementen

A.5.6 Umgebungslayout Leiterplattenherstellung

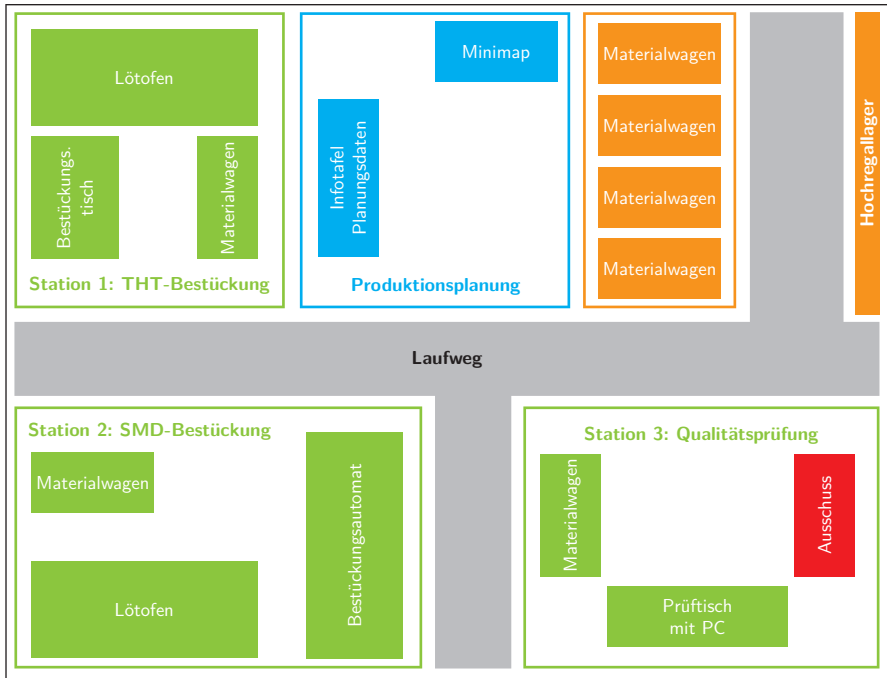


Abbildung A.29: Umgebungslayout Leiterplattenherstellung

A.6 Evaluation

A.6.1 Usability-Fragebogen

Forschungsprojekt Portal: Anwendungstest

Datum: 01.03.2022

Liebe Umfrage-Teilnehmerinnen und –Teilnehmer,
für das Forschungsprojekt Portal wird eine personalisierte Lernfabrik-Übung in Virtual Reality entwickelt und evaluiert. Durch den heutigen Anwendungstest mit Schwerpunkt Usability sollen wichtige Erkenntnisse gesammelt werden, um die Lernumgebung zu verbessern. Das Projektteam würde sich sehr freuen, wenn Sie die folgenden Fragen beantworten.

Bitte beachten Sie folgende Informationen:

- Dieser Fragebogen ist in jeder Hinsicht vollständig anonym.
- Das Projektteam würde sich deshalb freuen, wenn Sie auf jede Frage offen antworten würden. Die Antworten werden in keiner Weise positiv oder negativ bewertet. Jede Antwort ist wertvoll.
- Bei Fragen zur Auswertung oder inhaltlicher Art steht das Projektteam Ihnen gerne zur Verfügung.

Herzlichen Dank vorab für Ihr Engagement!

I. Selbsteinschätzung / Persönliche Angaben

TN-Kennung: _____

Alter: _____

Geschlecht: _____

Fragestellung	Stimme gar nicht zu			Stimme zu	
	--	-	0	+	++
Ich bin gegenüber Virtual Reality zugeneigt.					
Ich würde mich selbst als technikaffin bezeichnen.					
Ich habe bereits oft VR / AR Lösungen verwendet.					
Ich bin mit computergestützten Technologien aufgewachsen.					

Abbildung A.30: Nutzbarkeitsfragebogen - Teil 1

II. Beurteilung Softwareumsetzung

Wie beurteilen Sie die einzelnen Punkte?

Fragestellung	Stimme gar nicht zu			Stimme zu	
	--	-	0	+	++
Ich kann mir sehr gut vorstellen, das System regelmäßig für Weiterbildungsmaßnahmen zu nutzen.					
Ich empfinde das System als unnötig komplex.					
Ich empfinde das System als einfach zu nutzen.					
Ich denke, dass ich technischen Support brauchen würde, um das System zu nutzen.					
Ich finde, dass die verschiedenen Funktionen des Systems gut integriert sind.					
Ich finde, dass es im System zu viele Inkonsistenzen gibt.					
Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Leute das System schnell zu beherrschen lernen.					
Ich empfinde die Bedienung als sehr umständlich.					
Ich habe mich bei der Nutzung des Systems sehr sicher gefühlt.					
Ich musste eine Menge Dinge lernen, bevor ich mit dem System arbeiten konnte.					
Ich finde das System innovativ.					
Ich hatte viele Freiheiten im System.					
Die Fabrikumgebung wurde hinreichend realitätsnah dargestellt.					
Während der Nutzung habe ich mich unwohl gefühlt.					
Die Navigation in der VR Umgebung fiel mir einfach.					
Die Einführung in die Bedienung vorab war hinreichend.					
Die virtuelle Umgebung eignet sich als Ersatz für die physische Lernumgebung (rein virtuelles Format)					
Die virtuelle Umgebung eignet sich zur Unterstützung / Ergänzung von physischen Lernumgebungen (hybrides Format)					

Abbildung A.31: Nutzbarkeitsfragebogen - Teil 2

III. Offene Fragen

1. Was hat Ihnen an der VR-Umgebung am meisten gefallen?

2. Was würden Sie an der VR-Umgebung verändern?

3. Können Sie bitte genauer beschreiben, welche Probleme Sie hatten?

4. Können Sie sich die Nutzung von VR Umgebungen auch in anderen Lehr-Lern-Kontexten vorstellen?

5. Warum sehen Sie die VR Umgebung als geeignet / ungeeignet für den Ersatz (rein virtuelles Konzept) bzw. zur Unterstützung (hybrides Konzept) von realen Lern-Umgebungen an.

Abbildung A.32: Nutzbarkeitsfragebogen - Teil 3

A.6.2 Expertenfragebogen

Expert:innenevaluation der entwickelten Methodik

Methodik zur kompetenzorientierten Gestaltung von virtuellen Lehr-Lern-Szenarien für Lernfabriken der schlanken Produktion

ALLGEMEINE ANGABEN

Name: _____

Unternehmen / Institution: _____

Bitte schätzen Sie sich selbst hinsichtlich der folgenden Aspekte ein:

	(gering)				(hoch)
	1	2	3	4	5
Erfahrung im Kontext Lernfabriken					
Erfahrung mit Virtual / Augmented Reality Lösungen					

INHALTLICHE ANFORDERUNGEN

Bitte bewerten Sie die Gestaltung von virtuellen Lehr-Lern-Szenarien auf Basis der entwickelten Methodik anhand der folgenden Anforderungen.

	(nicht erfüllt)				(absolut erfüllt)
	1	2	3	4	5
Strukturiertheit Der Ablauf des Verfahrens ist strukturiert, systematisch.					
Individualität Das Verfahren berücksichtigt die Individualität (z. B. individuelle Anforderungen) der Anwendungsfälle.					
Detailliertheit Die einzelnen Bausteine und Schritte des Verfahrens sind hinreichend detailliert und verständlich beschrieben.					
Zielorientierung Das Verfahren orientiert sich an den Zielsetzungen (Nutzer:innen- und Kompetenzorientierung).					
Einfachheit Das Verfahren ist auch von wenig erfahrenen Anwender:innen einsetzbar und nachvollziehbar.					
Einsetzbarkeit Das Verfahren ist sowohl für Neu- als auch Weiterentwicklung hybrider und virtueller LLK einsetzbar.					

Abbildung A.33: Expert:innenfragebogen - Teil 1

FORMALE ANFORDERUNGEN

Bitte bewerten Sie die Gestaltung von virtuellen Lehr-Lern-Szenarien auf Basis der entwickelten Methodik anhand der folgenden Anforderungen.

	(nicht erfüllt)				(absolut erfüllt)
	1	2	3	4	5
<p>Objektivität</p> <p>Bei Anwendung durch unterschiedliche Personen wird ein gleichartiges Ergebnis hinsichtlich Nutzer:innen- und Kompetenzorientierung erzielt.</p>					
<p>Reproduzierbarkeit</p> <p>Bei wiederholter Anwendung durch dieselbe Person wird ein gleichartiges Ergebnis im Hinblick auf Nutzer:innen- und Kompetenzorientierung erzielt.</p>					
<p>Übertragbarkeit</p> <p>Das Verfahren ist auf weitere Anwendungsfälle übertragbar.</p>					
<p>Nachvollziehbarkeit</p> <p>Die Ergebnisse des Verfahrens sind in Bezug auf die Eingangsgrößen nachvollziehbar.</p>					
<p>Anpassungsfähigkeit</p> <p>Das Verfahren lässt sich adaptiv durch neue Informationen anpassen.</p>					
<p>Simplizität</p> <p>Das Verfahren fokussiert sich auf wesentliche Elemente.</p>					

KOMMENTARE

Abbildung A.34: Expert:innenfragebogen - Teil 2

A.7 Betreute Abschlussarbeiten

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

Tabelle A.3: Betreute Abschlussarbeiten

Student:in	Typ	Titel	Jahr
René Brunner	MT	Untersuchung möglicher Chancen und Risiken bei der Verwendung von Virtual Reality in Lernfabriken	2019
Dominik Görge	StA	Untersuchung kompetenzbasierter Anforderungen an Virtual Reality im Kontext des Workshops "Wertstromanalyse sowie Ableitung möglicher Gestaltungselemente für Virtual Reality	2019
Maisi Lilian Pei	BT	Anforderung- und kompetenzorientierte Auswahl von Virtual Reality Hardware für Lernfabriktstrainings	2020
Sabine Midré	BT	Evaluation von Anforderungen an ein Virtual-Reality-Training für Lernfabriken	2020
Stanislav Kronin	StA	Anforderung- und kompetenzorientierte Auswahl von Virtual Reality Hardware für Lernfabriktstrainings	2020
Christoph Diezemann	MT	Transferbarrieren bei der Kompetenzvermittlung im Kontext von Lernfabrikschulungen und betrieblicher Weiterbildung mit Virtual Reality begegnen	2021

Fortgesetzt auf nächster Seite

fortgesetzt von vorheriger Seite

Student:in	Typ	Titel	Jahr
Alexander Hennemann	MT	Identifikation von Erfolgsfaktoren sowie Entwicklung einer Methodik zur Bewertung der Potenziale in der Anwendung von Virtual Reality	2021
Benjamin Walter	BT	Extended Reality in der Weiterbildung - Anwendung und Trends	2022
Leonardo Gutierrez	BT	Gestaltung eines Virtual Reality Trainingsszenario für Lernfabriken	2022
Jorge Zaun	BT	Extended Reality in der Weiterbildung - Strategieentwicklung	2022

BT: Bachelorthesis, MT: Masterthesis, StA: Studienarbeit

A.8 Publikationsübersicht

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

Tabelle A.4: Wissenschaftliche Publikationen

Quelle	Titel	Jahr
[En20b]	Cooperation between Learning Factories: Approach and Example	2020
[Ri20b]	Agile implementation of virtual reality in learning factories	2020
[Ri20a]	Gestaltung von personalisierten Lernfabrikschulungen in Virtual Reality im Kontext schlanker Produktion	2020
[Kr20a]	Requirements for the Implementation of Virtual Reality in Learning Factories	2020
[Ri21a]	Hybrid Learning Factories for Lean Education: Approach and Morphology for Competency-Oriented Design of Suitable Virtual Reality Learning Environments	2021
[Ri21b]	Approach for Conceptualization and Implementation of Virtual Reality in Learning Factories	2021
[Ri21c]	User-oriented Design of Virtual Reality Supported Learning Factory Trainings: Methodology for the Generation of Suitable Design Elements	2021
[RKM22]	Guidelines for the Systematic Selection of Virtual Reality Hardware for Learning Factories	2022
[RM22a]	Building Competencies for Value Stream Mapping–Evaluation of a Virtual Learning Scenario	2022
[RM22b]	Virtual reality supported trainings for lean education: conceptualization, design and evaluation of competency-oriented teaching-learning environments	2022
[Kr23]	Revision of the Learning Factory Morphology	2023

Darüberhinaus wurden vom Autor die nachfolgend genannten themenbezogene Fachbeiträge veröffentlicht.

Tabelle A.5: Fachbeiträge

Quelle	Titel	Jahr
[Ri20c]	Virtual Reality in der betrieblichen Bildung	2020
[RM21]	Ansatz zur Konzeptionierung und Implementierung von Virtual Reality in Lernfabriken	2021