

Lernerzentrierte digitale Werkzeuge zur Montagetrainingsunterstützung am Beispiel des Sondermaschinenbaus

vorgelegt von

M. Sc.

Jan Philipp Menn

ORCID: 0000-0003-3480-7059

von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Franz Dietrich

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Günther Seliger

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Abramovici

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 12. Dezember 2019

Berlin 2019

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Montagetechnik und Fabrikbetrieb, später Fachgebiet Handhabungs- und Montagetechnik, des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der Technischen Universität Berlin.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Prof. em. Dr.-Ing. Günther Seliger, für die Unterstützung und die konstruktive Kritik während der Erarbeitung meiner Dissertation sowie bei zahlreichen Buch- und Konferenzbeiträgen. Zudem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietrich für den Vorsitz bei der wissenschaftlichen Aussprache sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Abramovici für sein Zweitgutachten. Allen Kollegen des IWF danke ich für das Feedback, die Anregungen und Denkanstöße sowie die gute Zusammenarbeit in den vergangenen Jahren. Besonderer Dank gilt hierbei meinen Kollegen Bernd Muschard, Bastian Schumacher, Mustafa Severengiz und Felix Sieckmann. Ohne Euch hätte das Thema der Lernzeuge niemals so gut aufgearbeitet werden können. Danken möchte ich auch meiner studentischen Hilfskraft, Frau Andrea Lorenz. Die vielen programmiertechnischen Arbeiten und Ideen haben die Umsetzung des erarbeiteten Konzepts in der vorliegenden Form ermöglicht. Viele weitere Studierende haben zu dieser Arbeit mit beigetragen, sei es durch Abschlussarbeiten oder Ergebnisse aus Projektarbeiten, auch Ihnen gilt mein besonderer Dank.

Ein Großteil meiner Dissertation entstand bei MAN Energy Solutions SE, Berlin. Ich danke dem ehemaligen Standortleiter Ralf Thon, seinem Nachfolger Dr.-Ing. Markus Röhner sowie dem Senior Vice President R&D Engineering Dr.-Ing. Harald Stricker, welche die Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Berlin ermöglicht haben. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Carsten Ulbrich, der bereits seit meinem Praktikum 2010 bei MAN ES in Berlin und später in Changzhou, China, sowie in meiner Zeit als Werkstudent bei MAN ES und als Betreuer meiner Masterarbeit und Promotion jederzeit als Unterstützer und kompetenter Ansprechpartner agierte und meine Bemühungen stets förderte. Mein weiterer Dank gilt allen Kollegen, besonders aus den Bereichen Konstruktion, Service und Montage in Berlin sowie an allen weiteren MAN ES-Standorten in Augsburg, Changzhou, Oberhausen und Zürich für die gute Zusammenarbeit.

Ohne meine Frau, welche mich seit dem Studium in jeder Hinsicht unterstützt und viele Dienstreisen und Überstunden akzeptiert hat, wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Oft hast Du eigene Interessen zurückgestellt, um mich zu unterstützen und diese Arbeit zu ermöglichen, vielen Dank, Aneka. Ein weiterer besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mich auf meinem Weg durch Schule und Studium begleitet und unterstützt haben. Zuletzt danke ich allen Freunden, die in der Zeit meiner Promotion immer ein offenes Ohr hatten und mir mit Rat und Tat zur Seite standen.

Jan Philipp Menn

Kurzfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erhöhung der Lern- und Lehrproduktivität mit Fokus auf der Vermittlung von Montagefertigkeiten in produzierenden Unternehmen. Kürzere Produktinnovationszyklen, stärkere Produktvariantenbildung sowie höhere Mitarbeiterfluktuation erfordern, dass Mitarbeiter immer schneller neue Inhalte verstehen und sich neue Fertigkeiten aneignen müssen. Leicht verständliche und individualisierbare Lern- und Lehrunterlagen können sie hierbei unterstützen. In der Praxis stehen jedoch oft nur statische Anleitungen und technische Zeichnungen zur Verfügung. Bei ihrer Nutzung entsteht eine hohe kognitive Distanz sowohl durch Informationsinterpretation und -übertragung aus zweidimensionalen Lehrunterlagen auf dreidimensionale physische Montageobjekte als auch durch die Interpretation textueller Bestandteile. Dies bindet geistige Ressourcen, welche für den eigentlichen Lernprozess benötigt werden. Die Nachteile herkömmlicher Lehrmethoden wie Vortrag, Projektmethode oder Fallstudie liegen in der starken Lehrerzentrierung, einem erhöhten Zeitaufwand für die erforderlichen Recherchearbeiten sowie begrenzter Eignung zur Montagefertighkeitsvermittlung.

In der vorliegenden Dissertation werden lernerzentrierte digitale Werkzeuge, sogenannte Lernzeuge, sowie eine didaktische Methode für ihre Anwendung in der psychomotorischen Trainingsunterstützung entwickelt und anschließend am Beispiel der Sondermaschinenmontage implementiert und validiert. Lernzeuge sind Objekte, die dem Benutzer ihre Funktionalität automatisch vermitteln. Durch sie können Nutzer mit unterschiedlichen Qualifikationsniveaus und Sprachkenntnissen intuitiv und selbstständig den Umgang mit neuartigen Anlagen und Prozessen erlernen. In der *ersten Phase* der entwickelten Methode werden Vorgehensweisen, Regeln sowie eine Morphologie zur Lernzeugentwicklung gerichtet auf die jeweilige Anwendung vorgestellt. Anschließend werden die Visualisierungstechnologien Augmented und Virtual Reality, Animation, Video und Printanleitung bezüglich ihrer Eignung im Lernzeugeinsatz bewertet. In der *zweiten Phase* wird ein Vorgehen zur Lernzeugnutzung während des Trainings dargestellt, welches die Vorteile bestehender didaktischer Methoden für die lernerzentrierte Vermittlung psychomotorischer Montagefertigkeiten kombiniert. In der *dritten Phase* werden die durch nicht direkt verfügbare physische Trainingsobjekte veränderten Anforderungen der Lernzeugnutzung nach einem Training adressiert. Drei digitale Lernzeuge werden exemplarisch für Montagetrainings im Sondermaschinenbau erstellt. Das erste Lernzeug nutzt Augmented und Virtual Reality, um anhand der Montage additiv gefertigter Komponenten eines Kompressormodells ein Grundverständnis der Montagevorgänge zu vermitteln. Das zweite Lernzeug verwendet Augmented Reality, um die Montage eines Getriebekompressors über eine Datenbrille zu trainieren sowie ein weiterführendes Verständnis der Bauteilfunktionen zu ermöglichen. Ein interaktives 3D-PDF bildet das dritte Lernzeug, welches primär zum selbständigen Wiederholen der Montagevorgänge ohne physische Montageobjekte nach dem Training genutzt werden kann. Die Lernzeuge werden nach ersten Tests mit Auszubildenden und Studierenden bei einem Sondermaschinenbauerhersteller von Turbomaschinen implementiert, getestet und bewertet. Es wird eine Erhöhung der Lern- und Lehrproduktivität durch den Einsatz der entwickelten Lernzeuge erreicht. Diese wird durch den Vergleich mit anderen Lernunterlagen verifiziert.

Abstract

The objective of this thesis is to increase the teaching and learning productivity with a focus on conveying assembly skills in manufacturing companies. Shorter product innovation cycles, stronger product variant formation as well as higher employee fluctuation lead to the fact that employees must understand ever faster new contents and acquire new skills. Easily understandable and individualisable teaching and learning materials can support them in this. In practice, however, often only static instructions and technical drawings are available. When they are used, a high cognitive distance results both from the interpretation of information and transfer from two-dimensional training documents to three-dimensional physical assembly objects and from the interpretation of text. This binds mental resources, which are needed for the actual learning process. The disadvantages of conventional teaching methods such as lecture, project method or case study lie in the strong teacher centring, an increased expenditure of time for the necessary research work as well as low suitability for teaching assembly skills.

In this dissertation, learner-centred digital tools, so-called learnstruments and a didactic method for their application in psychomotor training support are developed and subsequently implemented and validated using the example of special machinery assembly. Learnstruments are objects that automatically convey their functionality to the user. They enable users with different qualification levels and language skills to learn intuitively and independently how to handle new types of equipment and processes. In the *first phase* of the developed method, procedures, rules and a morphology for the development of learnstruments directed at the respective application are presented. Furthermore, the visualization technologies Augmented and Virtual Reality, animation, video and printed instructions are evaluated for their use in combination with learnstruments. In the *second phase* a procedure for the use of learnstruments during training is presented, which combines the advantages of existing didactic methods for the learner-centred teaching of psychomotor assembly skills. In the *third phase* the requirements of the use of learnstruments changed by the absence of physical training objects after a training are addressed. Three digital learnstruments are created as examples for assembly training in special machinery manufacturing. The first learnstrument uses augmented and virtual reality to convey a basic understanding of the assembly processes by means of the assembly of additive manufactured components of a compressor model. The second learnstrument uses augmented reality to train the assembly of an integrally geared compressor via a head mounted display and to enable a further understanding of the component functions. An interactive 3D PDF is the third learnstrument, which can be used primarily to repeat the assembly processes independently without physical assembly objects after the training. After initial tests with trainees and students, the learnstruments are implemented, tested and evaluated at a special machinery manufacturer of turbomachinery. An increase in teaching and learning productivity is achieved through the use of the developed learnstruments. This is validated by comparison with other learning materials.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung	4
1.2 Aufbau der Arbeit	5
2 Anwendung	6
2.1 Produktionsformen	6
2.2 Produktspektrum	7
2.3 Montage	10
2.4 Training der Servicemonteure	12
3 Didaktik	14
3.1 Wissen und Kompetenz	14
3.2 Lern- und Lehrtheorien	19
3.2.1 Taxonomie der Lernziele nach Bloom	19
3.2.2 Lernstufen nach Fitts und Posner	22
3.2.3 Lernzyklus nach Kolb	22
3.2.4 Kombination	23
3.3 Lern- und Lehrmethoden	25
3.3.1 Lehrerzentriert	25
3.3.1.1 Anweisung	26
3.3.1.2 Vortrag	26
3.3.2 Lehrender und Lernender beteiligt	26
3.3.2.1 Vier-Stufen-Methode	26
3.3.2.2 Lehrgespräch	29
3.3.3 Lernerzentriert	29
3.3.3.1 Leittextmethode	30
3.3.3.2 Simulations-/Trainingsmethode	31
3.3.3.3 Planspiel	31
3.3.3.4 Projektmethode	31
3.3.3.5 Fallmethode	31
3.3.4 Lernzeuge	32
4 Visualisierungstechnologien	37
4.1 Print	38
4.2 Video	40
4.3 Computeranimation	41
4.4 Virtual Reality	42

4.5	Augmented Reality	44
5	Handlungsbedarf	49
6	Lernzeugmethode	51
6.1	Anforderungen nach Wertschöpfungsfaktoren	52
6.2	Bewertung existierender Methoden	55
6.3	Lernerzentrierte psychomotorische Trainingsmethode	58
6.3.1	Lernzeugentwicklung <i>vor Trainingsbeginn</i>	60
6.3.1.1	Instructional-Design-Modell	60
6.3.1.2	Erweiterung des Lernzeugkonzepts und Entwicklung einer Morphologie	61
6.3.1.3	Bewertung und Auswahl von Visualisierungstechnologien	64
6.3.2	Lernzeugnutzung <i>während des Trainings</i>	68
6.3.2.1	Vorstellen mithilfe von Lernzeugen	70
6.3.2.2	Vorführen und Nachahmen mithilfe von Lernzeugen	71
6.3.2.3	Besprechen der Ergebnisse	73
6.3.3	Lernzeugnutzung <i>nach dem Training</i>	73
6.4	Bewertung	74
7	Beispielhafte Implementierung	75
7.1	Zielgruppe und Lerninhalt	76
7.2	Lernzeugentwicklung und -validierung	78
7.2.1	AR/VR-App zum Montage-Grundlagentraining mithilfe physischer Modelle .	80
7.2.1.1	Lernzeugentwicklung und -beschreibung	81
7.2.1.2	Validierung der Eignung zur Vermittlung von Montagetätigkeiten .	85
7.2.1.3	Lernzeuganpassungen	87
7.2.1.4	Validierung der Eignung zur Vermittlung der Montage eines Getriebe- kompressormodells	90
7.2.2	AR-HoloLens zum Montagetaining physischer Originale	91
7.2.2.1	Lernzeugentwicklung und -beschreibung	92
7.2.2.2	Validierung der Eignung zur Vermittlung von Montagetätigkeiten .	94
7.2.2.3	Lernzeuganpassungen für die Montage eines Getriebekompressors .	95
7.2.2.4	Validierung der Eignung zur Vermittlung der Montage eines origina- len Getriebekompressor	97
7.2.3	Animiertes 3D-PDF zum virtuellen Montagetaining	99
7.2.3.1	Lernzeugentwicklung und -beschreibung	99
7.2.3.2	Validierung der Eignung zur Vermittlung von Montagetätigkeiten .	102
7.2.3.3	Lernzeuganpassungen für die Montage einer Kohleringdichtung . .	103
7.2.3.4	Validierung der Eignung zur Vermittlung der Montage einer Kohle- ringdichtung	106
7.3	Lernzeugvergleich	107
7.4	Wirtschaftliche Bewertung	110
8	Zusammenfassung und Ausblick	111

Literaturverzeichnis	114
Studentische Beiträge	135
Abkürzungsverzeichnis	137
Glossar	138
Anhang A: AR/VR-App	144
Anhang B: HoloLens Umfrageergebnisse	151
Anhang C: AR-Unternehmensumfrage	152
Anhang D: Didaktische Methoden	160
Anhang E: Übersicht AR-Brillen	168
Anhang F: Lernzeugveröffentlichungen	169
Anhang G: Wirtschaftliche Bewertungen	170

Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufwände für Informationsinterpretation und Informationserstellung	3
2.1	Beispiel einer Erzeugnisstruktur	7
2.2	Cynefin Modell	8
2.3	Organisationsformen der Montage	9
2.4	Beispiel für einen Vorranggraphen	12
3.1	Dimensionen der beruflichen Handlungskompetenz	16
3.2	Wissenstreppe 4.0	17
3.3	Lernzyklus nach Kolb	23
3.4	Kombination der Lerntheorien	24
3.5	Cubefactory	33
3.6	Smart Assembly Workplace	34
3.7	Windlabor	35
3.8	Solarladestation	35
4.1	Medienklassifizierung für die Montage	38
4.2	Beispiel für eine Printanleitung	39
4.3	Fünf Typen von Abbildern eines Objektes	39
4.4	Beispiel für einen Utility-Film	40
4.5	Beispiel für eine Computeranimation innerhalb eines 3D-PDFs	42
4.6	Beispiel für eine VR-Anleitung	43
4.7	Virtuelles Kontinuum	45
4.8	Beispiel für eine AR-Anleitung	45
4.9	Übersicht Visualisierungstechnologien	48
6.1	Konzeptentwicklung	51
6.2	Wertschöpfungsmodul	53
6.3	Anpassungspfade für eine lernerzentrierte, psychomotorische Methode	56
6.4	Lernerzentrierte psychomotorische Trainingsmethode	59
6.5	Qualitativer Vergleich der Visualisierungstechnologien	66
6.6	Qualitative Darstellung des Entwicklungspotenzials von Visualisierungstechnologien	67
6.7	Vergleich zwischen Vier-Stufen- und lernerzentrierter psychomotorischer Lernzeugmethode	70
7.1	Montage eines Getriebekompressors	77
7.2	Layout der Trainingsumgebung bei MAN ES	79
7.3	MAN ES Trainingskompressor	79
7.4	Hauptmenü der App	81
7.5	Smartphone-VR-HMD und Xbox-Bluetooth-Controller	82
7.6	AR-Montage	83

7.7	VR-Darstellung des Gasflusses	84
7.8	AR-Explosionsdarstellung	85
7.9	Montagezeiten mit und ohne AR-App	86
7.10	Montagezeiten mit und ohne Bauteilzeichnung	87
7.11	Bauteilanordnung in einem Shadowboard im Koffer	88
7.12	Prinzipielle Funktionsweise der Bauteilüberwachung	88
7.13	AR-Lokalisierung	89
7.14	Montagezeiten mit und ohne AR-App und Koffer	90
7.15	Microsoft HoloLens	91
7.16	Tap-Geste der HoloLens	91
7.17	Montage einer Steckdose mithilfe der HoloLens	92
7.18	Einblendung von Animationen und Zusatzinformationen mithilfe der HoloLens	93
7.19	Überprüfung der Steckdosenmontage mithilfe einer virtuellen Lampe	93
7.20	Lagermontageanimation auf der HoloLens	96
7.21	Visualisierung von Kompressorkomponenten mithilfe der HoloLens	96
7.22	Durchführung eines Trainings mit mehreren HoloLens bei MAN ES	98
7.23	Bauteilübersicht eines Radnabenmotors	99
7.24	Bildliche Montageanleitung eines Radnabenmotors	100
7.25	Utility Film eines Radnabenmotors	101
7.26	3D-PDF eines Radnabenmotors	101
7.27	Montagezeiten aller Studierenden bezogen auf die Visualisierungsart	103
7.28	Erläuterungen zur Funktionsweise eines 3D-PDFs	104
7.29	Beispielhafte Montagesequenz aus einem 3D-PDF (1/2)	105
7.30	Beispielhafte Montagesequenz aus einem 3D-PDF (2/2)	105
7.31	Umfrageresultate von zwölf FSEs nach einer Montageschulung mit einem 3D-PDF	107
Gl.1	Boxplot unter Berücksichtigung von Außen- und Fernpunkten	139
Gl.2	Boxplotdefinition	139
A.1	VR-Darstellung der Getriebebewegung	144
A.2	VR-Explosionsdarstellung und Bauteilauswahl	144
A.3	VR-Darstellung von Bauteilinformationen	145
A.4	AR-Darstellung der Getriebebewegung	145
A.5	AR-Darstellung des Gasflusses	146
A.6	AR-Darstellung von Bauteilinformationen	146
A.7	Bauteilanordnung des 3D-Drucks <i>Blatt 1</i>	147
A.8	Bauteilanordnung des 3D-Drucks <i>Blatt 2</i>	147
A.9	Bauteilanordnung des additiv gefertigten Kompressormodells <i>Übersicht</i>	148
A.10	Anordnung der entwickelten Lernzeuge für ein Montagetraining bei MAN ES	149
A.11	DIN A3 Bauteilzeichnung des 3D-Drucks	150
B.1	Umfrage zur Steckdosenmontage mithilfe der HoloLens	151
C.1	Umfrage AR-Nutzung: Allgemeine Fragen: Branche	152
C.2	Umfrage AR-Nutzung: Allgemeine Fragen: Mitarbeiter	152
C.3	Umfrage AR-Nutzung: Allgemeine Fragen: Jahresumsatz	152
C.4	Umfrage AR-Nutzung: Allgemeine Fragen: Hierarchieebene	153

C.5	Umfrage AR-Nutzung: Allgemeine Fragen: Alter	153
C.6	Umfrage AR-Nutzung: Allgemeine Fragen: Arbeitsinhalt	153
C.7	Umfrage AR-Nutzung: AR-bezogene Fragen: Derzeitige Nutzung von AR	153
C.8	Umfrage AR-Nutzung: AR-bezogene Fragen: AR für Montagetrainings	154
C.9	Umfrage AR-Nutzung: AR-bezogene Fragen: AR-Entwicklungen von Fremdfirmen . .	154
C.10	Umfrage AR-Nutzung: AR-bezogene Fragen: Vorteile von AR	154
C.11	Umfrage AR-Nutzung: AR-bezogene Fragen: Defizite von AR	155
C.12	Umfrage AR-Nutzung: AR-bezogene Fragen: AR-Kompetenz Kollegen	155
C.13	Umfrage AR-Nutzung: AR-bezogene Fragen: Eigene AR-Kompetenz	156
C.14	Umfrage AR-Nutzung: AR-bezogene Fragen: Eigene AR-Nutzung	156
C.15	Umfrage AR-Nutzung: Fragen zur Weiterbildung: Trainingsmethoden	156
C.16	Umfrage AR-Nutzung: Fragen zur Weiterbildung: Trainingszeit	157
C.17	Umfrage AR-Nutzung: Fragen zur Weiterbildung: Trainingskosten	157
C.18	Umfrage AR-Nutzung: Fragen zur Weiterbildung: Zufriedenheit aktuelles Training . .	157
C.19	Umfrage AR-Nutzung: Zukunft: AR-Nutzung	158
C.20	Umfrage AR-Nutzung: Zukunft: Investitionen	158
C.21	Umfrage AR-Nutzung: Zukunft: AR-Anwendungsdauer	158
C.22	Umfrage AR-Nutzung: Zukunft: Mitarbeiterakzeptanz AR	159
C.23	Umfrage AR-Nutzung: Zukunft: Startup-Kooperation	159
C.24	Umfrage AR-Nutzung: Zukunft: AR-Lösungsanbieter	159

Tabellenverzeichnis

1.1	Aufbau der Arbeit	5
2.1	Vergleich von Sondermaschinenbau und Serienfertigung	7
2.2	Montageprinzipien für Großgeräte	10
3.1	Lernformen	16
3.2	Typologie der Wissensentstehung	17
3.3	Kognitive Taxonomie	20
3.4	Wissensmatrix	20
3.5	Erlernen motorischer Fertigkeiten	22
3.6	Lernmethoden	25
3.7	Unterweisungsgliederung	27
3.8	Übersicht der Vier-Stufen-Methode	28
3.9	Allgemeine heuristische Regeln zur Bewältigung komplexer Arbeitstätigkeiten	29
3.10	Ablauf der Leittextmethode	30
3.11	Beispielhafte Übersicht existierender Lernzeuge	36
6.1	Bewertung existierender Methoden	56
6.2	Übersicht der aus den einzelnen Methoden entnommenen Bestandteile für die neue Methode	59
6.3	Lernzeugmorphologie <i>Übersicht</i>	61
6.4	Vergleich der Aufgaben von Lehrendem, Lernendem und Lernzeug bei Vier-Stufen-, Leittext-, und Lernzeugmethode	69
6.5	Bewertung der Lernzeugmethode	74
7.1	Zielgruppenanalyse	76
7.2	Lernzeugmorphologie AR-App <i>Prototyp</i>	82
7.3	Manipulationsmöglichkeiten des virtuellen Kompressormodells	84
7.4	Lernzeugmorphologie AR-App <i>MAN ES</i>	89
7.5	Lernzeugmorphologie HoloLens <i>Prototyp</i>	94
7.6	Lernzeugmorphologie HoloLens <i>MAN ES</i>	97
7.7	Lernzeugmorphologie 3D-PDF <i>Prototyp</i>	102
7.8	Lernzeugmorphologie 3D-PDF <i>MAN ES</i>	105
7.9	Vergleich entwickelter Lernzeuge bezogen auf die Montageinhaltsvermittlung	108
7.10	Lernzeugvergleich	109
D.1	Vier-Stufen-Methode <i>ausführlich</i>	160
D.2	Beispiele, Schlüsselbegriffe und Lerntechnologien der kognitiven Domäne	163
D.3	Beispiele und Schlüsselbegriffe der psychomotorischen Domäne	165
D.4	Beispiele und Schlüsselbegriffe der affektiven Domäne	166
E.1	Übersicht aktueller AR-Brillen für industrielle Anwendungen	168

F.1	Bisherige Veröffentlichungen zu Lernzeugen	169
G.1	Wirtschaftliche Bewertung der AR-App im Sondermaschinenbau	170
G.2	Wirtschaftliche Bewertung der HoloLens im Sondermaschinenbau	171
G.3	Wirtschaftliche Bewertung des 3D-PDFs im Sondermaschinenbau	172
G.4	Wirtschaftliche Bewertung der AR-App in der Serienproduktion	173
G.5	Wirtschaftliche Bewertung der HoloLens in der Serienproduktion	174
G.6	Wirtschaftliche Bewertung des 3D-PDFs in der Serienproduktion	175

1 Einleitung

Neben der schulischen Ausbildung im Primar- und Sekundarbereich und der universitären Ausbildung im Tertiärbereich ist vor allem die berufliche Aus- und Weiterbildung im Quartärbereich von immenser Bedeutung, um die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Betriebe bei immer schnelleren und kürzeren Produktlebens- und Innovationszyklen zu sichern [Kau-16]. Dabei kann Weiterbildung verstanden werden als eine Fortsetzung oder auch als eine Wiederaufnahme des organisierten Lernens nach dem Abschluss einer Bildungsphase [Deu-70, S. 197]. Weiterbildungsmaßnahmen erfordern ein vorausgeplantes, organisiertes Lernen. Im engeren Sinne umfasst die betriebliche Weiterbildung Lehrveranstaltungen wie beispielsweise Kurse, Seminare und Lehrgänge. Im weiteren Sinne umfasst sie zudem selbstgesteuertes Lernen, Informationsveranstaltungen und arbeitsplatznahe Formen der Qualifizierung [Sta-17, S. 7]. Aufgrund des derzeitigen demografischen Wandels in Deutschland, werden in den nächsten Jahren überdurchschnittlich viele hochqualifizierte Fachkräfte die Unternehmen verlassen und ihr Wissen mit sich nehmen. Wie eine effiziente Wissensweitergabe dieser Mitarbeiter an neue junge Kollegen erfolgen soll, ist noch kaum geklärt [Ges-08]. Die Bevölkerung in Deutschland wird bis 2060 um 7 bis 13 Millionen Menschen abnehmen und zudem auch beträchtlich altern. Von 1990 bis 2015 stieg ihr Durchschnittsalter bereits von 39 auf 45 Jahre und wird voraussichtlich bis 2060 um weitere 5 bis 7 Jahre ansteigen [Pöt-15]. Dies hat Folgen nach [Ges-08, S. 15]:

1. Anstieg der Wahrscheinlichkeit regionaler und qualifikatorischer Ungleichgewichte zwischen Angebot und Nachfrage.
2. Einschränkung des Rekrutierungsspielraums der Unternehmen im Segment der jüngeren Altersgruppen.
3. Deutliche Alterung der Belegschaften, mit steigendem Anteil der über 50-Jährigen.

Trotz steigenden Renteneintrittsalters werden jährlich mehr Menschen in den Ruhestand gehen. Das Halten und Hinzugewinnen hochqualifizierter Mitarbeiter stellt zukünftig jedoch nicht nur aufgrund des demografischen Wandels eine Herausforderung für Unternehmen dar. Alternative Erwerbsbiografien, vor allem bei jüngeren Mitarbeitern, welche häufig den Arbeitgeber wechseln, sowie veränderte Wertesysteme der Arbeitnehmer, führen zu einer höheren Fluktuation der Mitarbeiter [Naw-13]. Beim Hinzugewinnen hochqualifizierter Mitarbeiter treffen junge Studierende und Auszubildende, welche den Umgang mit digitalen Medien und Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) gewohnt sind, oft auf Unternehmen, welche zwar technisch anspruchsvolle Produkte herstellen, jedoch in Kommunikation und Lernkultur oft auf veraltete Systeme setzen. Dies macht viele Arbeitgeber für die jungen Berufsanfänger unattraktiv. Hierbei sind mehr als 80 % der Innovationen in den Anwendungsfeldern Automobil, Medizintechnik und Logistik, welche vor allem in Deutschland stark vertreten sind, IKT-getrieben. Die Kommunikation gehört deshalb auch in der Hightech-Strategie 2020 der Bundesregierung zu einem der fünf übergeordneten gesellschaftlichen Bedarfssfelder und die IKT zu den maßgeblichen Schlüsseltechnologien [Sch-11, S. V].

Besonders im Sondermaschinenbau haben Mitarbeiter ein enormes Fachwissen, welches sich anders als in der Massen- und Serienfertigung nicht nur auf ein Produkt oder einzelne Produktvarianten bezieht, sondern auch produktübergreifend bestimmte Verfahren und Vorgehensweisen beinhaltet. Lebenslanges Lernen dieser Mitarbeiter ist erforderlich, damit Firmen bei steigender Konkurrenz und kürzeren Produktionszyklen wettbewerbsfähig bleiben können. Um die Lern- und Lehrproduktivität zu erhöhen, sind kürzere Vermittlungszeiten oder die Vermittlung von mehr Inhalten bei konstanter Zeit erforderlich. Zudem ist eine gleichbleibende oder steigende Qualität der vermittelten Inhalte erforderlich. Das Wissen der erfahrenen Mitarbeiter muss zunächst gesammelt, aufbereitet und anschließend für jüngere Mitarbeiter effizient zur Verfügung gestellt werden. Ein Ansatz zur Vermittlung von Lerninhalten liegt in der Nutzung digitaler Medien. Inhalte können mit ihrer Hilfe schnell und leicht verständlich aufbereitet und in standardisierter Form vielen Nutzern zeitgleich zur Verfügung gestellt werden. Neben der Wissensvermittlung für Tätigkeiten am PC werden digitale Medien auch verstärkt in der Produktion und Montage genutzt. Nach einer aktuellen Umfrage bei 40 global agierenden Unternehmen aus dem Jahr 2014 planen diese den Anteil textueller und zeichnungsbasierter Anleitungen bei der Montageassistenz um 14 % bis 17 % zu reduzieren und stattdessen dynamische Lösungen wie Animationen und Videos innerhalb der nächsten drei Jahre um 18 % bis 23 % stärker einzubinden. Die Unternehmen versprechen sich hierbei vor allem eine Reduzierung von Anlernzeiten, Suchzeiten und Montagefehlern sowie eine Verbesserung der Ergonomie [Wie-14b]. Zudem können Unternehmen dadurch attraktiver für Berufseinsteiger werden. Die Ergebnisse dieser Umfrage konnten in einer 2019 für die vorliegende Arbeit durchgeführten Umfrage bei 80 deutschen Unternehmen bestätigt werden, welche dem Anhang ab Seite 152 entnommen werden kann. Der Bedarf dynamischer Lösungen zur Wissensvermittlung besteht jedoch nicht nur bei deutschen Unternehmen. Es existieren Perspektiven für erste Wertschöpfungsansätze dieser dynamischen Lösungen in sogenannten *Emerging Countries*, welche in ihrem industriellen Entwicklungsprozess vor der Herausforderung stehen der Bevölkerung effizient das benötigte Wissen und die nötigen Fertigkeiten zu vermitteln, um nachhaltig zu wachsen. Diese unter globalen Gesichtspunkten chancenreichen Ansätze werden jedoch in der vorliegenden Arbeit nicht näher adressiert.

Montagemitarbeiter im Sondermaschinenbau müssen Konstruktionszeichnungen interpretieren, Produkte in einer bestimmten Reihenfolge montieren, Anpassarbeiten am Produkt vornehmen und Lösungen für unvorhergesehene Produktabweichungen finden können. Daher liegt eine sehr hohe Arbeitsweisenstreuung zwischen den einzelnen Mitarbeitern vor [Bok-06, S. 516]. Bei Montagemitarbeitern in Massen- und Serienproduktion existiert eine deutlich geringere Arbeitsweisenstreuung. Sie erhalten detailliertere Tätigkeitsanweisungen für Vorgänge mit hoher Wiederholhäufigkeit [Bok-06, S. 513]. Weitere Herausforderungen ergeben sich für Monteure, welche Montageservicetätigkeiten bei Kunden durchführen. Sie benötigen intensive Produkt- und Montagetrainings, welche sowohl das Fachwissen als auch die Montagefertigkeiten für eine Vielzahl der produzierten Sondermaschinen umfassen. Oft finden mehrtägige Trainings in den produzierenden Betrieben statt, für welche die Servicemonteure ihre Arbeit unterbrechen müssen. Die Trainings werden meist von einem Trainer geleitet. Selbständiges Lernen wie in der Ausbildung findet aufgrund des höheren Zeitbedarfs kaum statt. Aufgrund des bereits angeführten Fachkräftemangels wird es jedoch immer schwieriger, erfahrene Fachkräfte für diese Traineraufgaben zu rekrutieren. Sie benötigen neben den erforderlichen Fachkenntnis-

sen und Fertigkeiten auch die nötigen didaktischen Kompetenzen und Methoden, welche es ermöglichen ihr Fachwissen effektiv und effizient zu vermitteln. Hierzu stehen den Trainern unterschiedliche didaktische Konzepte und Methoden sowie Trainingswerkzeuge zur Verfügung, welche ihre Arbeit erleichtern sollen. Gängige Werkzeuge sind papierbasierte Anleitungen oder Videos, da diese oft schnell erstellt werden können und einen Großteil der benötigten Informationen bereitstellen. Sie haben jedoch viele Defizite. Print-Anleitungen sind oft schwer zu interpretieren, da sie meist aus der Perspektive einer Person mit anderem Fachwissen als dem eigenen geschrieben wurden. Videos sind wenig oder gar nicht interaktiv und erlauben es lediglich eine Montage aus nur aus einem vorgegebenen Kamera-Blickwinkel zu verfolgen. Oft werden wichtige Montagetätigkeiten jedoch von bereits montierten Bauteilen oder den Händen des Werkers verdeckt. Ein geringer Erstellungs- und Änderungsaufwand dieser Anleitungsarten resultiert daher in einem hohen Verständnis-Aufwand und dem Risiko der Fehlinterpretation wie aus Abbildung 1.1 deutlich wird. Zudem steigt mit dem Anleitungsumfang der Übersetzungsaufwand. Viele Unternehmen agieren global und dementsprechend sind ihre Servicemonteure auch kulturell und sprachlich international geprägt. Daher wird in gemeinsamen Schulungen und Trainings oft die englische Sprache zur Verständigung genutzt. Gute Englischkenntnisse werden von den meisten Unternehmen vorausgesetzt, sind aber dennoch selten im benötigten Umfang bei allen Mitarbeitern vorhanden. Hierdurch ergibt sich ein hohes Potenzial zur Nutzung sprachreduzierter grafischer Inhalte. Hinzu kommt, dass für haptische Montagetätigkeiten zunächst eine nicht-haptische Anleitung interpretiert werden muss. Es handelt sich meist um eine Übertragung einer visuellen, zweidimensionalen Darstellung in ein dreidimensionales Handeln.

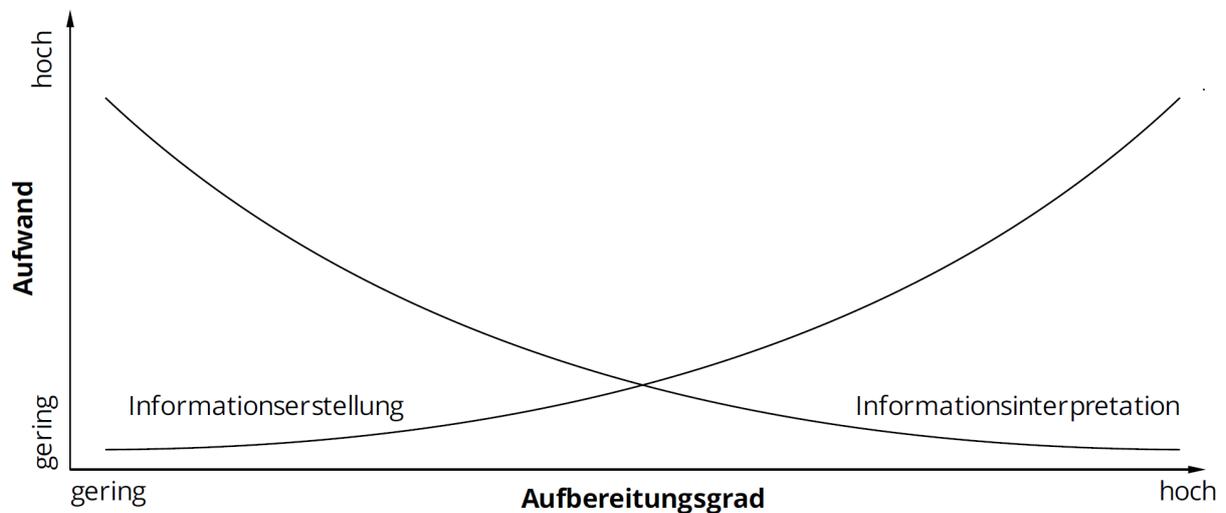


Abbildung 1.1: Aufwände für Informationsinterpretation und Informationserstellung nach [Hal-18]

Bei Massen- und Serienfertigung besteht ein gutes Verhältnis von Erstellungskosten für Trainingsunterlagen zu produzierter Stückzahl. Je höher die Stückzahl eines Produktes ist, welches mithilfe dieser Unterlagen montiert wird, umso geringer sind die Erstellungskosten der Anleitung pro Stück. Im Sondermaschinenbau stellt die Wissens- und Fertigkeitsvermittlung jedoch eine besondere Herausforderung dar. Jedes Produkt wird individuell auf Kundenwunsch gefertigt. Die Losgröße ist somit sehr klein und oft auch gleich eins. Damit werden die Erstellungskosten von Trainingsunterlagen auch nur von diesem einen Stück getragen. Zudem ist der Präzisionsgrad der Montagevorgänge im Sondermaschinenbau, vor allem bei komplizierten und hochpreisigen Sondermaschinen, oft sehr hoch. Digitale Schulungs-

und Trainingswerkzeuge werden daher vor allem in der Massen- und Serienproduktion eingesetzt. Ihre Erstellungskosten sind meist hoch, die Vorteile gegenüber analogen Schulungs- und Trainingswerkzeugen rechtfertigen diese Kosten jedoch. Da ein Schulungs- oder Trainingswerkzeug für mehrere tausend produzierte Einheiten genutzt wird, sind die Kosten pro Einheit relativ gering. Für Anwendungen im Sondermaschinenbau waren digitale Schulungs- und Trainingswerkzeuge bisher meist in der Erstellung zu teuer, um sinnvoll genutzt werden zu können.

1.1 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erhöhung der Lern- und Lehrproduktivität durch die Entwicklung und Nutzung lernerzentrierter digitaler Lernzeuge zur Montagetrainingsunterstützung am Beispiel des Sondermaschinenbaus. Lernzeuge sind Werkzeuge, die dem Benutzer ihre Funktionalität automatisch vermitteln. Durch sie können Nutzer mit unterschiedlichen Qualifikationsniveaus und Sprachkenntnissen intuitiv und selbstständig den Umgang mit neuartigen Anlagen und Prozessen erlernen. Die vorliegende Arbeit umfasst sowohl die Ausarbeitung von Vorgaben zur Entwicklung neuer Lernzeuge als auch die Erarbeitung einer didaktischen Methode für ihre Anwendung. Ein besonderer Schwerpunkt besteht darin, den Anwender selbst bestimmen zu lassen, welche Lerninhalte wie angezeigt werden sollen, um den zu lernenden Montagevorgang durchführen zu können. Die nach diesem Konzept entwickelten Lernzeuge sollen prinzipiell ohne Trainer verständlich und nutzbar sein, dessen Mitwirkung in der Wissensvermittlung jedoch nicht ausschließen. Die Lernzeuge sollen Teilnehmern von Montagetrainings ermöglichen, Montagevorgänge individuell an ihre Bedürfnisse angepasst zu erlernen. Ziel ist das Erlangen eines grundlegenden Verständnisses der durchzuführenden Montagevorgänge und allgemeiner Produktkenntnisse. Hierbei soll die Lern- und Lehrproduktivität erhöht und die benötigte Anlernzeit gegenüber konventionellen Methoden wie der Vier-Stufen- oder Leittextmethode reduziert werden. Durch Verkürzung der Anlernzeit sowie eine Umverteilung der Aufgaben von Lehrendem, Lernendem und Lernzeug sollen Montagetrainer während der Trainings zudem entlastet werden und Vermittlungsaufgaben auf das Lernzeug übertragen können.

Fehlhandlungen in der Produktmontage können zu Bauteilschäden oder Verletzungen führen. Bauteilschäden können vor allem bei einzigartigen Bauteilen hohe Kosten verursachen. Wenn die zu entwickelnden Lernzeuge Teilaufgaben eines Trainers übernehmen sollen, müssen sie die Handlungen des Lerners überwachen und ihn auf seine Fehler hinweisen oder die Entstehung von Fehlern gänzlich vermeiden.

Trainingsunterlagen wie Textanleitungen, Bauteilzeichnungen oder Videos haben meist nur geringe Interaktions- oder Individualisierungsmöglichkeiten. Ohne physisches Montageobjekt fällt es oft schwer, mithilfe dieser Unterlagen Inhalte nach einem Training zu wiederholen und zu vertiefen. Deshalb sollen die zu entwickelnden Lernzeuge den Lernern ermöglichen, mithilfe interaktiver Visualisierungstechnologien wie Virtual Reality oder Animationen, die im Training erlernten Montagevorgänge auch ohne physisches, dafür mit einem virtuellen Montageobjekt, individuell zu wiederholen und zu üben.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Dissertation gliedert sich in acht Kapitel, deren Inhalt im Folgenden kurz erläutert wird. In Tabelle 1.1 ist der Aufbau der Arbeit nach Zielsetzung der einzelnen Kapitel dargestellt. Nach einer einleitenden Darstellung der Thematik in *Kapitel 1* werden in *Kapitel 2* bestehende Produktionsformen voneinander abgegrenzt und das in der vorliegenden Arbeit näher betrachtete Produktspektrum wird umrissen. Lernziele von Montagetrainings für Servicemonteure werden vorgestellt. In *Kapitel 3* werden anschließend mit dem Lernen verbundene Theorien und Methoden vorgestellt. In *Kapitel 4* werden Visualisierungstechnologien für Trainingsunterlagen vorgestellt und miteinander verglichen. In *Kapitel 5* werden Defizite bestehender Lernmethoden für Montagetrainings erläutert und Potenziale neuer Visualisierungstechnologien und Lernkonzepte vorgestellt. In *Kapitel 6* wird auf Grundlage bestehender Lernmethoden eine neue Methode zur Erstellung und zum Einsatz von Lernzeugen innerhalb lernerzentrierter psychomotorischer Montagetrainings erarbeitet. In *Kapitel 7* werden am Beispiel eines Sondermaschinenbauunternehmens drei Lernzeuge entwickelt. Diese werden zunächst mit Studierenden getestet und anschließend für die Anwendung im Sondermaschinenbau weiterentwickelt und implementiert. Abschließend werden die Ergebnisse in *Kapitel 8* zusammengefasst und ein Ausblick über zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten gegeben.

Tabelle 1.1: Aufbau der Arbeit

Einleitung	Kapitel 1: Einleitung
Zielsuche	Kapitel 2: Anwendungsfeld - Abgrenzung der Produktionsformen - Montagetraining für Servicemonteure
	Kapitel 3: Didaktik - Analyse bestehender Lerntheorien und -methoden sowie ihrer Defizite
Lösungssuche	Kapitel 4: Visualisierungstechnologien für Trainingsunterlagen - Analyse bestehender Visualisierungsmethoden - Abschätzung der Potenziale und Einsatzgebiete
	Kapitel 5: Handlungsbedarf - Bewertung bestehender Lernmethoden - Adressierung der Potentiale neuer Visualisierungstechnologien und Lernkonzepte
	Kapitel 6: Konzept - Anforderungsdefinition an die zu entwickelnde Lernmethode - Entwicklung einer Lernmethode für lernerzentrierte psychomotorische Trainingswerkzeuge - Analyse der Rolle des Trainers und Lerner in lernerzentrierten Trainings
Bewertung	Kapitel 7: Implementierung und Validierung - Entwicklung von drei Lernzeug-Prototypen - Implementierung der Prototypen in einem Sondermaschinenbauunternehmen - Lernerfolgsmessung
Auseinandersetzung	Kapitel 8: Zusammenfassung und Ausblick

2 Anwendung

Der deutsche Maschinenbau bildet mit über 40 % Marktanteil am europäischen Umsatz von Maschinenverkäufen und 11 % der weltweiten Maschinenproduktion einen wichtigen Faktor für Deutschlands Wirtschaftsstärke [McK-14]. Er ist als weltweit drittgrößter Produzent von Maschinen und Fabriken einer der bedeutendsten europäischen Wirtschaftsfaktoren [Pös-16]. Innerhalb der Maschinenbau-Branche ermöglichen umgesetzte Produktentwicklungsprojekte einen wichtigen Beitrag zum wirtschaftlichen Erfolg von Unternehmen. Weisen Maschinenbauunternehmen eine hohen Umsatzrendite auf, so zeigen sie auch deutlich höhere Umsatzanteile mit Marktneuheiten. Der Innovationserfolg bestimmt hierbei maßgeblich den wirtschaftlichen Erfolg im Maschinenbau [Kin-07, S. 572]. Zudem steigt die Nachfrage nach kundenspezifischen Produkten und Innovationen, die vor allem im Sondermaschinenbau in der Auftragsfertigung, teilweise in einer sogenannten Unikat- oder *One-Of-A-Kind*-Produktion, entwickelt und hergestellt werden. Dies werteten auch 74 % der befragten deutschen Unternehmen als neuen Trend, welcher sich nach der Meinung von 70 % der Unternehmen weiter fortsetzen und verstärken wird [McK-14]. Diese steigende Nachfrage sowie die Herausforderungen alternder Bevölkerung, innovativer Wettbewerber und zunehmender Digitalisierung wirken sich auch auf die industrielle Montage innerhalb der Unternehmen aus [Lot-12]. Mitarbeiterwissen zählt hierbei mittlerweile zu einem der wichtigsten Wettbewerbsfaktoren [Int-03]. Zudem hängt die Qualität der durchgeführten Montagevorgänge stark von den Kompetenzen und dem Wissen der Monteure ab. Zum intellektuellen Kapital eines Unternehmens gehört neben Struktur- und Beziehungskapital auch das Humankapital. Dieses bezeichnet die personengebundenen Wissensbestandteile in den Köpfen der Mitarbeiter [Jae-04, S. 1]. Um dieses Humankapital, welches oft über 50 % des Unternehmenskapitals ausmacht [Fra-15, S. 2], im Unternehmen zu halten und weiterzuentwickeln, müssen Unternehmen geeignete standardisierte und zugleich individualisierbare Schulungs- und Trainingskonzepte entwickeln und nutzen. Im Folgenden wird zunächst auf die Abgrenzung existierender Produktionsformen eingegangen, um anschließend die Besonderheiten des in dieser Arbeit betrachteten Produktspektrums herauszustellen. Abschließend werden die Alleinstellungsmerkmale in der Produktmontage sowie die mit ihr verbunden Herausforderungen im Training von Servicemonteuren dargestellt.

2.1 Produktionsformen

Unternehmen sind selten vollständig dem Sondermaschinenbau oder der Serienfertigung zuzuordnen wie es theoretisch nach Tabelle 2.1 möglich wäre. Der Übergang ist oft fließend, da viele Serienhersteller auch Sonderanfertigungen nach Kundenwunsch anbieten und Sondermaschinenhersteller oft versuchen, gewisse Produktstandards zu realisieren, um Vorteile der günstigeren Serienproduktion nutzen zu können. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sind daher grundsätzlich auf unterschiedliche Unternehmen der Fertigungsindustrie anwendbar. Dennoch werden im Folgenden Anwendungsschwerpunkte gesetzt, um die Aussagen nicht zu allgemeingültig und damit beliebig werden zu lassen.

Tabelle 2.1: Vergleich von Sondermaschinenbau und Serienfertigung nach [Bok-06, Sch-10a, Pös-16, Men-18a]

Kriterium	Sondermaschinenbau	Serienproduktion
produzierte Einheiten pro Jahr	wenige	viele
Anzahl an Produktvarianten	hoch oder unendlich	gering bis mittel
Erzeugnisspektrum	nach Kundenspezifikation	Standerzeugnisse
Produktverfügbarkeit	auf Anfrage	auf Lager
Produktpreis	hoch	gering bis mittel
Produktionsprozess	individuell bis gering standardisiert	stark repetitiv und standardisiert
Produktionsflexibilität	hoch	gering
Automatisierungsgrad	schwache Verlinkung von Produktionsstandorten, Betriebsmitteln und Materialflüssen	mittlere bis starke Verlinkung von Produktionsstandorten, Betriebsmitteln und Materialflüssen
Firmengröße	klein oder mittel	mittel oder groß
Kundensitz	global	global
Lastenheft	Kundenanforderungen, technische Auftragsklärung	Marktanforderungen
Kundeneinfluss auf die Fertigung	sehr hoch	gering bis mittel
Produktwertkurve	ca. die Hälfte der Produktentstehungskosten sind Entwicklungskosten	Entwicklungskosten werden auf alle produzierten Maschinen umgelegt, daher sehr kostenbewusst
Medien für die Wissensweitergabe	kaum vorhanden, meist nur schriftlich	bebilderte Montageanleitungen und Videos
Arbeitsweise	selbständig	nach Arbeitsanweisung
Arbeitsweisenstreuung	hoch	mittel

Der fließende Übergang zwischen Sondermaschinenbau und Serienfertigung kann auch in einer Erzeugnisstruktur wie in Abbildung 2.1 nach [ISO10209] verdeutlicht werden. Bei hoher Bauteilvariantenbildung bereits in einer der oberen Stufen 0 oder 1, ist das Produkt meist eher dem Sondermaschinenbau zuzuordnen. Existieren die Variantenbildungen nur vereinzelt in den tieferen Stufen, so ist das Produkt eher der Serienfertigung zuzuordnen.

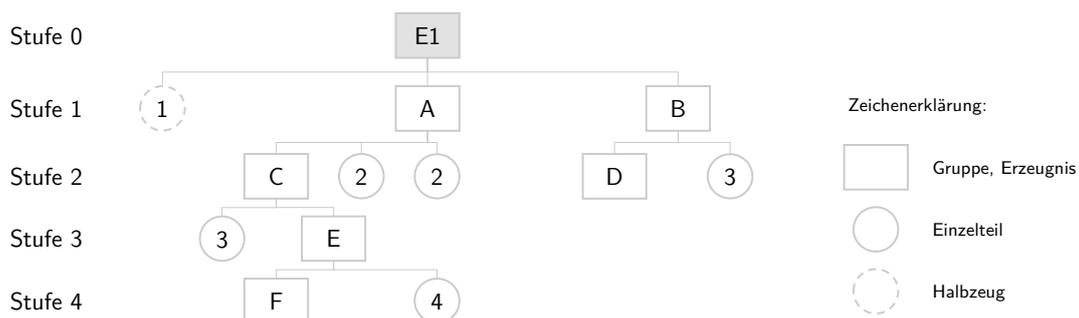


Abbildung 2.1: Beispiel einer Erzeugnisstruktur nach [ISO10209]

2.2 Produktspektrum

Nach dem von [Sno-07] entwickelten Cynefin-Modell existieren die drei folgenden Arten von Systemen: geordnet, komplex und chaotisch. Das Cynefin Modell bildet ein Werkzeug für Ihre Klassifizie-

rung. Es enthält fünf Domänen: einfach, kompliziert, komplex, chaotisch und ungeordnet. Die beiden Domänen *einfach* und *kompliziert* werden hierbei den geordneten Systemen zugeordnet. Nach Abbildung 2.2 verläuft die Einsicht in ein komplexes System im Uhrzeigersinn. Durch Probieren und Experimentieren wird versucht, Regeln und Grundsätze im komplexen System zu identifizieren und somit einige Bereiche in ein kompliziertes System zu überführen. Im komplizierten System werden Experten benötigt, um Situationen zu analysieren und basierend auf ihrer Expertise zu reagieren. Das Erkennen und Analysieren von Zusammenhängen und Regeln in komplizierten Systemen kann hierbei bspw. durch den IKT-gestützten Einsatz von Lernzeugen erleichtert werden. Die Nutzung einer geeigneten Visualisierungstechnologie kann den Erkenntnis- und Analyseprozess zusätzlich beschleunigen. Wenn die Analyseergebnisse in einfache Regeln umgewandelt werden können, besteht die Möglichkeit Teilbereiche des komplizierten Systems in ein einfaches System zu überführen. Wird ein einfaches Modell jedoch zu stark vereinfacht, entstehen falsche Schlussfolgerungen, welche unerwartete Ereignisse und chaotische Verhältnisse erzeugen können [Ham-14b].

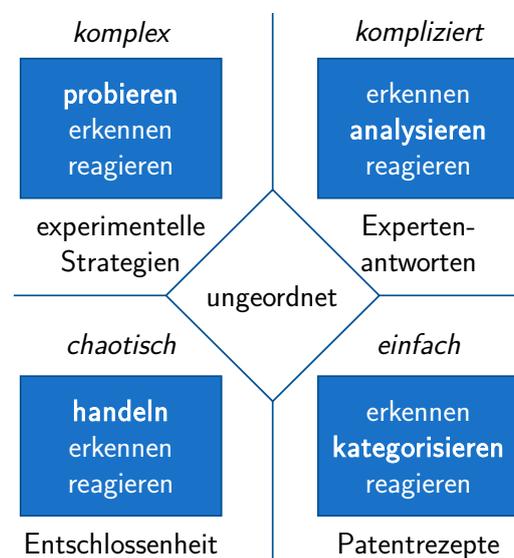


Abbildung 2.2: Cynefin Modell nach [Sno-07]

Die Sondermaschinenmontage ist nicht als *einfach*, sondern als *kompliziert* zu betrachten, da Probleme hier nicht immer geordnet sind und keinen allgemein bekannten Ursachen und deren Wirkungen unterliegen. Es ergeben sich durch die unterschiedlichen Akteure, welche bspw. an Design, Fertigung, Montage und Nutzung der Maschinen mitwirken, neue Ursachen, welche zu Anpassarbeiten in der Montage oder Fehlern im Betrieb führen können. Die Sondermaschinenmontage enthält viele Elemente und Beziehungen zwischen diesen, welche nicht sofort ersichtlich sind. Es werden Experten benötigt, um diese Beziehungen zu analysieren und zu verstehen. Sie ist als *kompliziert* und nicht als *komplex* zu betrachten, da bei komplexen Systemen Ursache und Wirkung nur teilweise bekannt sind. Komplexe Systeme unterliegen Zeitverzögerungen, Nichtlinearitäten und Rückkopplungen und sind meist nicht reversibel. Eine Sondermaschine kann mehrfach montiert und demontiert werden, ihre Montage ist daher reversibel und somit lediglich kompliziert. Die Montage in der Serienfertigung kann hingegen oft als *einfach* eingestuft werden. Es existieren allgemein nachvollziehbare Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge [Ham-14a, S. 9], bei welchen für bekannte Probleme nach einer Kategorisierung standardisierte Problemlösungen angewandt werden können.

Bei einer Unterteilung der Produktionsformen in Massen-, Serien- und Einzelfertigung/Sondermaschinenbau, bildet der Sondermaschinenbau häufig die Produktionsform, mit den kompliziertesten Montagezusammenhängen. Die in der vorliegenden Arbeit entwickelten lernerzentrierten Werkzeuge sollen Lerner dabei unterstützen, die in der Sondermaschinenmontage gegebenen komplizierten Zusammenhänge einfacher zu erkennen und zu analysieren. Erfüllen die entwickelten Lernzeuge diese Anforderung, könnten sie prinzipiell auch bei einfacheren Montagezusammenhängen einsetzbar sein, wie sie häufig in der Serien- und Massenfertigung auftreten. Die Übertragbarkeit der Entwicklung wird in der vorliegenden Arbeit theoretisch analysiert, jedoch nicht praktisch validiert. Im Folgenden wird das in der späteren Implementierung adressierte Produktspektrum weiter eingegrenzt.

In Abbildung 2.3 sind die Organisationsformen der Montage dargestellt, welche nach [Sel-07] vorrangig durch die Bewegung des Montageobjekts, den Ort der Montage, die zeitliche Bindung des Materialflusses und die Bewegungsart des Fördermittels unterschieden werden können.

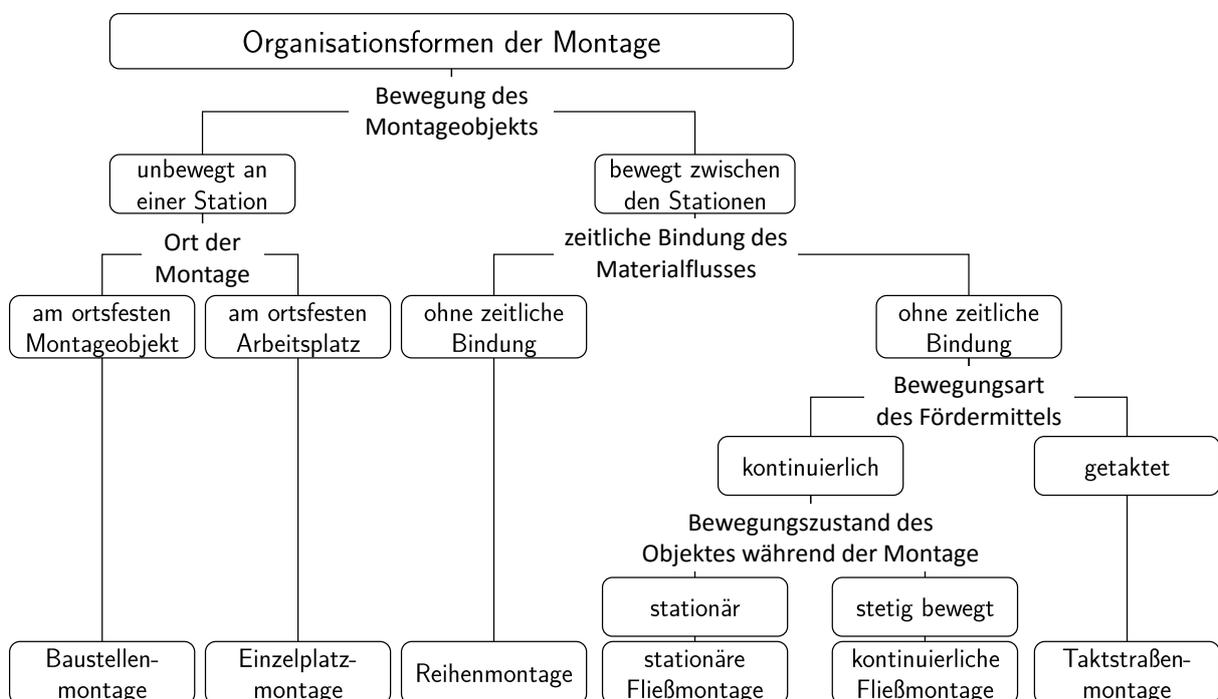


Abbildung 2.3: Organisationsformen der Montage aus [Sel-07] nach [Sel-83, Spu-86]

Diese Organisationsformen der Montage können auch als Montageprinzipien aufgefasst werden. Nach [Eve-89, Lot-94] kann die manuelle Montage von Großgeräten in ihrer Montagestruktur vorrangig durch Produktgewicht und -abmessungen sowie die Produktionsrate bestimmt werden. Den Produktbeispielen in Tabelle 2.2 wurden daher Angaben über Gewicht, Abmessung, geplante Stückleistung, geeignete Montageprinzipien sowie Bewegungsgrößen für Produkt und Personal zugeordnet. Hierdurch kann die Organisationsform der Baustellenmontage von der Fließmontage zusätzlich zur Bewegung des Montageobjekts aus Abbildung 2.3 noch durch die Bewegung des Personals abgegrenzt werden. Die geplante Stückleistung wirkt sich dabei wesentlich auf die Auswahl des Montagesystems aus [Eve-89, Lot-94]. Das Montageobjekt und das Montagepersonal bleiben bei der reinen *Baustellenmontage* stationär [Lot-12, S.147]. Bei der auf der Baustellenmontage basierenden *Gruppenmontage* bleibt das Montageobjekt stationär angeordnet, das Montagepersonal wechselt jedoch nach vorgegebenem Ablaufplan von Montageobjekt zu Montageobjekt [Sch-77]. Das Mon-

tageobjekt wird bei der *Fließmontage* zwischen den einzelnen Montagestationen bewegt. Das Montagepersonal bleibt hingegen stationär am Arbeitsplatz. Im Gegensatz dazu bewegt sich der Monteur beim *One-Piece-Flow-Prinzip* zusammen mit dem einzelnen Montageobjekt an Materialbereitstellungsplätzen vorbei und komplettiert dabei das Produkt [Lot-12, S. 147].

Tabelle 2.2: Beispielhafte Montageprinzipien für Großgeräte, erweitert nach [Lot-12]

Produktbeispiel	Produkt- und Produktionsparameter			Montageprinzip	Bewegungsgröße	
	Gewicht [kg]	Grundfläche [cm x cm]	Leistung [Stück/Jahr]		Produkt	Personal
Getriebekompressor	5.000 - 180.000	50 x 50 - 400 x 400	50	Baustellenmontage	stationär	stationär
Werkzeugmaschinen	1.000	200 x 200	60	Baustellenmontage/ Gruppenmontage	stationär	stationär
Großbaugruppen	100 - 300	50 x 60	180	Baugruppenmontage/ Gruppenmontage	stationär	stationär
Ackerschlepper	1.500	160 x 250	20.000	Fließmontage	bewegt	stationär
LKW-Hinterachsen	800	50 x 180	60.000	Fließmontage	bewegt	stationär
Röntgengeräte	300	60 x 220	1.200	Baustellenmontage/ One-Piece-Flow	stationär	stationär
PKW-Sitze	20 - 30	52 x 65	40.000	Fließmontage	bewegt	stationär
Geschirrspüler	250	58 x 60	75.000	Fließmontage	bewegt	stationär

In der vorliegenden Arbeit werden kapitalintensive, große und komplizierte Sondermaschinen betrachtet, welche unbewegt an einer Station in Baustellenmontage gefertigt werden. Abbildung 2.3 verdeutlicht diese Einteilung. Sowohl das Produkt als auch das Personal können nach Tabelle 2.2 als stationär angesehen werden. Diese Sondermaschinen werden ausschließlich auf Kundenwunsch und nach Kundenanforderungen entworfen, konstruiert und gefertigt. Zudem existiert ein hoher Bereitstellungs-, Wartungs- und Instandsetzungsaufwand [Eic-11, Hof-12]. Beispiele hierfür sind Getriebekompressoren, Werkzeug- und Druckmaschinen, Flugzeugtriebwerke, Industriegasturbinen sowie Windenergieanlagen. Die Baustellenmontage dieser Produkte erfordert aufgrund der Bereitstellung vieler Einzelteile oder vormontierter Baugruppen sowie der erforderlichen Zugänglichkeit von allen Seiten zum Montageobjekt einen hohen Platzbedarf. Die eigentliche Montagestelle und die Materialbereitstellung sind meist räumlich voneinander getrennt und der Transport der Bauteile erfordert oft den Einsatz von Kränen oder anderen Förderfahrzeugen [Aug-77]. Dies wirkt sich negativ auf die Handhabungszeiten der Teile oder Werkzeuge aus. Zudem können an weiteren Nebenarbeitsstellen vorbereitende Tätigkeiten wie z. B. Entgraten, Säubern und Fetten erfolgen sowie Vormontagen von größeren Unterbaugruppen stattfinden [Lot-12, S. 148].

2.3 Montage

„An der Schnittstelle zu Entwicklung und Vertrieb wird die Montage als letzte Stufe des Herstellungsprozesses zu einem logistischen Orientierungspunkt des Fabrikbetriebs“ [Sel-07, S. 90]. Sie wurde daher als zentraler Trainingsinhalt in der vorliegenden Dissertation gewählt. Die Montage bildet nach [VDI2860] eine Teilfunktion des Fertigen. Ihre Aufgabe besteht darin, aus Teilen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten an unterschiedlichen Orten mit unterschiedlichen Fertigungsverfahren hergestellt wurden, ein Produkt höherer Komplexität mit vorgegebener Funktion in einer be-

stimmten Zeit zusammenzubauen. Montage kann nach [VDI2815] auch als Zusammenbau von Teilen oder Gruppen zu Erzeugnissen oder zu Gruppen höherer Erzeugnisebenen in der Fertigung definiert werden. Um einen Montagevorgang trainieren zu können, müssen zunächst seine einzelnen Bestandteile analysiert werden. Daher werden im Folgenden die einzelnen Vorgänge innerhalb von Montagetätigkeiten detailliert betrachtet. Ein Montagevorgang wird aus der Kombination von Primärmontage- und Sekundärmontagefunktionen gebildet. Die wertschöpfenden Primärmontagefunktionen umfassen hierbei die Fügevorgänge und die nicht-wertschöpfenden Sekundärmontagefunktionen bilden Handhabungs-, Justier- und Kontrollfunktionen [VDI2860, Sel-07]. Fügen als Kernfunktion der Montage ist ein Fertigungsverfahren nach [DIN8593]. Nach [Nof-97, Boo-10, Rad-15] bestehen manuelle Montagevorgänge aus den Bestandteilen: Identifizieren, Handhaben, Ausrichten, Fügen, Anpassen und Überprüfen, welche im englischsprachigen Original als *identification, handling, alignment, joining, adjustment, and checking* bezeichnet werden. Somit wird dem Handhaben der [VDI2860] der zusätzliche Schritt der Identifikation vorausgesetzt. Die Montagebestandteile werden nach [Nof-97, Boo-10, Rad-15, DIN8593] wie folgt interpretiert.

- Identifizieren: Der Monteur muss die zu montierenden Teile sowie die Werkzeuge identifizieren, die er für die Montage eines Teils benötigt. In der mechanischen Fertigung wird diese Aufgabe als unterstützende Maßnahme betrachtet, da sie nur indirekt zur Montage beiträgt.
- Handhaben: Diese Aufgabe umfasst alle manuellen Materialbewegungen, z. B. das Tragen eines Teils von einem Lager zu einer Werkbank.
- Ausrichten: Der Bediener richtet die zu fügende Oberfläche eines mechanischen Teils zur zu fügenden Oberfläche eines zweiten Teils aus.
- Fügen: Der Monteur stellt eine feste oder lösbare Verbindung zwischen zwei Teilen her.
- Anpassen: Der Monteur passt die Einstellung oder die Lage eines Teils oder einer Verbindung an, z. B. indem er das Drehmoment einer Mutter-Schrauben-Verbindung ändert.
- Überprüfen: Der Monteur beurteilt die Qualität einer Verbindung, Einstellung oder Ausrichtung.

Das aus der Montage entstehende Produkt wird durch Stücklisten sowie die geometrischen und technologischen Eigenschaften der zu montierenden Bauteile und Baugruppen beschrieben. Der Montageablauf wird technologisch durch die einzelnen Montageverrichtungen und ihre Abhängigkeiten bestimmt. Diese Abhängigkeiten können mithilfe von Vorranggraphen visualisiert werden. Die in Abbildung 2.4 visualisierten Vorranggraphen bilden somit eine netzplahnähnliche Darstellung von Teilverrichtungen der Montage und ihrer Reihenfolgebeziehung [Sel-07]. Sie können in der Serienproduktion genutzt werden, um durch eine Veränderung des Montageablaufs die Austaktung zu verbessern [Bul-95]. Somit können unterschiedliche Reihenfolgen von Montageverrichtungen anhand der Bauteilstruktur dargestellt werden.

Die Prozessqualität von Montagevorgängen wird in der Serienfertigung durch kontinuierliche Verbesserungsprozesse (KVP) erhöht. Aufgrund geringer Wiederholhäufigkeit der Montagevorgänge ist dies in der Sondermaschinenmontage nur bedingt realisierbar. [Hei-15] argumentiert, dass die der Montage vorgelagerten Bereiche die Abläufe daher, in Relation zu benötigter Zeit und entstehendem Aufwand, so präzise wie möglich planen müssen. Aufgrund der stärker limitierten Ressourcen, kann die Planung jedoch nicht den Detailgrad der Serienproduktion erreichen. Methoden wie bspw. das produk-

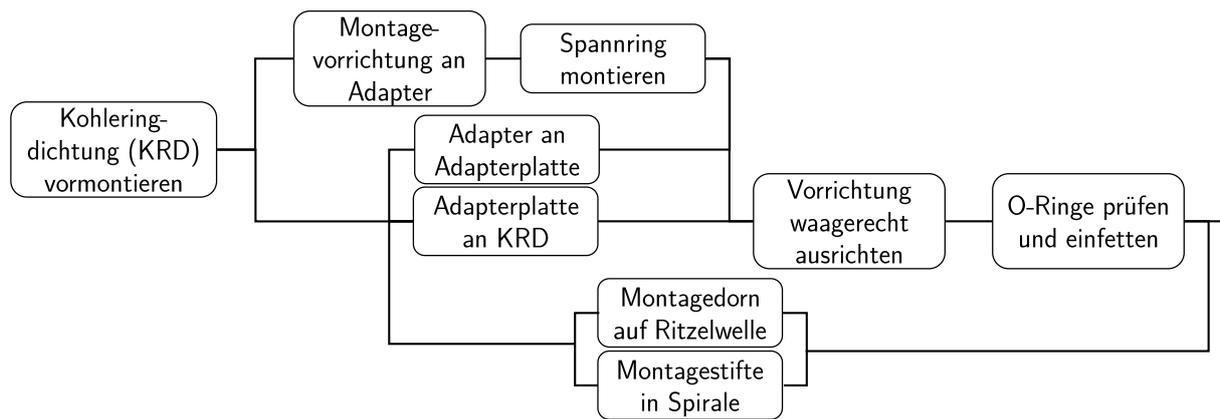


Abbildung 2.4: Beispiel für einen Vorranggraphen nach [Sel-07]

tionsgerechte Konstruieren nach [REF-15, S. 116], die einen Mehraufwand in den indirekten Bereichen in Kauf nehmen, um die direkten Bereiche zu entlasten, sind nur in begrenztem Umfang lohnenswert [Hal-18]. Die in der vorliegenden Arbeit behandelten lernerzentrierten Werkzeuge können trotzdem nicht nur für Abläufe des Sondermaschinenbaus, sondern auch für die präziser geplante Serienmontage nützlich sein. Die Auswirkungen von KVP auf die Anpassungshäufigkeit der Lernzeuge sind hierbei zu berücksichtigen. Sondermaschinenhersteller produzieren im Vergleich zur Serienproduzenten nur in begrenztem Umfang physische Prototypen, um Produkte oder Produktionsabläufe abzusichern [Tu-11]. Daher stehen den Monteuren abstraktere und detailärmere Informationen als in der Serienproduktion zur Verfügung. Mitarbeiter müssen eine höhere kognitive Leistung zum Interpretieren und Analysieren der Informationen aufbringen, während in der Serienfertigung bspw. auf Passung gefertigte, steckbare Teile die Arbeitsschritte Messen und Ausrichten verringern [Fel-14]. In der Sondermaschinenmontage wird oft nicht nach Arbeitsanweisung, sondern selbständig montiert, was eine Einstufung in eine höhere Entgeltgruppe nach Entgelttarifvertrag der IG Metall zur Folge hat [IG -15]. Es existieren meist nur allgemeine und kurz gehaltene schriftliche Montageanleitungen in Verbindung mit einer Bauteilzeichnung.

2.4 Training der Servicemonteure

Neben Auszubildenden und Werkmonteuren führen vor allem bei Sondermaschinenbauunternehmen auch Servicemonteure Montagearbeiten durch. Anders als die Auszubildenden verfügen Sie bereits über die erforderlichen theoretischen und praktischen Kenntnisse und Fertigkeiten, welche für die Sondermaschinenmontage benötigt werden. Im Gegensatz zu Werkmonteuren führen sie die Montagetätigkeiten jedoch nicht in der Erstmontage in der werkseigenen Produktion durch, sondern bei der Auslieferung sowie in Wartungs-, Instandhaltungs- und Servicefällen bei externen Kunden. Sondermaschinenbauunternehmen agieren oft international, um besser auf den teilweise stark schwankenden Auftragseingang reagieren zu können und eine annähernd gleichmäßige Auslastung der Fertigung zu realisieren. Servicemonteure benötigen gute Englischkenntnisse, um sich mit den internationalen Kunden, Lieferanten und Servicekollegen verständigen zu können. Der Aufgabenbereich von Servicemonteuren umfasst neben der Montage nach der Auslieferung neuer Maschinen und Anlagen auch die routinemäßige Serviceüberprüfungen bei Kunden sowie die Behebungen von Maschinenstörfällen. Hier-

bei werden neben Problemlösungsstrategien ebenfalls Montage- und Demontagekenntnisse benötigt. Schnelle und fehlerarme Montage und Demontage setzen effizientes Prozessvorgehen voraus [Fra-15, S. 2]. Da innovative und kundenspezifische Sondermaschinen aus einer hohen Anzahl an Komponenten bestehen [Sch-10b, S. 1], erfordern diese meist auch eine sehr komplizierte Montage mit Prüfvorgängen und Anpassarbeiten. Dementsprechend wichtig sind die individuelle Leistung und Kompetenz der Servicemonteure während der Montage und Demontage dieser Maschinen. Qualifizierte und motivierte Mitarbeiter sind Träger für Innovationen [McK-14, S. 23] und essentieller Bestandteil fehlerarmer und flexibler Produktionssysteme [Ada-08]. Durch wechselnde Marktanforderungen und Produktinnovationen stehen die Mitarbeiter im Sondermaschinenbau ständig neuen Lernanforderungen gegenüber und müssen sich innerhalb kurzer Zeit weitere Kompetenzen aneignen, um ausreichend für die Montage qualifiziert zu sein. Unterschiedliche Sprachkenntnisse und kulturelle Einflüsse in der Art wie Vorgänge erlernt werden, bilden zusammen mit teils stark differenzierten Vorkenntnissen über Montagevorgänge die größten Inhomogenitätsfaktoren für internationale Teilnehmer von Servicemonteurtrainings. Nach [Jes-13] hat die kulturelle Herkunft jedoch anders als die unterschiedlichen Vorkenntnisse keinen signifikanten Einfluss auf die Anlernzeit. Da sich im Sondermaschinenbau die Maschinentypen oft fundamental voneinander unterscheiden und Servicemonteure die Wartung mehrere Maschinentypen beherrschen müssen, existieren neben Grundlagentrainings für Servicemonteure auch Spezialtrainings für einzelne Maschinentypen, welche von einem erfahrenen Trainer geleitet werden. In der vorliegenden Arbeit wird der Lehrende daher häufig als Trainer bezeichnet. Bei diesen Spezialtrainings liegt das Hauptaugenmerk auf dem Erwerb benötigter kognitiver Kenntnisse und psychomotorischer Fertigkeiten für die Montage eines neuen Maschinentyps, sie werden in der vorliegenden Arbeit verstärkt thematisiert. Eine weitere Herausforderung bildet die bereits angesprochene kurze Trainingsdauer von wenigen Tagen bis zu ca. einer Woche. Montagetätigkeiten können in der kurzen Trainingszeit oft nicht ausreichend praktisch geübt werden, um alle wesentlichen Abläufe auch nach dem Training eigenständig ohne zusätzliche Hilfe durchführen zu können. Eine Wiederholung und Übung der Trainingsinhalte nach dem Training wären nötig. Da die Verfügbarkeit physischer Trainingsmaschinen nach dem Training jedoch nur begrenzt gegeben ist, erfordern anschließende Übungen immer eine zeit- und kostenintensive Anreise der Servicemonteure zum Trainingsort. Um diese zu vermeiden, werden Trainingsunterlagen benötigt, welche die Monteure nicht nur während, sondern auch nach einem Training informativ und interaktiv unterstützen und eine individuelle Wiederholung der im Training erlernten psychomotorischen Abläufe ermöglichen.

Der Sondermaschinenbau stellt, wie bereits erwähnt, eine Sonderform des Maschinenbaus dar. Das erforderliche Training der Montagemitarbeiter ist maßgeblich, um einen wirtschaftlichen Erfolg des Unternehmens zu sichern. Dennoch werden didaktische Aspekte von Montagetrainings der Sondermaschinenmontage in der wissenschaftlichen Literatur nur wenig thematisiert. Daher werden im Folgenden zunächst didaktische Grundlagen vorgestellt um anschließend die für Sondermaschinenmontage-trainings wichtigen Elemente identifizieren und analysieren zu können.

3 Didaktik

Die Verwendung einer geeigneten didaktischen Methode zum Erlernen von Montagetätigkeiten, welche einheitlich, leicht umsetzbar und für den Mitarbeiter verständlich ist, kann die Anlernzeit des Mitarbeiters für diese Tätigkeiten verkürzen und die nötige Prozessstabilität und Qualität im Unternehmen ermöglichen [Sen-15, S. 37]. Die Anlernzeit ist hierbei nach [Gre-01, Jes-13] vor allem abhängig von Lernmethode, Arbeitsaufgabe sowie Anzahl und Qualifikation der Arbeitspersonen. Nachdem im vorherigen Kapitel die Produktionsformen Serienfertigung und Sondermaschinenbau voneinander abgegrenzt und die Aufgaben und Besonderheiten von Servicemonteuren in Bezug auf Trainingsinhalte und Arbeitsaufgaben erörtert wurden, bilden die theoretischen Grundlagen der Bereiche Didaktik und Methodik den Kern des dritten Kapitels.

Die Didaktik ist die Theorie und Praxis von Lehr- und Lernprozessen. Nachdem die Analyse und Planung des Unterrichts in der Didaktik abgeschlossen sind, setzt die Methodik ein. Die den Lehrenden zur Verfügung stehende Vielzahl an Methoden ermöglicht es, den Unterricht abwechslungsreich und für alle Teilnehmenden verständlich zu gestalten [Hab-11, S. 1]. Die Didaktik umfasst im engeren Sinn lediglich die Ziele und Inhalt eines Lernprozesses, schließt jedoch im weiteren Sinn ebenfalls die Methodik ein, welche sich auf angewandte Methoden und Medien bezieht [Bon-99]. Im Folgenden werden zunächst einige didaktische Grundlagen und Ansätze vorgestellt. In Abschnitt 3.2 werden anschließend bestehende didaktische Lerntheorien aufgeführt und zueinander in Bezug gesetzt, um basierend auf ihrer Grundlage später eine neue Methode zum lernerzentrierten Training psychomotorischer Vorgänge entwickeln zu können. Hiernach werden in Abschnitt 3.3 etablierte und neue Lernmethoden und -konzepte dargestellt, welche eine weitere Grundlage für die zu entwickelnde Methode bilden. Abschließend wird das Konzept der Lernzeuge anhand praktischer Beispiele vorgestellt. Es wird untersucht, in welchen Anwendungsgebieten Lernzeuge eingesetzt werden und inwieweit bestehende Lernzeuge bereits die Lernzeugdefinition erfüllen, um später in Kapitel 6 eine didaktische Lernzeugmethode zur lernerzentrierten Vermittlung psychomotorischer Montagevorgänge sowie Leitlinien für die Lernzeugerstellung entwickeln zu können.

3.1 Wissen und Kompetenz

Für Lehren und Lernen sowie für das zu erlernende Wissen, existieren unterschiedliche Auffassungen und Theorien, welche stetig weiterentwickelt werden. Basierend auf Annahmen aus der pädagogischen Psychologie wurden *Objektivismus* und *Konstruktivismus* als zwei Extreme eines Kontinuums [Dub-09] also als gegensätzliche Grundorientierungen identifiziert. Sie werden im Folgenden nach [Rie-11] dargestellt.

In der älteren, *objektivistischen Sicht*, welche den Fokus auf das *Lehren* legt, lässt sich das existierende Wissen als geschlossenes System darstellen. Nach dieser Auffassung folgt aus einem guten Lehrprozess auch immer ein erfolgreicher Lernprozess [Dub-09, S. 24 f.]. Lernen ist hierbei ein „linearer, systematischer, deterministischer und rezeptiver Prozess, bei dem klar strukturierte, statische Lerninhalte von den Lehrenden möglichst gut vermittelt und präsentiert werden“ [Rie-11, S. 101]. Lehrende lei-

ten die Lernenden an und müssen das Lernergebnis kontrollieren.

In der neueren *konstruktivistischen* Sicht, welche den Fokus auf das *Lernen* legt, kann Wissen nur individuell generiert werden. Das Lehren wird hierbei als Unterstützung und Anregung der Selbstkonstruktion des Lernenden gesehen [Rei-06, S. 639 ff.]. Lernen ist hierbei ein „nicht-linearer, multi-dimensionaler und nicht-deterministischer Prozess, bei dem Lernende aktiv komplexe und dynamische Lerninhalte in ihre eigenen Wissens- und Handlungsstrukturen integrieren“ [Rie-11, S. 101]. Lehrende erfüllen nach konstruktivistischem Verständnis eher eine Gestaltungs- und Betreuungsfunktion und fungieren als Lernberater und Mitlernende.

Heute werden Lernprozesse stärker als selbst organisiert verstanden. Demzufolge besteht Lernen nicht im Aufnehmen und Akkumulieren vorstrukturierter Lerninhalte. Stattdessen lernen Menschen eher durch die Verknüpfung neuer Lerninhalte an vorheriges Wissen, durch die Herstellung eines Bezugs zu bekannten Zusammenhängen sowie durch die Verbindung neuen Wissens mit praktischen Fragestellungen. Lernprozesse müssen also so gestaltet werden, dass sich dem Lernenden der Sinn und Zusammenhang der Lerninhalte erschließt [Wie-14a, S. 214]. Zur Unterstützung kann IKT genutzt werden. Durch ihren Einsatz können traditionelle lineare Denk- und Lernkonzepte durch flexiblere, netzwerkartige Konzepte ersetzt werden, welche einer konstruktivistischen Lernauffassung entgegenkommen [Rie-13, S. 74]. Bekannte Lernprinzipien können bei entsprechender computerunterstützter Unterrichtsgestaltung [Rie-13] anders und oftmals besser umgesetzt werden als mit herkömmlichen Lern-, Lehr- und Unterrichtsmedien [Hro-09].

Für die Gestaltung von Lernprozessen können sogenannte Instructional Design Modelle genutzt werden. Durch ihre Anwendung werden vor Beginn des Lernprozesses die zu adressierende Zielgruppe definiert und der an sie zu vermittelnde Lerninhalt bestimmt. Des Weiteren wird die zu nutzende Lernmethode ausgewählt und es wird festgelegt, welche technischen Hilfsmittel genutzt werden sollen. Zusätzlich wird bei vielen Instructional Design Modellen die Implementierung sowie die Evaluierung durch die Nutzer betrachtet [Bra-75, Nie-08, Mor-11, Pal-17]. Dies wird beispielhaft beim ADDIE-Modell durch die einzelnen Ablaufstufen Analysis, Design, Development, Implementation and Evaluation deutlich.

Die Berufs- und Weiterbildungsforschung beschäftigt sich bevorzugt nicht mehr mit Qualifikationen, sondern mit Kompetenzen. Der Begriff der Qualifikation bezeichnet Wissen als formalen Ausdruck anerkannter beruflicher oder fachlicher Fähigkeiten von Arbeitnehmern. Der Begriff der Kompetenz ist umfassender. Er bezeichnet die Expertise eines Menschen als Ausdruck seiner Kenntnisse und Fähigkeiten, die in einem bestimmten Kontext beherrscht werden [Int-04, S. 5]. Abbildung 3.1 ermöglicht eine Übersicht über die Dimensionen der Handlungskompetenz nach [Wie-14a] und [Rot-71]. Die in Abbildung 3.1 erwähnten Begriffe des expliziten und impliziten Wissens werden im Folgenden nach einer allgemeinen Beschreibung und Einordnung des Wissensbegriffs auf Seite 17 erläutert. Fach- und Methodenkompetenz bilden zusammen mit Individual- und Sozialkompetenz die Berufskompetenz [Rie-13], für welche teilweise auch der Begriff der beruflichen Handlungskompetenz genutzt wird [Wie-14a]. Individualkompetenz wird auch als Personal- bzw. Selbstkompetenz [Wie-14a, Rot-71] oder als Humankompetenz [Deh-07] bezeichnet. Berufskompetenzen sind dabei kontextbezogene kognitive, affektive und psychomotorische Fertigkeiten zur Bewältigung komplexer beruflicher Anforderungen. Berufskompetenz ist somit als die Verknüpfung von Kompetenzen mit bestimmten Inhalten einer Domäne interpretierbar, bei der verfügbare Befähigungen genutzt wer-

den, um sich die Inhalte einer Domäne zu erschließen oder damit zu operieren [Bre-05]. Alle Felder der Berufskompetenz sind für die Erfüllung einer Arbeitsaufgabe wichtig. Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt jedoch auf der Vermittlung von Fach- und Methodenkompetenz. Die Fachkompetenz basiert auf einer allgemeinen kognitiven Leistungsfähigkeit des Individuums [Rot-71, Rie-13]. Methodenkompetenz, als Erweiterung der Fachkompetenz, begründet sich durch die Ausformung situativ erlernter und übergreifender Strategien und Vorgehensweisen [Bre-05, S. 25]. Für die Vermittlung von Fach- und Methodenkompetenzen eignet sich nach [Wie-14a, S. 216 ff.] vor allem das formalisierte Lernen, im Gegensatz zu teilformalisiertem und informellem Lernen, wie in Tabelle 3.1 beschrieben.

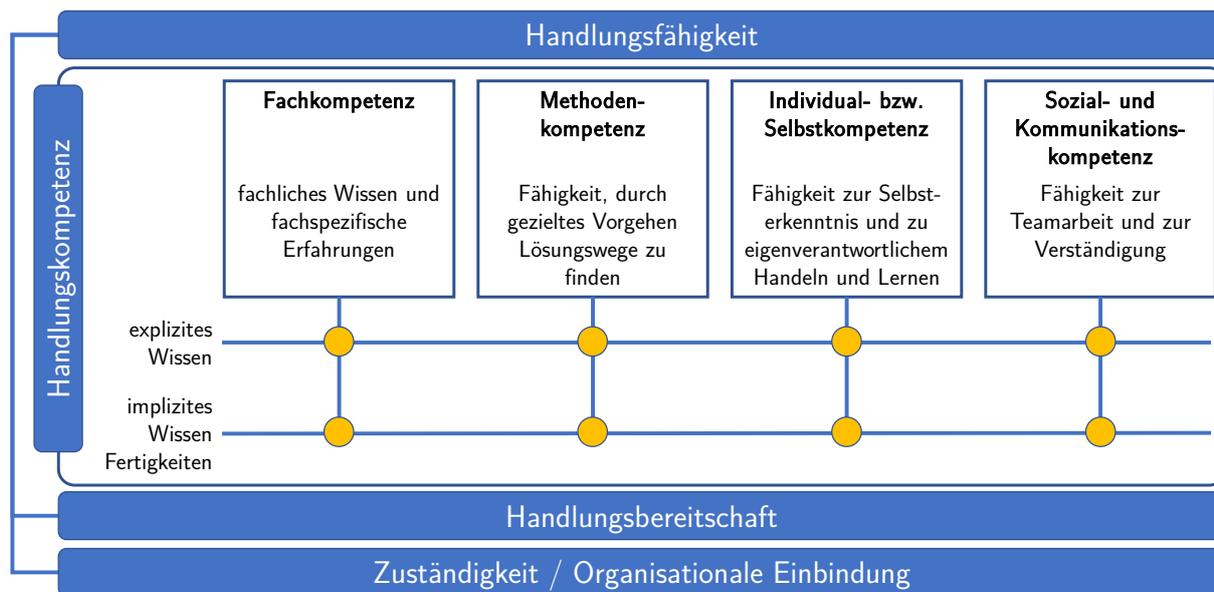


Abbildung 3.1: Dimensionen der beruflichen Handlungskompetenz nach [Wie-14a] und [Rot-71]

Tabelle 3.1: Lernformen nach [Wie-14a]

	formalisiertes Lernen	teilformalisiertes Lernen	informelles Lernen
Definition	systematisches, didaktisch abgeleitetes Lernen	wenig strukturiertes Lernen bspw. eine arbeitsintegrierte Lernumgebung	unstrukturiertes Erfahrungslernen
Beispiele	Schulungen, Kurse, Trainings	Lernen am Arbeitsplatz, in einer Lernstatt oder Lerninsel	Lernen am Arbeitsplatz

Oft wird in der Praxis keine klare begriffliche Trennung zwischen Daten, Information und Wissen vorgenommen [Leh-14]. Nach der Wissenstreppe von [Nor-98] bestehen Informationen aus Daten mit Bedeutung. Informationen bilden durch ihre Vernetzung schließlich Wissen, welches durch seine Anwendung und die Motivation des Anwenders zum Handeln wird. [Nor-18] erweiterte seine Wissenstreppe 2018 um die Dimensionen *Mensch und Organisation* sowie um die Dimension *Technologie*. Die erweiterte Wissenstreppe ist in Abbildung 3.2 dargestellt. In dieser Wissenstreppe 4.0 unterstützen intelligente Systeme und soziale Medien in der *technologischen* Dimension dabei, Informationen zu vernetzen und Wissen zu generieren. Dieses Wissen kann mithilfe von Collaboration Software und Augmented Reality angewandt werden, um Handeln zu ermöglichen. In der Dimension *Mensch und Organisa-*

tion unterstützen soziale Netzwerke und Communities die Vernetzung von Informationen, um Wissen zu generieren. Gamification kann die Motivation erhöhen, um Handeln basierend auf bestehendem Wissen zu ermöglichen.

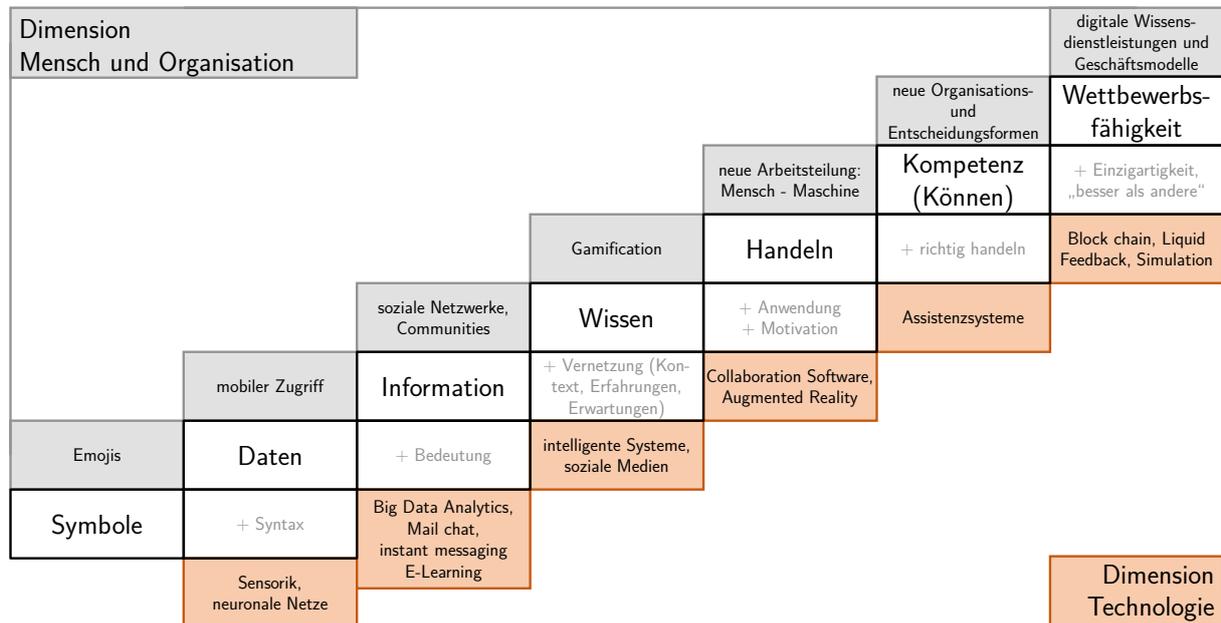


Abbildung 3.2: Wissenstreppe 4.0 nach [Nor-18], basierend auf [Nor-98]

Wissen kann neben Boden und Kapital als dritter Produktionsfaktor angesehen werden [Spi-94]. Nach [McA-07, Leh-14] kann Wissen in *explizites* und *implizites* Wissen eingeteilt werden. Explizites Wissen wird im Englischen auch als explicit oder embodied knowledge bezeichnet und implizites Wissen als verborgenes Wissen; tacit, embrained, encoded oder auch silent knowledge. Explizites Wissen lässt sich verbalisieren und eindeutig sprachlich mitteilen. Implizites Wissen ist dagegen der Teil des Wissens, welcher nicht vollständig in Worten ausgedrückt oder erfasst werden kann. Es umfasst persönliche Erfahrungen, das Können einer einzelnen Person oder auch ihre Überzeugungen. Implizites Wissen ist daher auch schwer speicherbar [Non-92, Sch-96]. Explizites Wissen kann am besten mit formalisiertem Lernen nach Tabelle 3.1 vermittelt werden. Implizites Wissen wird am besten beim informellen Lernen am Arbeitsplatz oder im Gespräch mit Kollegen nach Tabelle 3.1 aufgenommen, wobei die Wissensaufnahme vom Lerner oft kaum registriert wird [Wie-14a, S. 217]. Ein Austausch zwischen den Teilnehmern von Trainings, die sogenannte Sozialisation nach Tabelle 3.2, kann also zur Weitergabe impliziten Wissens führen. Die Typologie der Wissensentstehung von explizitem und implizitem Wissen wird durch die Typologie der Wissensentstehung in Tabelle 3.2 deutlich.

Tabelle 3.2: Typologie der Wissensentstehung [Sch-96, Non-12] nach [Non-92]

Übergang	Form des Übergangs	Prozesse und Beispiele
explizit nach explizit	Kombination	klassisches Lernen, Informationsaustausch, wissenschaftliches Arbeiten
explizit nach implizit	Internalisierung	Automatisierung, Übergang zur Fertigkeit
implizit nach implizit	Sozialisation	gemeinsame Erfahrung, Nachahmung, Übung
implizit nach explizit	Externalisierung	Reflexion, Neukonfiguration

Neben der Art der Wissensvermittlung ist auch der Ort für den Lernerfolg maßgeblich. Lernen kann nach [Deh-92, Deh-07] bezogen auf das Erlernen eines Montagevorgangs direkt am Montageort, getrennt vom Arbeitsort aber noch räumlich und arbeitsorganisatorisch verbunden oder räumlich getrennt vom Arbeitsort existieren. Diese drei örtlichen Beziehungen zwischen Arbeits- und Lernort werden als *arbeitsgebundenes*, *arbeitsverbundenes* und *arbeitsorientiertes* Lernen bezeichnet und im Folgenden näher erläutert.

Beim *arbeitsgebundenen Lernen* sind Lern- und Arbeitsort identisch. Das Lernen findet am Arbeitsplatz oder im Arbeitsprozess statt. Beispiele sind Training on the Job und Lerninseln [Deh-92, Deh-07]. Arbeitsgebundenes Lernen erfolgt meist in der Massen- und Serienfertigung. Im Sondermaschinenbau wird es meist nur in der Ausbildung genutzt. Ein erfahrener Mitarbeiter erklärt hier einem neuen oder ungelerten Kollegen die nötigen Arbeitsschritte des Montagevorgangs. Dieses Vorgehen ist bei weiterbildenden Montagetrainings jedoch schwer anwendbar. Bei Gruppengrößen von 10 bis 20 Teilnehmern, müssten mehrere Trainer und oft hochpreisige Trainingsmaschinen zur Verfügung stehen, um paralleles Lernen zu ermöglichen und individuell auf die Bedürfnisse der Teilnehmer eingehen zu können. Zudem ist die Montageumgebung im Sondermaschinenbau durch Schweiß-, Hämmer- und Justierarbeiten oft sehr laut. Eine Verständigung in großen Gruppen ist daher schwierig. Bauteile könnten zudem leicht beschädigt werden und der Zeitraum zwischen Bestellung und Erhalt eines Ersatzbauteils kann anders als in Serien- und Massenfertigung mehrere Monate betragen. Somit verzögert sich die Produktauslieferung, was hohe Strafzahlungen an den Endkunden zur Folge haben kann.

Beim *arbeitsverbundenen Lernen* sind Lern- und Arbeitsort getrennt, gleichwohl besteht zwischen ihnen eine direkte räumliche und arbeitsorganisatorische Verbindung, so z. B. in Qualitätszirkeln und Lernstätten [Deh-92, Deh-07]. In Umgebungen, welche der Arbeitsrealität möglichst stark angenähert sind, werden beim arbeitsverbundenen Lernen Auftrags- und Übungsarbeiten durchgeführt. Es besteht jedoch immer eine entscheidende Differenz zu authentischen Arbeitsumgebungen [Deh-01, S. 56]. Ein Training in unmittelbarer Nähe an ähnlichen Montageobjekten wie in der Produktion bietet die Möglichkeit große Gruppen zeitgleich zu trainieren und zu schulen, ohne, dass die Produktion unterbrochen werden muss. Eine Beschädigung von Bauteilen erzeugt keinen Lieferverzug und die räumliche Trennung von der Produktion ermöglicht ein geräuschärmeres Lernen.

Arbeitsorientiertes Lernen findet in zentralen Bildungseinrichtungen außerhalb der Arbeit statt [Deh-92, Deh-07]. Eine vollständige räumlicher Trennung vom Arbeitsort wäre bspw. in der Berufsschule oder an der Universität gegeben. Arbeitsorientiertes Lernen findet im Sondermaschinenbau bspw. während der Ausbildung statt. Die räumliche Trennung vom Montageort existiert auch, wenn Lerninhalte nach einem Montagetraining ohne verfügbaren Trainer abgerufen oder vertieft werden sollen. Dies kann auftreten, wenn Servicemonteur sich im Kundeneinsatz befinden und vor oder auf dem Weg zum nächsten Servicefall bestimmte Aspekte des bereits absolvierten Trainings wiederholen möchten. Hier stehen dann keine physischen Trainingsobjekte zur Verfügung.

3.2 Lern- und Lehrtheorien

Im Folgenden werden etablierte Einteilungen von Lernzielen sowie Lern- und Lehrtheorien vorgestellt, um zu vermittelnde Inhalte besser differenzieren zu können und Grundlagen des Lehrens und Lernens für Montagetätigkeiten zu einer Übersicht kombinieren zu können.

3.2.1 Taxonomie der Lernziele nach Bloom

Eine Einordnung von Lernzielen wurde bereits von vielen Psychologen und Arbeitswissenschaftlern vorgenommen wie in der Struktur beobachteter Lernergebnisse (*Structure of the Observed Learning Outcome*, SOLO)-Taxonomie nach [Big-14]. Eine der am weitesten verbreiteten Einordnungen bildet die Taxonomie der Lernziele nach Bloom [Blo-56]. Die Taxonomie der Lernziele wurde 1956 unter der Leitung des Bildungspsychologen Dr. Benjamin Bloom entwickelt. Ziel war es, zusätzlich zum weitverbreiteten Faktenlernen auch die höheren Formen des Lernens wie Synthese und Evaluation in die zukünftige Entwicklung von Lernumgebungen einzubeziehen [Blo-56]. Drei unterschiedliche Domänen des Lernens wurden identifiziert:

- **Knowledge:** Die *kognitive Domäne* beschreibt die *mental*en Fertigkeiten und die Vermittlung von *Wissen*.
- **Attitudes:** Die *affektive Domäne* beschreibt die Weiterentwicklung von *Gefühlen* und Selbstwahrnehmung im eigenen *Verhalten*.
- **Skills:** Die *psychomotorische Domäne* beschreibt das Training *manueller* oder *physischer* Fertigkeiten [Blo-56].

Der Lerner soll nach dem Lernprozess neues *Wissen/knowledge*, eine neue Einstellung/*attitude* oder eine neue Fertigkeit/*skill* erworben haben. Für jede dieser Domänen wurde anschließend eine feinere Unterteilung vom Einfachen zum Komplexen vorgenommen, welche im Folgenden näher erläutert wird.

Die *kognitive Domäne* wurde von [Blo-56] als erste vervollständigt. Bei der kognitiven Domäne sollen Wissen und die Entwicklung individueller Fertigkeiten systematisch eingeteilt werden. Die sechs Oberkategorien nach Bloom sind in Tabelle 3.3 links dargestellt. Ganz oben steht die einfachste Kategorie *Wissen* und die Aufzählung endet mit der komplexesten Kategorie, der *Evaluation*. Um jeweils in eine komplexere Kategorie zu gelangen, muss erst die einfachere beherrscht werden. Lorin Anderson, ein ehemaliger Student Blooms, und David Krathwohl, stellten später eine überarbeitete Version der Taxonomie vor [And-01, Kra-02]. Diese kann Tabelle 3.3 rechts entnommen werden. In dieser neuen Version wurden die Namen der sechs Kategorien von Nomen in die aktivere Verbform umgewandelt und die fünfte und sechste Kategorie vertauscht. Hierdurch wird das Erschaffen neuer Inhalte als komplexeste und höchste Lernform deklariert und der Evaluation bestehender Inhalte übergeordnet. Beispiele, Schlüsselbegriffe und Lerntechnologien für die sechs Kategorien der kognitiven Domäne, können Tabelle D.2 im Anhang entnommen werden.

Tabelle 3.3: Kognitive Taxonomie nach [Blo-56, And-01, Kra-02]

Bloom [Blo-56]		Anderson/Krathwohl [And-01, Kra-02]	
Wissen	<i>knowledge</i>	Erinnern	<i>remembering</i>
Verständnis	<i>comprehension</i>	Verstehen	<i>understanding</i>
Anwendung	<i>application</i>	Anwenden	<i>applying</i>
Analyse	<i>analysis</i>	Analysieren	<i>analyzing</i>
Synthese	<i>synthesis</i>	Evaluieren	<i>evaluating</i>
Evaluation	<i>evaluation</i>	Erschaffen	<i>creating</i>

Bezogen auf die Montage können folgende Beispiele für die sechs Kategorien nach [And-01, Kra-02] aus Tabelle 3.3 herangezogen werden.

- *Erinnern*: Wiederholen von Sicherheitsregeln
- *Verstehen*: Wiedergeben von Montagevorgängen in eigenen Worten
- *Anwenden*: Praktisches Durchführen einer Montage, welche zuvor theoretisch erlernt wurde, bspw. mithilfe eines Vortrags
- *Analysieren*: Finden eines Fehlers an einer Maschine durch schrittweise Abarbeitung der bisher aufgetretenen Fehler
- *Evaluieren*: Beurteilen eines Vorschlags von einem Kollegen bezüglich einer Prozessverbesserung
- *Erschaffen*: Schreiben einer Montageanleitung für ein neues Produkt

Die kognitive Taxonomie nach Bloom enthält neben den sechs kognitiven Kategorien auch die drei Wissensdimensionen Faktenwissen/*factual*, Konzeptwissen/*conceptual* und Prozesswissen/*procedural* [Blo-56]. Diese wurden von Anderson und Krathwohl in einer Matrix in Bezug zu den sechs kognitiven Kategorien gesetzt und um die metakognitive/*metacognitive* WissensEbene ergänzt [And-01]. Clark und Lyons ergänzten später die beiden WissensEbenen der Prozesse/*processes* und Prinzipien/*principles* [Cla-11]. Eine Beispielmatrix, mit den aus Tabelle D.2 verwendeten Begriffen ist in Tabelle 3.4 zu sehen.

Tabelle 3.4: Wissensmatrix nach [Blo-56, Big-95, And-01, Cla-11]

Wissens- dimension	kognitive Dimension					
	Erinnern	Verstehen	Anwenden	Analysieren	Evaluieren	Erschaffen
Fakten	auflisten	paraphrasieren	klassifizieren	umreißen	ordnen	kategorisieren
Konzepte	erinnern	erklären	anzeigen	kontrastieren	kritisieren	modifizieren
Prozesse	umreißen	schätzen	produzieren	grafisch darstellen	verteidigen	gestalten
Prozeduren	reproduzieren	ein Beispiel geben	in Beziehung setzen	identifizieren	kritisieren	planen
Prinzipien	erklären	konvertieren	lösen	unterscheiden	abschließen	überarbeiten
Metakognitiv	richtig anwenden	interpretieren	entdecken	ableiten	prognostizieren	aktualisieren

Krathwohl, Bloom, und Masia entwickelten die erste Taxonomie für Lernziele in der *affektiven Domäne* [Blo-56] und erweiterten sie später durch affektive Konstrukte wie in der folgenden Aufzählung dargestellt [Kra-64].

1. Aufnehmen
2. Reagieren
3. Werten
4. Wertordnung
5. Bestimmtsein durch Werte

Auch diese erweiterte Taxonomie enthält immer noch viele Lücken und durchdringt die affektive Domäne kaum. Eine Beispielmatrix mit den affektiven Konstrukten kann Tabelle D.4 im Anhang entnommen werden. Bezogen auf Montagetrainings sind besonders das *Aufnehmen* und *Reagieren* wichtig. *Aufnehmen* beschreibt eine Hörbereitschaft und ausgewählte Aufmerksamkeit, welche erforderlich ist, um die zu lernenden Inhalte aufnehmen zu können. *Reagieren* beschreibt die aktive Beteiligung des Lernenden am Lernprozess, was vor allem in der Durchführung von Montagetätigkeiten wichtig ist.

Die *psychomotorische Domäne* wurde von Bloom am wenigsten erforscht. Er entwarf hierzu keine Taxonomie, da weder er noch sein Forscherteam Erfahrung im Unterrichten manueller Fertigkeiten im Universitätsbereich besaßen. [Dav-70] und [Sim-72] überarbeiteten die psychomotorische Domäne, basierend auf Blooms Entwurf. Die psychomotorische Domäne umfasst die körperliche Bewegung, Koordination und Nutzung motorischer Fertigkeiten. Für die Entwicklung dieser Fertigkeiten wird Übung erfordert. Diese wird in Bezug auf Geschwindigkeit, Distanz, Techniken in der Ausführung, Verfahren oder Präzision gemessen. Die psychomotorischen Fertigkeiten umfassen somit manuelle Aufgaben, wie das Waschen eines Autos oder das Ausheben eines Grabens sowie schwierigere Aufgaben, wie das Bedienen eines komplizierten Maschinenteils [Sim-72]. [And-01] und [Kra-02] entwickelten später basierend auf [Blo-56] und [Dav-70, Sim-72] folgende Einteilung der psychomotorischen Domäne:

1. Imitation
2. Manipulation
3. Präzision
4. Handlungsgliederung
5. Naturalisierung

Eine Beispielmatrix mit den psychomotorischen Konstrukten kann Tabelle D.3 im Anhang entnommen werden. Hierbei sind für die Montage vor allem *Imitation*, *Manipulation* und *Präzision* wichtig. *Imitation* beschreibt das einfache Nachahmen der Tätigkeit einer anderen Person, dessen Ergebnis von geringer Qualität sein kann. *Manipulation* erlaubt eine zuvor erlernte Fertigkeit selbstständig nach Anweisung durchzuführen und *Präzision* erhöht die Qualität der durchgeführten Tätigkeit und erfordert dabei keine Hilfe durch andere Personen oder Anleitungen.

3.2.2 Lernstufen nach Fitts und Posner

Anders als bei Bloom werden kognitive und psychomotorische Domäne bei [Fit-67] nicht mehr als voneinander getrennt betrachtet, sondern als aufeinanderfolgende Stufen im Prozess des Erlernens motorischer Fertigkeiten. Die einzelnen Stufen können Tabelle 3.5 entnommen werden. Nach [Fit-67] werden die in der kognitiven Lernstufe noch unbekanntes Bewegungen zunächst mit viel geistigem Aufwand bewusst gesteuert, um dann nach und nach in der assoziativen und der autonomen Lernstufe mehr und mehr automatisiert und somit schneller abzulaufen. In den späteren Lernstufen entsteht ein klares mentales Bild der zu bewältigenden Arbeitsaufgabe. Über einzelne Bewegungsabläufe muss dann nicht mehr nachgedacht werden.

Tabelle 3.5: Erlernen motorischer Fertigkeiten nach [Fit-67]

Lernstufen	Charakteristika	Aufmerksamkeitsanforderungen & Aktivitäten	Beschreibung
Kognitiv	Die Bewegungen sind langsam, inkonsistent und ineffizient. Erhebliche kognitive Aktivitäten sind erforderlich.	Aufmerksamkeit wird benötigt, um zu verstehen, was sich bewegen muss, um ein bestimmtes Ergebnis zu erzielen. Große Teile der Bewegung werden bewusst gesteuert. Die Trainingseinheiten sind leistungsorientierter, weniger variabel und beinhalten ein klares mentales Bild <i>technisch/visuell</i> .	1: Wesentliche Elemente wurden nicht beobachtet oder sind nicht vorhanden. <i>Frühkognitiv</i> 2: Wesentliche Elemente beginnen sich zu zeigen. <i>Spät-kognitiv</i>
Assoziativ	Die Bewegungen sind flüssiger, zuverlässiger und effizienter. Es ist weniger kognitive Aktivität erforderlich.	Einige Teile der Bewegung werden bewusst, andere automatisch gesteuert. Übungseinheiten verbinden Leistung und Ergebnisse, die Bedingungen können variiert werden. Klares mentales Bild, Genaue Leistung	3: Wesentliche Elemente erscheinen, aber nicht mit Konsistenz. <i>Frühassoziativ</i> 4: Wesentliche Elemente erscheinen regelmäßig auf einem zufriedenstellenden Niveau. <i>Spätassoziativ</i>
Autonom	Die Bewegungen sind präzise, konsistent und effizient. Es ist wenig oder keine kognitive Aktivität erforderlich.	Die Bewegung wird weitgehend automatisch gesteuert. Die Aufmerksamkeit kann sich auf taktische Entscheidungen konzentrieren. Die Übungseinheiten sind eher ergebnisorientiert. Der Fokus liegt auf einem größeren Bereich von Bewegung, Geschwindigkeit, Beschleunigung und dem Einsatz von Fertigkeiten in einer neuen Situation.	5: Wesentliche Elemente kommen häufig vor, oberhalb des erforderlichen Niveaus. <i>Früh-autonom</i> 6: Wesentliche Elemente erscheinen kontinuierlich, auf einer höheren Ebene. <i>Spätautonom</i>

3.2.3 Lernzyklus nach Kolb

Nach Kolb bilden die Charakteristika von Lernen und Problemlösung einen einzelnen Prozess, der es ermöglicht aus erworbenem Wissen und Erfahrungen Regeln zu generieren, um dieses Wissen auf neue Situationen übertragen zu können. Abbildung 3.3 bildet die vier wiederkehrenden Phasen dieses Prozesses ab. Nach der konkreten Erfahrung erfolgen Beobachtung und Reflexion des Erlebten. Diese können sowohl aktiv durch den Lernenden als auch passiv durch einen Lehrenden erfolgen. Im Anschluss erfolgen eine abstrakte Begriffsbildung und Verallgemeinerung der Beobachtungen. Diese Abstraktion kann nun durch aktives Experimentieren getestet werden, was im Anschluss zu neuen Erfahrungen führt [Kol-71]. Durch Abbildung 3.3 wird deutlich, dass Lernen immer ein *Wiederlernen* und Bildung

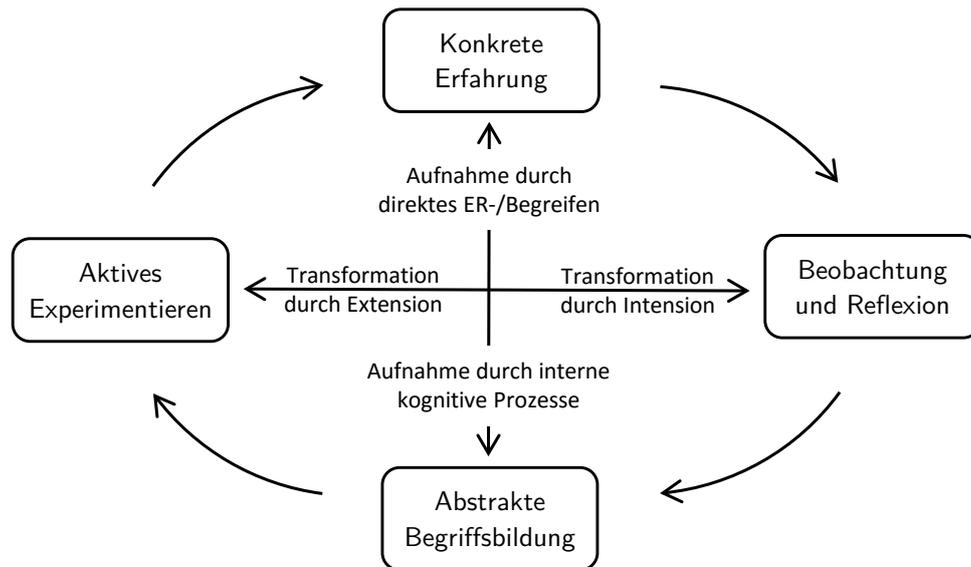


Abbildung 3.3: Lernzyklus nach [Kol-71]

immer eine *Weiterbildung* ist. Der entwickelte Lernzyklus wiederholt sich immer wieder, da Menschen die gewonnenen Erkenntnisse erneut testen und erweitern. Die Erkenntnisse aus einem Lerninhalt sind oft individuell, da jeder Mensch seine eigenen Ziele hat und die gewonnenen Erkenntnisse auf diese Ziele gerichtet verwertet werden. Des Weiteren wird jeder einen anderen Schwerpunkt auf die einzelnen Phasen des Lernzyklus legen. Mathematiker werden die Abstraktion bevorzugen, Manager hingegen die aktive Anwendung eines Konzepts. Eine Reinform eines einzelnen Lerntyps wird jedoch nie vorliegen, da zumindest ein kleiner Anteil aus jedem Bereich benötigt wird, um ein erfolgreiches Lernen zu ermöglichen [Kol-71, Kol-81]. Nach [Fat-90, Hon-92, Mül-06] wird ein Wechsel zwischen den einzelnen Lernstilen und -typen zu den reichhaltigsten Lernerfolgen führen. Den Lernern sollten möglichst unterschiedliche Zugänge zum Lerngegenstand erschlossen werden.

3.2.4 Kombination

Im Folgenden werden die zuvor behandelten Lerntheorien in Bezug zueinander gesetzt und in Abbildung 3.4 kombiniert. Die bei [Blo-56] noch getrennt voneinander betrachteten Bereiche der Wissensvermittlung und des Trainings von Fertigkeiten wurden von [Fit-67] als zusammenhängend identifiziert. Die erste Stufe der *Imitation* beim Training von Fertigkeiten nach [Blo-56] wurde bei [Fit-67] interpretiert als kognitiver Nachvollzug des Gezeigten. In dieser ersten Stufe sind die Bewegungen nach [Fit-67] noch langsam und ineffizient und fordern erhebliche kognitive Aktivitäten. In dieser wie in allen folgenden Trainingsstufen finden nun nach [Kol-71] in wiederkehrender Reihenfolge *Beobachtung und Reflexion*, *abstrakte Begriffsbildung*, *aktives Experimentieren* und *konkrete Erfahrung* statt. Dieser wiederkehrende Lernzyklus des Verstehens ermöglicht durch seine ständige Wiederholung einen Übergang in die nächste, die assoziative Lernstufe, nach [Fit-67]. Die Bewegungen werden schneller und der Anteil kognitiver Aktivitäten sinkt. Schließlich erfolgt der Eintritt in die dritte Lernstufe nach [Fit-67]. In dieser autonomen Lernstufe laufen die Bewegungen präzise, konsistent und effizient ab und es ist nur noch wenig oder keine kognitive Aktivität erforderlich. Durchfüh-

rungszeit und kognitive Aktivität sinken somit vom ersten Montagedurchgang, bis die Tätigkeit vollständig beherrscht wird.

Nach [Jes-13] besteht ein Zusammenhang zwischen der Durchführungszeit (t) eines Montagevorgangs und der Anzahl der Aufgabenwiederholungen (n) in der Form $t(n) \equiv n^{-a} + c$. Diese Lernkurve wird qualitativ mit den Lernstufen nach [Fit-67] und dem Lernzyklus nach Kolb in Abbildung 3.4 in Bezug gesetzt. Hierbei bildet (a) einen durch Alter, Vorkenntnisse aus der Berufsaus-

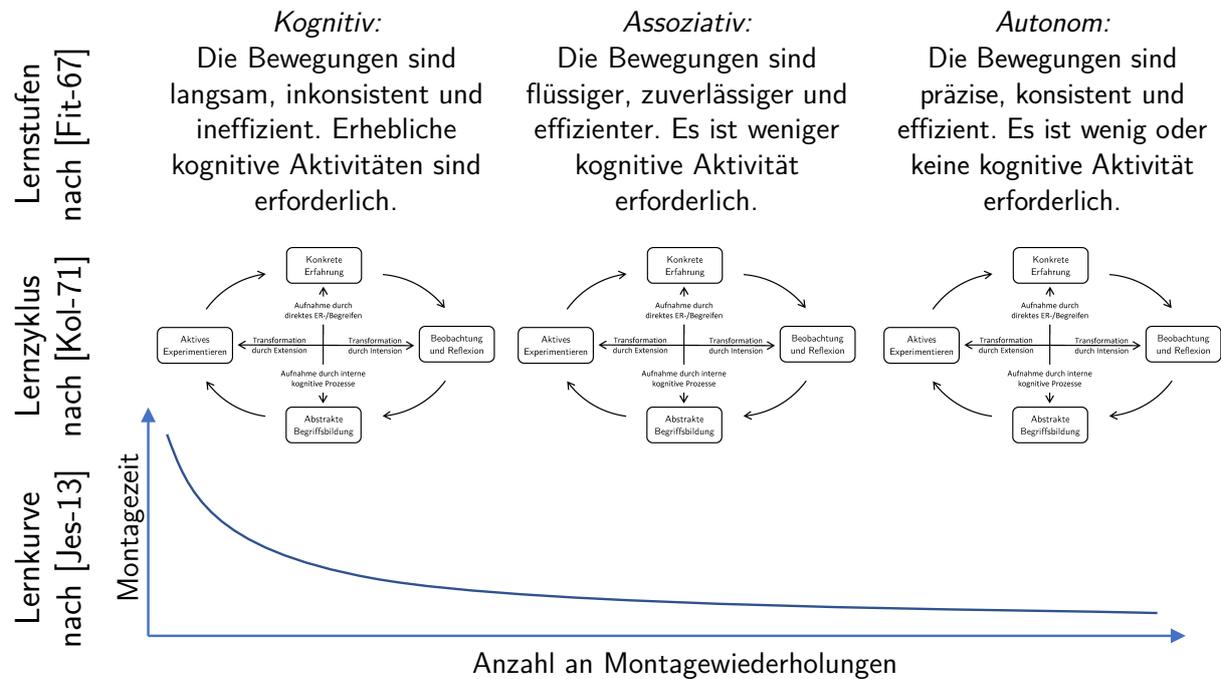


Abbildung 3.4: Kombination der Lerntheorien nach [Kol-71, Fit-67, Jes-13] Eine größere Darstellung des Lernzyklus nach Kolb kann Abbildung 3.3 entnommen werden

bildung, Erfahrung mit technischen Zeichnungen, Montageerfahrung, motorische Fertigkeiten, räumlichem Vorstellungsvermögen und Art des Arbeitsplans beeinflussten Faktor und (c) den nach unten limitierenden Grenzwert der Durchführungszeit, welcher durch Systeme vorbestimmter Zeiten wie Methods-Time Measurement (MTM) ermittelt werden kann. Der Einfluss didaktischer Methoden wurde von [Jes-13] nicht untersucht. Nach seiner Methode zur Anlernzeit sensumotorischer Tätigkeiten beeinflusst die Art des Arbeitsplans primär die ersten Ausführungen der Arbeitsaufgabe. Die langfristig erreichte Ausführungszeit ist jedoch von der Art des Arbeitsplans unabhängig [Jes-13, S. 150]. Diese ersten Ausführungen einer Arbeitsaufgabe sind vor allem für Sondermaschinenbautrainings bei den in Abschnitt 2.4 beschriebenen Bedingungen maßgeblich. Aufgrund der erwähnten zeitlich langen Montagevorgänge und der kurzen zur Verfügung stehenden Trainingsdauer sind meist nur wenige Montagedurchgänge möglich. Die Untersuchungen von [Jes-13] mit text- und videobasierten Anleitungen ergaben, dass eine schnelle Anlernung durch filmbasierte Arbeitspläne möglich ist. Diese geht aber nach [Jes-13] mit einer hohen Fehleranzahl einher. Textbasierte Arbeitspläne führen dagegen anfänglich zu einer langsameren Anlernung. Sie können aber aufgrund der geringeren Fehleranzahl als nachhaltiger eingeschätzt werden [Jes-13, S. 150]. Um eine breitere Aussage über den Einfluss der Art des genutzten Arbeitsplans, bzw. der Trainingsunterlage, treffen zu können, werden ne-

ben den im Folgenden untersuchten Lernmethoden anschließend existierende Visualisierungstechnologien analysiert.

3.3 Lern- und Lehrmethoden

Nach [Fle-96] bilden die 20 verbreitetsten Wissensvermittlungsmethoden Fallmethode, computer-based training, Debatte, Fernunterricht, Lernkonferenz, Lerndialog, Lernnetzwerk, Werkstattseminar, Lernausstellung, Erkundung, Frontalunterricht, individuelle Lernumgebung, Lernkabinett, Praktikum, Vorlesung, Tutorium, projektbasierter Unterricht, Simulation und Lerngespräch. Jedoch nicht alle dieser didaktischen Methoden zur Wissensvermittlung sind für das Erlernen von Arbeitsvorgängen im Allgemeinen und noch weniger für die Nutzung in Montagetrainings im Speziellen geeignet. Die Methoden zum Erlernen von Arbeitsvorgängen können nach [Bon-99, Sch-05, Jes-13] wie in Tabelle 3.6 visualisiert eingeteilt werden. Zum einen kann das Lernen eher lehrer- oder lernerzentriert sein oder auch Lehrenden und Lernenden gleichermaßen beteiligen. Die Zentrierungsform bezieht sich darauf, wer die zu lernenden Inhalte erarbeitet. Entweder können sie vom Lehrenden vollständig vorgegeben werden oder durch den Lernenden, bspw. durch Leitfragen, erarbeitet werden. Zum anderen können die Lernbereiche nach [Blo-56] in den psychomotorischen, kognitiven und affektiven Lernbereich unterteilt werden. [Sch-05] und [Jes-13] adressieren jedoch lediglich den psychomotorischen und den kognitiven Lernbereich. Die nach [Bon-99, Sch-05, Jes-13] identifizierten Lernmethoden, welche den psychomotorischen Lernbereich adressieren, basieren alle auf der alten objektivistischen Vorstellung von Lernprozessen.

Tabelle 3.6: Lernmethoden aus [Jes-13] nach [Sch-05]

		Lernbereich		
		psychomotorisch	psychomotorisch und kognitiv	kognitiv
Zentrierungsform	Lehrer	Anweisung		Vortrag
	Lehrender und Lernender	Vier-Stufen-Methode, - analytische Methode, - handlungsregulatorische Methode		Lehrgespräch
	Lerner		Leittextmethode, Simulations-/ Trainingsmethode, Planspiel, Projektmethode	Fallmethode

Im Folgenden werden die in Tabelle 3.6 aufgeführten Lernmethoden nach [Bon-99, Sch-05, Jes-13] näher erläutert. Diese sind in lehrerzentrierte und lernerzentrierte Methoden unterteilt sowie in solche, bei denen sowohl Lehrender als auch Lernender beteiligt sind.

3.3.1 Lehrerzentriert

Bei lehrerzentrierten Methoden entwickelt und strukturiert der Lehrende den Lernprozess und stellt alle benötigten Informationen zur Verfügung.

3.3.1.1 Anweisung

Unter einer Anweisung wird nach [REF-76] eine Arbeitsaufforderung in schriftlicher oder mündlicher Form verstanden, welche sich an Mitarbeiter richtet, die eine Tätigkeit im Grundsatz bereits beherrschen. Diese den psychomotorischen Lernbereich betreffende Methode kann als ein Führungsmittel aufgrund einer sachlichen Information bezeichnet werden und ist somit stark lehrerzentriert [Sch-05, S. 97]. Sie ist kaum für den jeweiligen Lerner anpassbar und wenig interaktiv. Der Lehrende gibt Lerninhalt und -ablauf vollständig vor. Umfangreiche Arbeitsanweisungen beginnen mit einer Übersicht, bevor auf Einzelheiten eingegangen wird. Die Anweisung kann entweder vollständig linear dargestellt werden und als eine Bedienungs-, Verwendungs-, Durchführungs- oder Montageanweisung eine lineare Schrittfolge von Operationen beinhalten [Sch-05, S. 98]. Oder sie kann wie bei einem Flussdiagramm mehrere Wahl-Entscheidungen enthalten [REF-91].

3.3.1.2 Vortrag

Der Lehrende stellt bei einem Vortrag Sachverhalte entweder mündlich oder mithilfe von Medien dar. Der Lerner hat bei dieser auf den kognitiven Lernbereich bezogenen Lernmethode hingegen eine überwiegend rezeptive Rolle. Zu vermittelnde Sachverhalte werden vom Lehrenden ausgewählt, für die Lernsituation angepasst und für den Lerner verständlich dargestellt. Um die Inhalte möglichst verständlich darzustellen, kann das Konzept der Verständlichkeit nach [Lan-11] angewandt werden. Es wurde für die verständliche Gestaltung von Lehr- und Informationstexten entwickelt und kann auch für die Gestaltung von Vorträgen genutzt werden. Die vier Dimensionen der Verständlichkeit bilden *Einfachheit*, *Gliederung-Ordnung*, *Kürze-Prägnanz* sowie *zusätzliche Stimulanz*. Bei der *Einfachheit* sollen unabhängig vom Inhalt Wortwahl und Satzbau leicht verständlich und kurz gehalten werden sowie eine möglichst anschauliche Art der Darstellung gewählt werden. Die *Gliederung-Ordnung* bezieht sich auf eine übersichtliche und folgerichtige Unterscheidung von Wesentlichem *Kürze-Prägnanz* und Unwesentlichem. Die *zusätzliche Stimulanz* kann durch abwechslungsreiche, ausdrucksstarke und persönlich ansprechende Gestaltung die Motivation erhöhen [Sch-05].

3.3.2 Lehrender und Lernender beteiligt

Bei Lernmethoden bei denen Lehrender und Lernender beteiligt sind, haben beide in unterschiedlichen Phasen des Lernprozesses die Möglichkeit diesen selbst zu steuern.

3.3.2.1 Vier-Stufen-Methode

Die Vier-Stufen-Methode wurde aus dem in den USA im zweiten Weltkrieg entstandenen industriellen Training (*Training Within Industry*, TWI) entwickelt [Doo-45, Die-70]. Dieses wiederum entstand aus dem Bedarf ungelernter Arbeiter schnell Prozesse aus der Serienproduktion beizubringen [Bun-74, S. 310 ff.]. Die Übernahme und Weiterentwicklung des TWI zur Deutschen Vier-Stufen-

Methode erfolgte in den Nachkriegsjahren vor allem durch die Reichsausschuss für Arbeitszeitermittlung (REFA) [REF-76]. Bevor die Vier-Stufen-Methode durchgeführt werden kann, muss eine in Tabelle 3.7 dargestellte Gliederung des Lehrprozesses durchgeführt werden [Sch-05] [Pät-93, S. 194 ff.]. In ihr werden die zu lernenden Vorgänge in einzelne Teilvorgänge untergliedert. Es er-

Tabelle 3.7: Unterweisungsgliederung [Sch-05] nach [REF-91]

Lernabschnitte: wesentliche Teilvorgänge Was?	Arbeitsablauf und -hinweise: Kernpunkte Wie?	Begründungen Warum so?
wichtige Teilvorgänge; folgerichtige Abschnitte, natürliche Unterbrechungsmöglichkeiten	Kernpunkte sind Hinweise, die ein Gelingen der Arbeit sicherstellen, sie erleichtern die Arbeit, sie dienen der Arbeitssicherheit und sie beschränken sich auf das allein Notwendige und Wichtige.	Begründungen schaffen Einsichten in Notwendigkeiten der Arbeitsausführungen, sie ermöglichen ein sinnvolles Nachvollziehen durch den Lernenden, sie fördern die Arbeitsmotivation und sind pädagogisch äußerst wichtig.

folgt die Beantwortung der Frage: Was soll gelernt werden? Hiernach werden der Arbeitsablauf strukturiert und für die Durchführung der Aufgabe benötigte Arbeitshinweise erarbeitet. Es erfolgt die Beantwortung der Frage: Wie soll die Arbeitsaufgabe durchgeführt werden? Abschließend werden Begründungen aufgezeigt, warum die beschriebene Aufgabe genau so und nicht anders ausgeführt werden soll, bzw. welche Auswirkungen eine fehlerhafte Ausführung hätte. Es erfolgt die Beantwortung der Frage: Warum soll die Aufgabe so ausgeführt werden? [Sch-05, S. 111] nach [REF-91, S. 137-157]. Diese Art der Vorbereitung forciert den Lehrenden sich mit der Arbeitsaufgabe auseinanderzusetzen und die zu erlernenden Arbeitstätigkeiten und nicht den Rahmen in dem das Training stattfindet in den Vordergrund zu stellen sowie keinen wichtigen inhaltlichen Aspekt zu vergessen. Vor allem die Begründung warum ein Arbeitsvorgang so und nicht anders durchgeführt werden soll, ermöglicht es dem Lehrenden sich mit seiner eigenen Arbeitsweise auseinanderzusetzen und zu hinterfragen, ob bestimmte Vorgänge nicht einfacher durchgeführt werden können oder aufgrund veränderter Rahmenbedingungen überhaupt noch benötigt werden. Die Vier-Stufen-Methode ist in die vier Stufen *Vorbereitung*, *Vorführung*, *Nachvollzug* und *Üben* unterteilt. Tabelle D.1 im Anhang auf Seite 160 gibt eine ausführliche Beschreibung der einzelnen Stufen wieder. In Tabelle 3.8 wird die Methode kurz zusammengefasst.

In der ersten, der Vorbereitungsstufe, wird der Lerner auf die zu erlernende Tätigkeit vorbereitet. Er erfährt den Lerninhalt und wird nach seinen Vorkenntnissen gefragt, wonach der Lehrende den zu vermittelnden Inhalt anpassen sollte. In der zweiten, der Vorführungsstufe, wird dem Lernenden die zu erlernende Tätigkeit mehrfach in unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Detailgraden vorgeführt. Die dritte, die Nachvollzugsstufe, ermöglicht es dem Lernenden mit abnehmendem Einfluss des Lehrenden bei jeder weiteren Wiederholung der Tätigkeit, diese mit zunehmender Geschwindigkeit und Selbstbeteiligung nachzumachen. Schließlich ermöglicht die vierte, die Übungsstufe, dem Lerner, die Tätigkeit selbständig zu üben. Er kann jedoch bei Unklarheiten zum Arbeitsablauf den Lehrenden kontaktieren, welcher die Ausführung nur noch gelegentlich beobachtet. Bei der Anwendung der Vier-Stufen-Methode sollte nicht schematisch vorgegangen werden. Vor allem Stufe zwei und drei sollten im

Tabelle 3.8: Übersicht der Vier-Stufen-Methode nach [Bey-67, Pal-69, Bun-74, REF-76, REF-91, Sch-05]

Stufe 1: Vorbereitung	Eintritt des Lernenden in die Lehr-Lernsituation, Lernsituation entkrampfen, Lernenden auf die zu erwerbende Tätigkeit einstellen, Motivierung, Identifikation, Aktivierung
Stufe 2: Vorführung	Demonstration der Tätigkeit durch die Ausbildungsperson erst vollständig, dann in Teilschritten und dann wieder vollständig. Den Drei Vorführungsschritten gedanklich folgen, Arbeit verstehen und erste Versuche ermöglichen.
Stufe 3: Nachvollzug	Durchführung der Tätigkeit durch den Lernenden zunächst in groben Zügen, dann in Einzelschritten und wiederum erneut als Ganzes. Einleiten des Selbstlernprozesses, Aufbau der Rahmenkoordination.
Stufe 4: Übung/Beendigung	Entlassen des Lernenden aus der Lernsituation, Abnahme der Betreuung im Übergang zum Selbstlernprozess, erste Übungen zum Aufbau der Detailkoordination

alternierenden Wechsel aus Vor- und Nachmachen erfolgen. Die Vier-Stufen-Methode ist sehr flexibel und kann je nach Vorkenntnissen des Lernenden angepasst und erweitert werden [Sch-05, Sch-10b]. Die Vier-Stufen-Methode ist geeignet für Arbeitstätigkeiten, bei welchen für das Erlernen der Tätigkeit eine Demonstration sowie ein geleiteter Nachvollzug ausreichen [Sch-05, S. 119]. Daher eignet sich diese Methode eher für konstant ablaufende Tätigkeiten [Sch-10b]. Besondere Ausprägungen der Vier-Stufen-Methode stellen die *analytische Methode* und die *handlungsregulatorische Methode* dar [Sch-05].

Bei der *analytischen Methode* wird dem Lerner anders als bei der Vier-Stufen-Methode zu Beginn das benötigte Hintergrundwissen vermittelt. Das Erlernen der einzelnen Arbeitsschritte erfolgt wie in Stufe zwei und drei der Vier-Stufen-Methode. Im Gegensatz zur Vier-Stufen-Methode wird das Üben bei der analytischen Methode jedoch weitgehend nicht ohne Lehrenden durchgeführt, sondern kontrolliert und geplant unter der Aufsicht des Lehrenden. Die analytische Methode ist daher stärker lehrerzentriert als die Vier-Stufen-Methode [Sey-60, Sey-66, Sey-68, Sch-05].

Bei der *handlungsregulatorischen Methode* geht es um die Entwicklung innerer Vorstellungen oder Abbildungen einer Arbeitstätigkeit, welche im Folgenden näher erläutert werden. Hierzu existieren mehrere Varianten nach [Sch-05]. Unter den psychoregulativen Trainingsverfahren gibt es das observative, das mentale und das verbale Training. Das observative Training zielt darauf ab, dass bereits beim Zusehen einer Tätigkeit die benötigten Muskelgruppen beansprucht und so unbewusst mittrainiert werden. Beim mentalen Training soll dieser Effekt durch das Vorstellen und beim verbalen Training durch das Mitsprechen beim Durchführen einer Tätigkeit erreicht werden [Roh-74]. Die Methoden sind beim Vor- und Nachmachen in die Vier-Stufen-Methode eingebunden, bspw. durch das Nachsprechen von Tätigkeiten beim Durchführen. Des Weiteren wird unter den handlungsregulatorischen Methoden auch die heuristische Denkhilfe eingeordnet. Hierbei sollen verallgemeinerte Vorgehensweisen für Informations-, Planungs-, Entscheidungs-, Ausführungs-, und Kontrollprozesse mithilfe von heuristischen Regeln entwickelt werden. Ein Beispiel für diese Regeln ist in Tabelle 3.9 aufgeführt. Auszubildende sollen über mehrere Monate dazu befähigt werden vor allem komplexe Arbeitstä-

tigkeiten selbständig planen und ausführen zu können [Höp-83, Höp-91, Hac-93, Son-93]. Es wird deutlich, dass die heuristische Denkhilfe eher im Überschneidungsbereich von psychomotorischen und kognitiven Methoden liegt. Zudem existieren viele Überschneidungen mit der Leittextmethode, welche in Abschnitt 3.3.3.1 erläutert wird.

Tabelle 3.9: Allgemeine heuristische Regeln zur Bewältigung komplexer Arbeitstätigkeiten nach [Höp-83]

-
- 1 Bevor Sie an die Lösung der Aufgabe herangehen, machen Sie sich mit der Ausgangssituation vertraut und beachten Sie die gegebene Zielstellung!
 - 2 Welche konkreten Anforderungen stellt diese Aufgabe an Sie?
 - 3 Ist etwas zu berücksichtigen, was nicht in der Aufgabe angegeben ist?
 - 4 Welche Teilziele sind zu verfolgen?
 - 5 Welche Lösungsmöglichkeiten gibt es?
 - 6 Nutzen Sie alle Informationen, z. B. aus der Umwelt, von Kollegen, in Arbeitsunterlagen!
 - 7 Denken Sie noch einmal nach! Sind dies alle Lösungsmöglichkeiten?
 - 8 Wählen Sie die nach Ihrer Meinung nach günstigste Variante aus!
 - 9 Vergewissern Sie sich, ob die Variante den Aufgabenstellungen gerecht wird!
-

3.3.2.2 Lehrgespräch

Bei einem Lehrgespräch sind Lehrender und Lernender gleichermaßen beteiligt. Es handelt sich hierbei um eine Gruppendiskussion, welche vom Gesprächsleiter geführt und moderiert wird. Nach [REF-76] können maximal 30, besser aber nur bis zu 15 Lernende an einem Lehrgespräch teilnehmen. Ein abgegrenztes Thema wird inhaltlich zur Vermittlung von Wissen im kognitiven Lernbereich behandelt. Zu diesem Thema können alle Teilnehmer jedoch je nach Bedarf und Interesse Fragen stellen oder Beiträge liefern und somit auf die Zielstellung des Lehrgesprächs Einfluss nehmen. Mit dem Lehrgespräch wird eine bestimmte Zielstellung angestrebt, welche in einer vorgegebenen Zeit erreicht werden soll [Bey-67]. Unter der lenkenden Einwirkung eines Gesprächsleiters werden die Kernpunkte des Lerninhalts durch die Teilnehmer und mit den Teilnehmern erarbeitet [Sch-05, S. 103]. Voraussetzung für ein Lehrgespräch ist, dass die Teilnehmer Vorkenntnisse und -erfahrungen für das zu behandelnde Thema haben. Sind diese bei einigen Teilnehmern nicht vorhanden, so kann der Lehrende die benötigten Kenntnisse am Anfang des Lehrgesprächs bspw. durch einen Vortrag vermitteln [Bun-74, REF-76, Pät-93, Bon-99, Mey-10].

3.3.3 Lernerzentriert

Bei lernerzentrierten Methoden stellt der Lehrende lediglich Leitsätze zum Lernen und dem Lerninhalt zur Verfügung. Der Lerner kann den Lernprozess selbst gestalten und strukturieren und ist verstärkt selbsttätig-arbeitend [Sch-05, S. 105].

3.3.3.1 Leittextmethode

Bei der Leittextmethode können Mitarbeiter sich durch das Anwenden von Leitfragen das Thema oder den Lösungsweg selber erarbeiten. Nach der Erarbeitung werden die gewonnenen Erkenntnisse mit dem Lehrenden besprochen, angepasst und anschließend durch die Lernenden ausgeführt. Nach der Ausführung wird diese anhand eines Fragebogens überprüft und mit dem Lehrenden final besprochen [Sch-10b, S. 178]. In Tabelle 3.10 ist der prinzipielle Ablauf der sechs Stufen der Leittextmethode dargestellt. In der ersten Phase können die Lerner sich alleine oder in kleinen Gruppen mit der Arbeitsaufgabe vertraut machen. Grundsätzliche Vorgehensweisen werden anhand von Leitsätzen oder auch Informationsarbeitsblättern zu bestimmten Vorgängen vermittelt. In der Planungsphase sollen die Lernenden den nachfolgenden Arbeitsablauf gedanklich durchgehen und planen. Zudem sollen hier Kontrollfragen und Auswertungskriterien entwickelt werden, mit deren Hilfe nach Beendigung der Tätigkeit ihre korrekte Durchführung geprüft werden soll. In den ersten beiden Phasen benötigen die Lernenden Zugriff auf Fachliteratur und Computer, um selbständig recherchieren zu können. Nachdem die Lernenden die Ausführung geplant haben, wird diese anschließend mit dem Lehrenden besprochen. Hier besteht für den Lehrenden die Möglichkeit das Vorgehen zu korrigieren sowie Wissenslücken der Lernenden zu schließen. Nachdem die Durchführungsplanung vom Lehrenden freigegeben wurde, können die Lernenden die geplante Tätigkeit in der vierten Stufe ausführen. Hierbei steht der Lehrende für Rückfragen zur Verfügung. Nach der Arbeitsdurchführung überprüft der Lernende in der fünften Stufe selbständig anhand der zuvor erstellten Kriterien, ob er die Aufgabe richtig ausgeführt hat. Abschließend wird die Aufgabenerfüllung mit dem Lehrenden in der sechsten Stufe gemeinsam reflektiert, besprochen und durch den Lehrenden bewertet [Rot-92, Bon-99, Sch-05, Rie-13].

Tabelle 3.10: Ablauf der Leittextmethode nach [Sch-05]

Phasen- oder Artikulationsschema	methodische Hilfen
1 Information <i>Was soll getan werden</i>	Leitfragen, Leitsätze bzw. Informationsarbeitsblätter
2 Planung „Wie geht man vor?“	Leitfragen, Arbeitsplan
3 Entscheidung „Festlegen von Fertigungs- bzw. Durchführungsweg und Arbeitsmittel“	Fachgespräch mit dem Lehrenden
4 Ausführung „Erstellen eines Fertigungsprodukts oder Entwickeln einer Dienstleistung“	Rat des Lehrenden bei Bedarf
5 Kontrolle „Ist der Auftrag fachgerecht ausgeführt?“	Kontrollbogen
6 Bewertung „Was ist gut erledigt worden und was muss beim nächsten Mal besser gemacht werden?“	Fachgespräch mit dem Lehrenden

3.3.3.2 Simulations-/Trainingsmethode

Eine Simulation stellt im didaktisch-methodischen Kontext die Nachahmung einer zu trainierenden Situation dar, welche aufgrund von technischen, arbeitsschutzrechtlichen, sicherheitsrelevanten oder wirtschaftlichen Gründen nicht in der realen betrieblichen Situation erlernt werden kann. Ziel ist das Erlangen eines hohen Maßes an Sicherheit, Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Geschwindigkeit in der Ausführung der zu erlernenden Tätigkeit [Hac-93, Bon-99, Sch-05, Thi-16]. Beispiele bilden Flugsimulatoren für Flugzeugkapitäne oder Simulatoren für Chemieanlagen oder medizinische Tätigkeiten. Auch für das Führen schwerer Maschinen oder Schiffe, können Simulatoren zu Trainingszwecken eingesetzt werden [Sch-87]. Simulatoren können auch eingesetzt werden, um die Stillstandszeiten an teuren und komplexen Maschinen durch Trainings zu reduzieren [Hac-93, Bon-99]. Zur Simulations-/Trainingsmethode gehören nach [Sch-05] im weiteren Sinne auch sog. Schein- oder Übungsfirmen, in denen vor allem kaufmännische und verwaltungstechnische Inhalte nachgeahmt werden [Hop-73, Fix-89, Ruf-06]. Zu erlernende Prozesse können zudem innerhalb einer der realen Fabrik nachempfundenen Lernfabrik simuliert werden [Tis-13, Abe-19].

3.3.3.3 Planspiel

Das Planspiel ist mit der Simulations-/Trainingsmethode verwandt. Ziel des Planspiels ist es dem Lerner zu ermöglichen in komplexen und unübersichtlichen Situationen Entscheidungen zu treffen. Es wird eine Situation simuliert, welche so auch in der Realität eintreten könnte. Hierbei werden vom Lerner methodisches Arbeiten sowie ganzheitliches, vernetztes, vorausschauendes und schlüssiges Denken gefordert. Das Planspiel wird daher eher für Führungskräfte eingesetzt [Bun-74, Eis-74, Rei-80, Kli-02, Sch-05, Rie-13].

3.3.3.4 Projektmethode

Bei der Projektmethode wird vor allem die Selbstorganisation der Lernenden in einer praktischen oder theoretischen Projektaufgabe trainiert. Diese erhalten die Aufgabe in einem langfristig geplanten Projekt meist ein physisches und später zu nutzendes Produkt herzustellen. Sie sollen hierbei sowohl im psychomotorischen, im kognitiven als auch im affektiven Lernbereich neue Inhalte erlernen und diese durch Gruppenarbeit über einen längeren Zeitraum verbessern. Zielsetzung, Planung, Ausführung und Beurteilung werden bei der Projektmethode größtenteils durch die Lernenden selbst übernommen. Die Projektmethode wird vor allem in der Berufsausbildung und nur selten in Weiterbildungen genutzt, da sie sehr umfangreich ist [Fis-82, Sch-05, Fre-12, Rie-13].

3.3.3.5 Fallmethode

Bei der Fallmethode gibt der Lehrende lediglich eine komplexe Aufgabenstellung als *Fall* vor, welchen der Lernende selbstständig bearbeitet. Der Fall oder die Problemstellung muss eine Verbindung von Wissen und der Anwendung dieses Wissens erfordern. Er kann dabei vom Lehrenden schriftlich

formuliert worden sein oder mündlich vermittelt werden. Bei der Lösung des Falls sollen bekannte Regeln neu verknüpft werden und auf ein unbekanntes Problem angewandt werden. Die Fallmethode zielt vor allem darauf ab, das analytische Denken zu schulen, welches auch als vierte kognitive Oberkategorie *analyse* in der Taxonomie der Lernziele nach [Blo-56] eingeordnet wird. Die Taxonomie kann Tabelle 3.3 entnommen werden. Das zugrundeliegende Problem des Falls muss analysiert und verstanden werden, um die Lösung entwickeln zu können. Die Umsetzung der Lösung kann, muss aber kein Teil der Fallmethode sein [Bun-74, REF-76, Kai-83, Pät-93, Eul-04, Rie-13].

3.3.4 Lernzeuge

Der Neologismus *Lernzeug* setzt sich aus den beiden Begriffen *Lernen* und *Werkzeug* zusammen [Sel-09, Roe-17]. Lernzeuge sind Objekte, die dem Nutzer ihre Funktionalität automatisch vermitteln. Durch sie können Nutzer mit unterschiedlichen Qualifikationsniveaus und Sprachkenntnissen intuitiv und selbstständig den Umgang mit neuartigen Produktionsmaschinen und -prozessen erlernen [Sel-12a] nach [Sel-09, S. 91-98]. Ein Ziel in der Anwendung von Lernzeugen besteht darin, durch den optionalen Einsatz von IKT die Lern- und Lehrproduktivität zu erhöhen. Der Einsatz von IKT ermöglicht nach [Bai-89, S. 191] die Nutzung von Equipment, welches flexibel in seiner Funktion ist. Der Nutzer wird angeregt, selbst zu denken, um das Equipment und seine Funktionsweise zu verstehen. Dies erhöht den kognitiven Anteil des Lernprozesses, welcher von traditionellen Trainingsmethoden kaum beachtet wird, da diese sich auf die Automatisierung eines bestimmten Verhaltens konzentrieren. Lernzeuge können sowohl kognitive als auch psychomotorische Fertigkeiten und Inhalte vermitteln. Bei den bisher entwickelten Lernzeugen steht jedoch primär die Vermittlung kognitiver Inhalte im Vordergrund. Erste Ansätze zur Gestaltung von Lernzeugen stellten vor allem die Erhöhung der Vermittlungsaktivitäten des Nachhaltigkeitsgedankens in den Vordergrund [Sel-09, McF-13, Mus-15, Roe-17]. Als Hebel zur Verbesserung der Nachhaltigkeit dient die Produktionstechnik, daher wurden bisher nur Lernzeuge im produktionstechnischen Kontext entwickelt. Zudem wurden nur wenige Lernzeug-Prototypen realisiert, eine industriell genutzte Anwendung existiert bisher nicht. Da unterschiedliche Definitionen des Begriffs Lernzeug, engl. *Learnstrument*, vorliegen und diese je nach Anwendungskontext variieren, wird im Folgenden zunächst ein Überblick über die bisher entwickelten Lernzeuge mithilfe von Beispielen gegeben. Anschließend wird der Begriff des Lernzeugs im Kontext der vorliegenden Arbeit interpretiert und es wird verdeutlicht, welche Eigenschaften ein zum Lernen genutztes Werkzeug haben muss, um als Lernzeug deklariert zu werden.

Bisher entwickelte Lernzeuge vermitteln entweder kognitives Wissen [Mus-15] oder selten auch eine Mischung aus kognitivem Wissen und psychomotorischen Fertigkeiten [McF-13, Pos-13]. Zu den Lernzeugen, welche nur kognitives Wissen vermitteln, können auch die sogenannten intelligenten Tutorensysteme (*Intelligent Tutoring Systems*) (ITS) gezählt werden. Ein ITS ist ein Computersystem, das darauf abzielt, den Lernenden unmittelbare und individuelle Anweisungen oder Feedback zu geben [Pso-88]. Erste Versionen von ITS bestanden aus mechanischen Maschinen. So war das erste 1924 entwickelte ITS ein Kasten, der Studierenden Fragen anzeigte und ihnen sofort ein Feedback gab, ob ihre Antwort richtig war [Fry-60]. Spätere ITS-Versionen sind rein computergestützt. Ein ITS zielt in der Regel darauf ab, die nachgewiesenen Vorteile des individuellen, personalisierten Unterrichts in

Kontexten zu replizieren, in denen die Lehrenden ansonsten mehrere Schüler gleichzeitig unterrichten müsste oder wo gar kein Lehrender existiert [Van-11].

Die in Abbildung 3.5 dargestellte *Cubefactory* wurde entwickelt, um ein Verständnis für geschlossene Materialkreisläufe zu vermitteln. Es handelt sich hierbei um ein Lernzeug zur Vermittlung primär kognitiver Inhalte. Mithilfe eines interaktiven Lernmoduls auf einem Touchmonitor werden dem Nutzer schrittweise Ablauf sowie Vor- und Nachteile der Linearwirtschaft erläutert, bei welcher Produkte am Ende ihres Lebens entsorgt werden. Anschließend werden geschlossene Materialkreisläufe sowie ihre Vor- und Nachteile, vor allem in Bezug auf Nachhaltigkeitsaspekte, vorgestellt. Als Visualisierungselemente werden Texte, Bilder und Filme verwendet. Geschlossene Materialkreisläufe können am Beispiel der Cubefactory selbst erlebt werden. Hierzu ist jedoch die Unterstützung eines fachkundigen Experten erforderlich, welcher den Umgang mit den einzelnen im Folgenden vorgestellten Komponenten erläutert. In die Cubefactory wurde ein 3D-Drucker integriert, welcher Produkte aus unterschiedlichen Kunststofffilamenten additiv herstellen kann. Wird das gedruckte Produkt nicht mehr benötigt oder ist es defekt, kann es mithilfe eines in die Cubefactory integrierten Schredders zerkleinert und anschließend in einem Extruder zu neuem Filament verarbeitet werden. Dieses Filament kann dem 3D-Drucker wieder als Werkstoff zugeführt werden. Somit wird ein geschlossener Materialkreislauf geschaffen. Die energetische Versorgung kann mithilfe von Solar- und Batteriezellen oder durch einen Anschluss an das Stromnetz realisiert werden.



Abbildung 3.5: Cubefactory ©TU Berlin, PR, Ulrich Dahl

Der in Abbildung 3.6 dargestellte *Smart Assembly Workplace (SAW)* adressiert neben der psychomotorischen Vermittlung von Montagevorgängen vor allem höhere Lernziele der kognitiven Domäne nach [Blo-56]. Ziel der Nutzung dieses Lernzeugs ist die Befähigung des Nutzers zur Anwendung von Methods-Time Measurement (MTM), einem System, welches zur Arbeitszeitermittlung und Planung von Arbeitsplätzen genutzt wird. Mithilfe einer Kamera wird detektiert, ob der Nutzer mit seinen Händen die für den Arbeitsvorgang erforderlichen Positionen eingenommen hat. Bei korrekter Position wird auf einem Monitor der nächste Arbeitsschritt als statische Printanleitung dargestellt, welche aus in Vogelperspektive aufgenommenen Bildern und erklärenden Texten besteht. Die Art der Darstellung kann vom Nutzer nicht angepasst werden. Bei fehlerhafter Position der Hände wird der Nutzer auf diese hingewiesen und muss den Arbeitsschritt wiederholen. Neben der Darstellung von Arbeitsanweisungen werden Codes aus dem MTM-System bei jedem Arbeitsvorgang eingeblendet. Der Nutzer soll so nach und nach erkennen, welche Bewegungen zu den jewei-

ligen MTM-Codes führen und ein erstes Systemverständnis gewinnen. Dieses kann durch ein autodidaktisches Studium des MTM-Systems auf einem Lernmodul vertieft werden, welches in den SAW integriert ist [McF-13, Pos-13].



Abbildung 3.6: Smart Assembly Workplace (SAW) nach [McF-13, Pos-13, Mül-16a]

Lernzeuge zur Vermittlung rein psychomotorischer Fertigkeiten sind kaum bekannt. Die Verbindung psychomotorischer und kognitiver Lernbereiche sowie Rückmeldung/Feedback über die Qualität der vom Nutzer durchgeführte Aufgabe wird nur selten adressiert wie beim SAW [Mül-16a]. Nach Hacker existiert jedoch kein Lernfortschritt ohne Rückmeldung [Hac-93, S. 160]. Damit diese Rückmeldungen in Lernprozessen einen positiven Lerneffekt erzielen, dürfen weder Verzerrungen noch Verzögerungen zugelassen werden [Hac-93, S. 162]. Rückmeldungen müssen also direkt nach einer Handlung erfolgen. Mit steigendem Lernfortschritt wird der Umfang der benötigten und eintreffenden Rückmeldungsinformation geringer [Hac-93, S. 162]. Basierend auf den existierenden Lernzeugen und den zugehörigen Veröffentlichungen konnten folgende Lernzeugeigenschaften identifiziert werden:

- *Erhöhung der Lern- und Lehrproduktivität* [Sel-09]: Durch die Anwendung von Lernzeugen soll die zum Erlernen von Inhalten benötigte Zeit gesenkt oder die Menge des erlernbaren Inhalts pro Zeit erhöht werden. Zum Vergleich können konventionelle Vermittlungsmethoden wie in Abschnitt 3.3.1 bis 3.3.3 beschrieben genutzt werden.
- *automatische Vermittlung der eigenen Funktionalität gegenüber dem Nutzer* [Sel-09]: Der Nutzer wird vom Lernzeug angeleitet wie er es zu benutzen hat. Dies kann entweder durch einleitende Texte, Visualisierungen oder auditive Inhalte vermittelt werden. Der Nutzer soll durch eine nutzerfreundliche Gestaltung in die Lage versetzt werden, das Lernzeug ohne die Hilfe einer anderen Person bedienen zu können.
- *Verbindung tangibler und intangibler Elemente* [Sel-09]: Neben der automatischen Vermittlung der eigenen Funktionalität gegenüber dem Nutzer sollen Lernzeuge tangible, also physische, und intangible, also digitale und virtuelle, Elemente beinhalten.

- *Nutzung von IKT* [Sel-09]: Mithilfe von IKT können tangible Elemente und ihre Zusammenhänge besser beschrieben werden oder wie im Beispiel der Cubefactory [Mus-15] können tangible Komponenten die mithilfe eines intangiblen Wissensmoduls vermittelten kognitiven Inhalte praktisch veranschaulichen. IKT wird in diesem Zusammenhang genutzt um alle vom Lernzeug zu erbringenden Aufgaben miteinander zu verbinden und den Lerninhalt zu vermitteln.
- *Sprachreduzierung* [Sel-09]: Es sollte versucht werden, möglichst wenig sprachliche Elemente zu integrieren, um ein zeitintensives Lesen zu vermeiden und Übersetzungskosten im internationalen Anwendungsbereich zu reduzieren. Hierbei muss allerdings auf kulturell geprägte Aspekte von Farben und Symbolen geachtet werden [Men-16].
- *Aufzeigen adäquater Lernziele* [Men-18c]: Lernzeuge sollen adäquate Lernziele aufzeigen und dem Nutzer zu Beginn vermitteln, welche Inhalte in welcher Form gelernt werden sollen.
- *Interaktivität* [Sel-09]: Eine hoher Grad an Interaktivität erlaubt es dem Lerner aktiv den Lernprozess zu erleben [Rey-07] und in einem ständigen Austausch mit dem Lernzeug den Lernprozess zu gestalten.
- *effektive und effiziente Unterstützung im Erreichen der Lernziele* [Men-18c]: Die Forderung nach einer effektiven und effizienten Unterstützung im Erreichen von Lernzielen kann als Erfüllungsgrad der zuvor beschriebenen Lernzeugeigenschaften interpretiert werden.

Lernzeuge ermöglichen bisher entweder eine Kombination aus Lern- und Arbeitsplatz, also arbeitsgebundenem Lernen nach [Deh-92, Deh-07] oder arbeitsorientiertem Lernen nach [Deh-92, Deh-07], bei welchem Lern- und Arbeitsort räumlich vollständig voneinander getrennt sind. Beispiele für arbeitsgebundenes Lernen bilden Cubefactory und SAW, das 3D-gedruckte oder montierte Produkt entsteht direkt am Lernort. Beispiele für arbeitsorientiertes Lernen bilden das Windlabor aus Abbildung 3.7 und die Solarladestation aus Abbildung 3.8 nach [Pal-17]. Beide bieten Studierenden die Möglichkeit in universitärem Umfeld die Prinzipien der Windenergie- bzw. der Solarenergieerzeugung mithilfe tangibler Artefakte zu erlernen. Beide Lernzeuge geben IKT-gestützt Auskunft über Parameter, welche die Stromerzeugung beeinflussen. Somit können die Auswirkungen von experimenteller oder regelbasierter Parameteranpassungen praktisch erlebt werden.



Abbildung 3.7: Windlabor [Pal-17]



Abbildung 3.8: Solarladestation [Pal-17]

Tabelle 3.11 gibt einen beispielhaften Überblick über existierende Lernzeuge und den Grad der Erfüllung der Lernzeugdefinition. Zur Übersicht wurden auch die in dieser Arbeit entwickelten Lernzeuge auf der rechten Seite integriert. Tabelle F.1 im Anhang gibt einen Überblick über alle bisherigen Veröffentlichungen zu Lernzeugen.

Tabelle 3.11: Beispielhafte Übersicht existierender Lernzeuge

	Cubefactory [Mus-15]	SAW[McF-13, Pos-13]	Windlabor [Pal-17]	Solarladestation [Pal-17]	Mobile Lernumgebung [Mül-17]	3D-PDF	AR/VR-App	HoloLens Steckdosenmontage	HoloLens MAN ES
Erhöhung der Lern- und Lehrproduktivität	●	●	●	●	●	●	●	●	●
automatische Vermittlung der Funktionalität	◐	◐	◐	◐	◐	●	●	●	●
intangibel	●	●	●	●	●	●	●	●	●
tangibel	●	●	●	●	○	◐	●	●	●
Nutzung von IKT	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Sprachreduzierung	◐	◐	◐	◐	◐	●	●	●	●
Aufzeigen adäquater Lernziele	◐	◐	◐	◐	●	◐	◐	◐	◐
effektive und effiziente Lernzielerreichung	◐	●	●	●	●	●	●	●	●
Wurden Nutzertests durchgeführt?	◐	●	●	●	◐	●	●	●	●
Vergleich mit anderen Lernmethoden durchgeführt?	◐	◐	◐	◐	◐	●	●	◐	◐
Adressierung des kognitiven Lernbereichs	●	●	●	●	●	◐	◐	◐	◐
Adressierung des psychomotorischen Lernbereichs	○	◐	◐	◐	○	●	●	●	●

Legende: ● voll erfüllt, ◐ größtenteils erfüllt, ◑ zur Hälfte erfüllt, ◒ teilweise erfüllt, ○ nicht erfüllt

4 Visualisierungstechnologien

Trotz zunehmender Digitalisierung verwenden nach einer Umfrage aus 2014 durchschnittlich 70 % der deutschen Unternehmen schriftliche und textuelle Trainingsunterlagen, 45 % nutzen Darstellungen und Zeichnungen und lediglich 13 % integrieren digitale Technologien [McK-14, S. 13]. Bei einer weiteren Umfrage aus demselben Jahr zeigt sich jedoch auch, dass deutsche Unternehmen interaktive, dynamische und digitale Medien stärker integrieren möchten. Die Anzahl der Unternehmen, welche digitale Medien zukünftig stärker einsetzen wollen, wächst weltweit stetig [Gus-16]. Durch digitale Produktabbildung und ihr Interaktionspotenzial in der digitalen Fabrik ergeben sich neue Anwendungsfelder. Diese können einen erheblichen Produktivitätsgewinn entlang der Wertschöpfungskette erzielen, wodurch sie die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen nachhaltig steigern [Sch-11].

Diese digitalen Medien können Lehrende in der Wissensvermittlung unterstützen und stellen einheitliche Informationen für nahezu beliebig viele Lernende zur Verfügung [Rie-13, S. 184]. Hierdurch und durch kostengünstige Vervielfältigungsmöglichkeiten lassen sich einheitliche Bildungsangebote nicht nur für Einzelpersonen, sondern auch für sehr große Gruppen von Lernenden realisieren [Rie-13, S. 184]. Zudem speichern Medien Informationen und unterstützen durch ihre beliebige Abrufbarkeit die Flexibilisierung von Lernprozessen. Die gezielte Informationsbereitstellung ermöglicht zudem eine individuelle Förderung der Lernenden. Dies wird auch durch die Ausgestaltung unterschiedlicher Medien-Repräsentationsformen eines Lerngegenstandes möglich. Im Allgemeinen übernehmen Medien Lehrfunktionen dort, wo sie Lehrende im Lehr-Lernprozess entlasten und Lernenden die mediengeleitete und eigenaktive Arbeit an einem Lernobjekt übertragen [Rie-13, S. 184].

Medien enthalten meist visuelle oder auditive Elemente. Simulatoren, welche in Abschnitt 3.3.3.2 näher beschrieben werden, trainieren zudem den *kinästhetischen* Sinn, welcher die Bewegungsempfindung beschreibt. Den Geruchssinn betreffende, *olfaktorische*, und den Geschmackssinn betreffende, *gustatorische*, Elemente sind auch möglich, finden aber kaum Anwendung. Im Folgenden wird vor allem die visuelle Komponente betrachtet, da die Art der visuellen Darstellung einen großen Einfluss auf die Qualität der Wissensvermittlung ausübt [Ben-01, Sch-15a] und bestehende Unterlagen meist primär visuelle Wissensvermittlung nutzen. Da das Ansprechen mehrerer Sinne den Lernerfolg erhöhen kann [Ben-01, Sch-15a], werden in der Implementierung der entwickelten Inhalte zusätzlich akustische und kinästhetische Elemente integriert.

Durch technologische Entwicklung entstehen neue Visualisierungstechnologien, welche unterschiedlich klassifiziert und eingeordnet werden können. Der New Media Consortium (NMC) Horizon Report [Joh-16] definiert Visualisierungstechnologien als Technologien, welche die inhärente Fähigkeit des Gehirns ansprechen, visuelle Informationen schnell zu verarbeiten, Muster zu erkennen und in komplexen Situationen eine Struktur wahrzunehmen. Mithilfe dieser Technologien können große Datensätze erhoben und dynamische Prozesse untersucht sowie generell Komplexes vereinfacht werden [Joh-16, S. 35]. Zu ihnen zählen: Augmented und Virtual Reality, 3D-Druck/Rapid Prototyping, visuelle Datenanalyse, Informationsvisualisierung, volumetrische und holografische Displays [Joh-16]. [Wie-03] un-

terteilt Visualisierungstechnologien in der Montage nach dem Grad der Computer-Unterstützung wie in Abbildung 4.1 zu erkennen ist. Hierbei werden jedoch lediglich die Technologien Computer, Datenbrillen (*Head-Mounted-Displays*) (HMDs) und erweiterte Realität (*Augmented Reality*, AR) angesprochen.

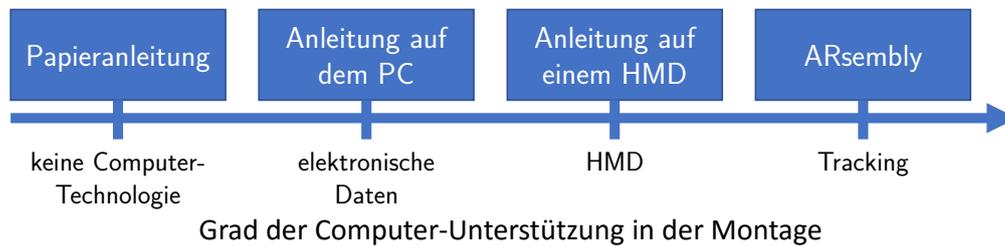


Abbildung 4.1: Medienklassifizierung für die Montage nach [Wie-03]

Neben dem Grad der Computer-Unterstützung können Visualisierungstechnologien auch nach dem Maß der möglichen Interaktivität [Rey-07] oder der Immersion sowie der kognitiven Distanz unterteilt werden. Der Begriff der kognitiven Distanz wird später am Beispiel von AR in Abschnitt 4.5 näher erläutert. Für die vorliegende Arbeit wurden beispielhafte Visualisierungstechnologien gewählt, welche sich in den vier Kategorien Computer-Unterstützung, Interaktivität, Immersion und kognitive Distanz jeweils unterscheiden. Der Grad an Computer-Unterstützung sowie das Maß der Interaktivität und Immersion nehmen von der zuerst vorgestellten zur zuletzt genannten Technologie zu. Ein differenzierter Vergleich der Visualisierungstechnologien wird in der Methodenkonzeption ab Seite 66 vorgenommen. Die zu untersuchenden Visualisierungstechnologien bilden: *Print*, *Video*, *Bildschirmanimation* sowie *Virtual* und *Augmented Reality*. Sie werden im Folgenden näher betrachtet und ihre Vor- und Nachteile dargelegt.

4.1 Print

Printanleitungen sind vor allem in kleinen und mittelständischen deutschen Unternehmen weit verbreitet, da sie kostengünstig bereits mit grundlegenden Kenntnissen in Textsatzprogrammen oder auch nur handschriftlich schnell erstellt werden können. Liegen die Printanleitungen ausgedruckt an Arbeitsplätzen, wird ihre Aktualität selten überwacht. Erneute Ausdrücke aufgrund von kleinen Änderungen führen zu Kosten und Umweltbelastungen. Oft werden daher nur größere Revisionen gedruckt. In Einzelfällen kann es vorkommen, dass neue Mitarbeiter veraltete Anleitungen benutzen, was zu Montagefehlern führt. Printanleitungen können vollständig textuell sein oder vollständig aus Bildern bestehen und somit sprachunabhängig sein wie bspw. die Montageanleitungen eines schwedischen Möbelkaufhauses [Jun-08]. Komplizierte Vorgänge lassen sich oft schwer allein durch Text beschreiben [Bec-15] wie das Binden eines Schnürsenkels. Bei Anleitungen, welche vollständig aus Bildern bestehen, kann es dazu kommen, dass Bilder oder Symbole durch das Fehlen von Textelementen missinterpretiert werden. Daher bestehen Printanleitungen meist aus Mischformen von Bild und Text wie in Abbildung 4.2. Printanleitungen können nicht nur ausgedruckt, sondern auch digital vorliegen, bspw. als portables Dokumentenformat (*Portable Document Format*, PDF). Hierdurch erhöht sich die Interaktivität und es ist einfacher die Inhalte aktuell zu halten.

<p>Benötigte Dokumente Werkmontagezeichnung Zeichnung Montagevorrichtung</p>	<p>Werkzeuge: Gewindeschneider Hilfsmittel: Rundschnitten, Adapter für KRK, Adapterplatte für KRK, Montagevorrichtung, 2 Schächer, MOLYKOTE G-Rapid Plus</p>
	<ol style="list-style-type: none"> 1 Gewindelöcher in der Adapterplatte für Kohleringdichtung ggf. mit Gewindeschneider von Farbe befreien. 2 Adapterplatte für Kohleringdichtung an Kohleringdichtung schrauben, Schrauben festziehen. 3 Adapter für Kohleringdichtung an Adapterplatte für Kohleringdichtung anschrauben. 4 Für Leichtgängigkeit der Montagevorrichtung Spanning innen mit MOLYKOTE bestreichen. 5-6 Montagevorrichtung mit Kran anheben.
<p>MAN Montageanleitung</p>	<p style="text-align: right;">Kohleringdichtung</p>

Abbildung 4.2: Beispiel für eine Printanleitung bei MAN Energy Solutions SE *eigene Darstellung*

Im Folgenden wird näher auf die visuellen Elemente von Printanleitungen eingegangen. Es existieren unterschiedliche Arten wie visuelle Elemente in Printunterlagen integriert werden können. Hierbei kann zwischen fotografischen und künstlich erzeugten digitalen Abbildungen unterschieden werden [Meh-15]. Digitale Abbildungen werden für Montageanleitungen meist aus Computer-Aided Design (CAD)-Dateien gewonnen [Wöh-15]. Abbildung 4.3 gibt einen Überblick über unterschiedliche Darstellungs-

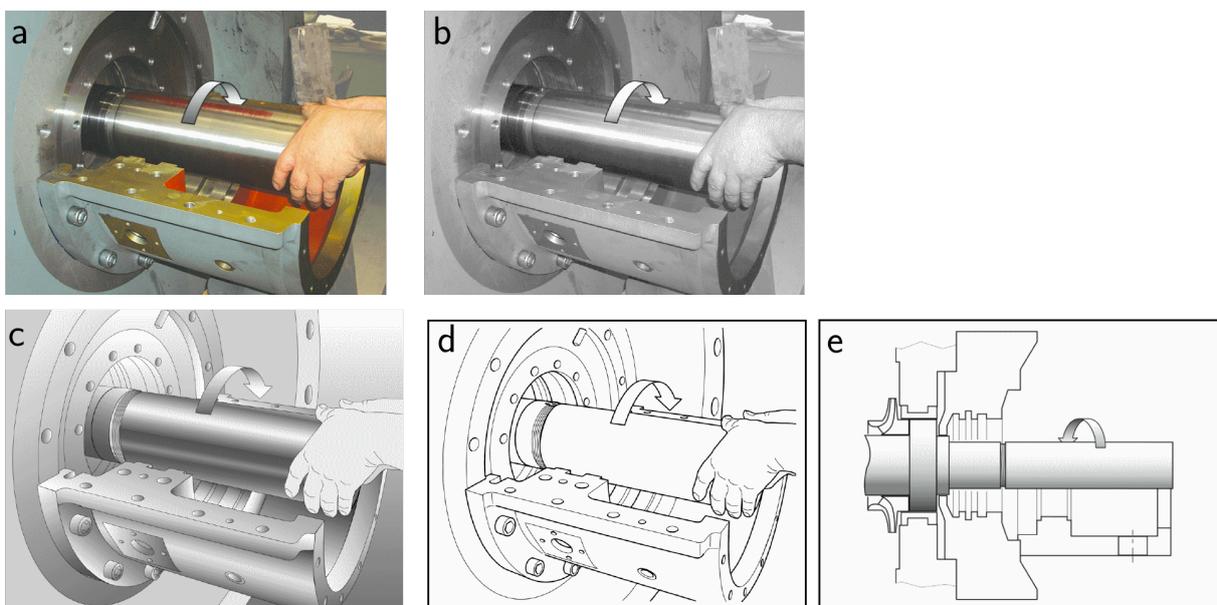


Abbildung 4.3: Fünf Typen von Abbildern eines Objektes: (a) Farbfoto, (b) Schwarz-Weiß-Foto, (c) Texturbild, (d) Strichbild, (e) Schemabild [Bal-05]

formen bei der Montage eines Einwellenkompressors. Es muss für den jeweiligen Anwendungsfall individuell entschieden werden, ob detailreiche Fotografien oder auf das Wesentliche reduzierte CAD-Abbildungen genutzt und wie diese jeweils ausgestaltet werden sollen. Vorteile von Printanleitungen bilden der geringe Erstellungsaufwand und die einfache Visualisierung ohne den Einsatz von IKT. Nachteilig ist jedoch, dass der Interpretationsaufwand aufgrund der geringen Interaktivität meist sehr hoch ist. Da diese Visualisierungsart vollständig statisch ist, können Montagebewegungen nur abstrahiert dargestellt werden und somit je nach Abstraktionsgrad und Aufbereitungsaufwand zu Fehlinterpretationen des Anwenders führen.

4.2 Video

Bei einer Videoanleitung werden Schulungsinhalte zunächst gefilmt. Anschließend können diese nachbearbeitet und durch digitale Inhalte ergänzt werden. Nutzer können die Filme dann über einen Monitor oder ein Mobilgerät abrufen. Mithilfe von Videos kann der zu erlernende Arbeitsablauf realitätsnah dokumentiert und wiedergegeben werden. Zur Erstellung einer Videoanleitung werden die Stufen *Planung*, *Dreh*, *Bearbeitung*, *Produktion*, *Lektorat*, *Übersetzung* und *Distribution* durchlaufen [Kis-15]. Videoanleitungen sind meist linear, da die Filmsequenzen nacheinander ablaufen. Der Utility-Film, welcher auch als Hypervideo bezeichnet werden kann, bildet eine Sonderform der Videoanleitung, welche als nichtlinear angesehen werden kann [Löf-08]. Abbildung 4.4 zeigt eine Sequenz eines Utility-Films, in welcher die Auswahlmöglichkeiten für den weiteren Verlauf des Films visualisiert sind. Bei einem Utility-Film werden kurze Videosequenzen von ca. 3-5 Sekunden mithilfe von Hy-



Abbildung 4.4: Beispiel für einen Utility-Film [Sch-15b]

pertext Markup Language (HTML) miteinander verknüpft. Hierdurch werden Verzweigungen im Ablauf möglich. Existieren mehrere Bauteilvarianten kann der Anwender innerhalb der Video-Anleitung die jeweilige Bauteilvariante auswählen und somit dieser Ablaufverzweigung folgen [Löf-08]. Die Erstellungszeit eines Utility-Films beträgt je nach Arbeitsumfang der Montagevorgänge im Durchschnitt ca. 16-20 Stunden [Kis-15]. Vorteil von Videoanleitungen bildet die leichte und intuitive Bedienbarkeit vor allem bei linearen Montagevorgängen. Mithilfe von IKT können zudem Elemente anderer Visualisierungsformen wie Bilder, Texte oder Animationen eingeblendet werden. Arbeitsabläufe können aus Sicht des Anwenders gefilmt und daher von diesem leicht nachvollzogen werden. Verglichen mit einer Printanleitung ist der Erstellungsaufwand für eine Videoanleitung jedoch deutlich höher. Anders als bei Printanleitungen wird zudem teures Kameraequipment für die Filmproduktion sowie Software für den Schnitt benötigt. Im Gegensatz zu CAD-basierten Printanleitungen müssen Produkt und Montageplatz bereits existieren, um einen Film erstellen zu können. Wird wie in der Serienproduktion oft üblich nur an einem Montagearbeitsplatz produziert, ist die Erstellung eines Films relativ einfach realisierbar. Handelt es sich jedoch um eine Unikatmontage mit mehreren Montagearbeitsplätzen, welche nur einmalig durchgeführt wird, steigt der Erstellungsaufwand.

4.3 Computeranimation

Neben fotografischer und videobasierter Aufzeichnung können Arbeitsabläufe basierend auf digitalen CAD-Dateien nicht nur in Standbildern wie bei einer Printanleitung, sondern auch animiert auf zweidimensionalen Displays wiedergegeben werden. Weitere Wiedergabemöglichkeiten und -geräte für animierte Inhalte werden in den nachfolgenden Abschnitten vorgestellt.

Die während des Produktdesignprozesses generierten CAD-Dateien bilden die Grundlage für alle im Folgenden vorgestellten Technologien. Sie bieten die Möglichkeit, den dargestellten Inhalt nicht nur bei der Erstellung, sondern auch bei der Nutzung interaktiv zu manipulieren. Erzeugen von Bauteilschnitten, Betrachten von Objekten aus unterschiedlichen Blickwinkeln oder Ansichten, Ändern von Beleuchtung oder Anzeigen von Objekteigenschaften können ohne großen Aufwand visualisiert werden. Wird die Montage der Bauteilkomponenten zusätzlich animiert, können diese Manipulationen oft auch beim Ablaufen der Animation genutzt werden. Dieser hohe Grad der Interaktivität ist bei Printanleitungen und Videos nicht möglich. Dort kann der Anwender lediglich die vom Ersteller vorgegebenen Darstellungen nutzen.

Eine besondere Möglichkeit CAD-Dateien innerhalb von Montageanleitungen zu nutzen, bilden sogenannte 3D-PDFs [Kum-08, Kol-09, Men-17]. Das nach [DIN15930] frei verfügbare PDF-Format ermöglicht eine intuitive Interaktion mit den CAD-Inhalten. PDF-Dokumente stellen zudem keine hohen technologischen oder softwarebezogenen Anforderungen an Abspielgeräte und können mit dem frei verfügbaren Adobe Reader geöffnet werden. Der Erstellungsaufwand ist jedoch größer als bei Videoanleitungen. Zur Erstellung von Animationen sowie für ein eigenes Layout werden Programmierfertigkeiten vor allem in JavaScript benötigt. Statt wie bei Videoanleitungen Inhalte neu zu filmen und in einen bestehenden Film zu integrieren, können bei Computeranimationen digitale Inhalte meist einfacher ausgetauscht werden. Abbildung 4.5 zeigt ein 3D-PDF für die Montage einer Kohleringdichtung des Sondermaschinenbauherstellers MAN Energy Solutions SE.

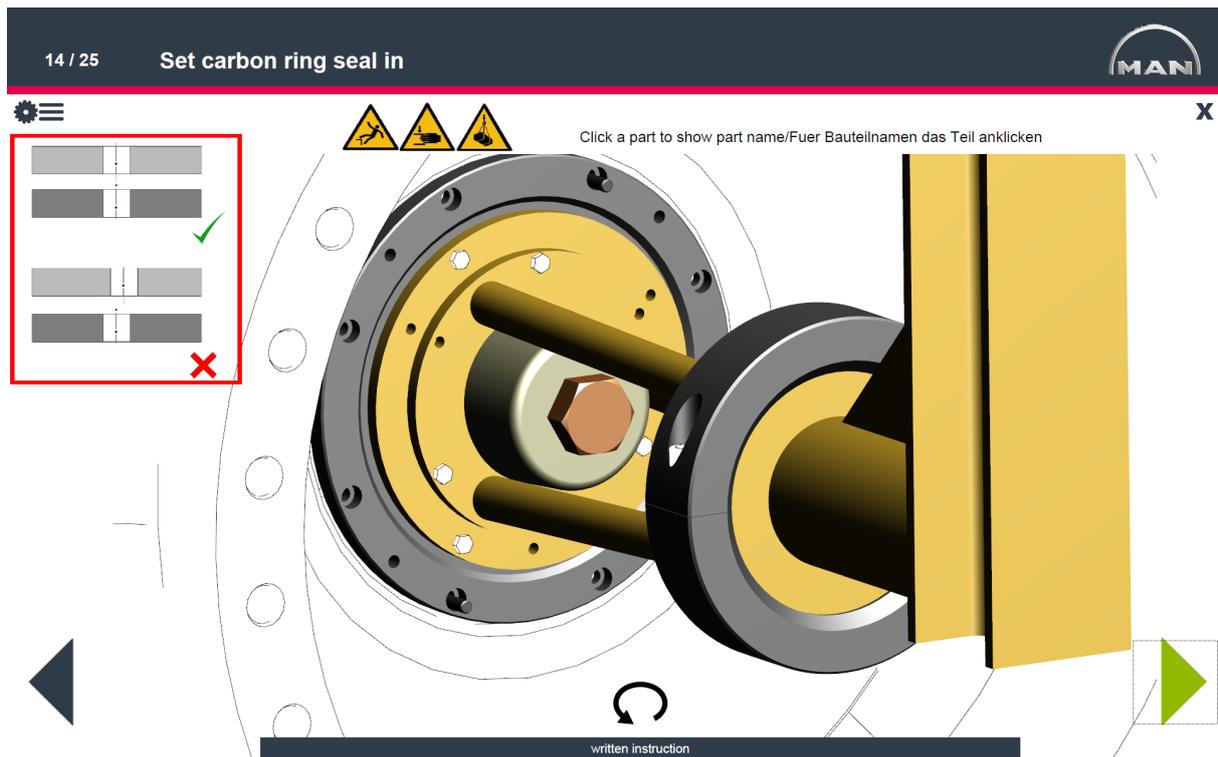


Abbildung 4.5: Beispiel für eine Computeranimation innerhalb eines 3D-PDFs für die Montage einer Kohleringdichtung bei MAN Energy Solutions SE *eigene Darstellung*

4.4 Virtual Reality

Die virtuelle Realität (*Virtual Reality*, VR) ist eine immersive, realistische, dreidimensionale und simulierte Umgebung, welche mit interaktiver Soft- und Hardware durch die Bewegungen des Körpers wahrgenommen oder gesteuert wird [Mil-94, Dör-13, Bor-15]. Abbildung 4.6 zeigt eine VR-Simulation. Die Umgebung außerhalb der Simulation wird hierbei meist vollständig ausgeblendet. Je nach Immersion, also dem Maß in dem der Nutzer in die virtuelle Simulation integriert wird, können neben der visuellen Wahrnehmung auch weitere Sinne in VR angesprochen werden. Je weniger der Nutzer einen Unterschied zwischen simulierter und physischer Umgebung erkennen kann, umso höher ist die Immersion. Zu den weiteren Sinnen, welche mithilfe von VR angesprochen werden können, zählen nach [Dör-13]:

- das Hören, *auditive Wahrnehmung*,
- das Riechen, *olfaktorische Wahrnehmung*,
- das Schmecken, *gustatorische Wahrnehmung*,
- das Erfühlen, *haptische Wahrnehmung*,
- und als Teile des Erfühlens auch das Tasten, *taktile Wahrnehmung*,
- der Gleichgewichtssinn, *vestibuläre Wahrnehmung*,
- die Körperempfindung, *Propriozeption*,
- das Temperaturgefühl, *Thermozeption* sowie
- die Schmerzempfindung, *Nozizeption*.

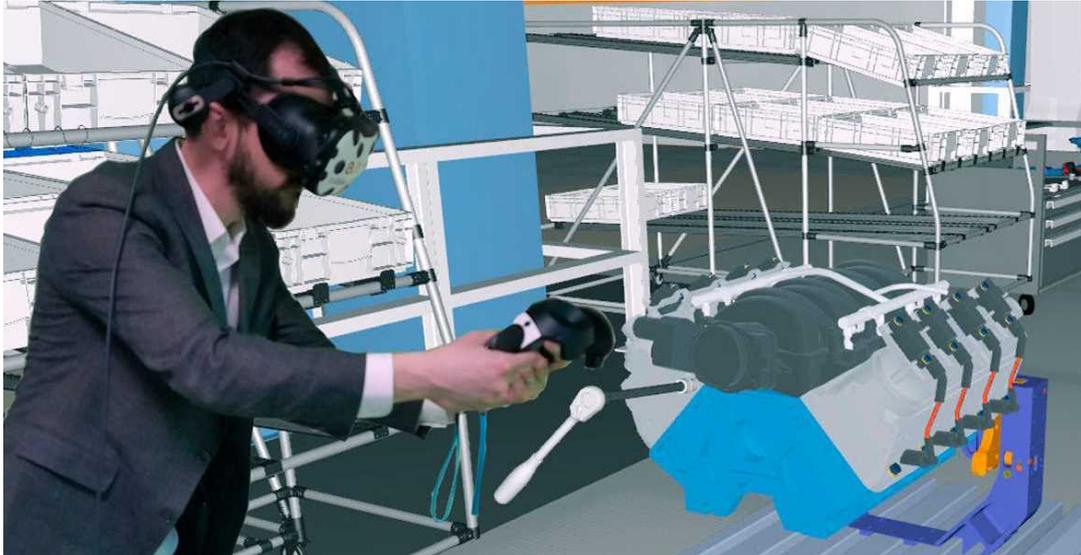


Abbildung 4.6: Beispiel für eine VR-Anleitung [ESI-19]

Nachdem 1964 mit *Sketchpad* [Sut-64] eine der ersten interaktiven Grafikanwendungen entwickelt wurde, entstand 1968 die erste Datenbrille (*Head-Mounted-Display*, HMD) [Sut-68]. Diese beiden bilden zusammen die erste Form von VR. HMDs erhöhen die Immersion, da die Augen vollständig bedeckt werden und nur die simulierte Umgebung angezeigt wird. Erst 1992 wurde eine *Cave Automatic Virtual Environment* (CAVE) vorgestellt. Bei einer CAVE werden 3D-Bilder auf den Projektionsebenen/Außenwänden des CAVE-Würfels abgebildet. In der Mitte der Projektionsebenen steht der Anwender [Cru-92].

Die Betrachtung virtueller Inhalte kann also entweder *exozentrisch* auf einem Bildschirm oder in einer CAVE oder *egozentrisch* auf einem HMD erfolgen. Die egozentrische Betrachtungsweise wird oft auch als immersiv bezeichnet. Neben einem HMD erhöhen Kopfhörer oder handgeführte Steuergeräte die Immersion [Mil-94], welche manchmal auch als Telepräsenz oder virtuelle Präsenz bezeichnet wird [Ste-92]. Haptische Interaktionselemente wie omnidirektionale Laufbänder erlauben es, ein Laufen im simulierten Raum vorzutäuschen, ohne das Laufband verlassen zu müssen [Sch-08b]. Die Entwicklung des Oculus Rift-HMDs erlaubte 2012 erstmals eine kostengünstige Nutzung von VR-Inhalten, die Brille kostete nur 599 Dollar [Küh-16]. Neben spielerischen Anwendungen wird VR auch für die Visualisierung von Produkten oder für das Erlernen von Montagevorgängen genutzt. Größte Vorteile bilden hierbei das Training an noch nicht realisierten Maschinen und die Simulation personengefährdender Abläufe ohne Verletzungsrisiko. Zu den weiteren Potenzialen von VR-Training zählen unter anderem nach [Wal-07]:

- realitätsnahe Abbildung komplexer Systeme,
- intuitive und interaktive Einbindung des Menschen,
- Vermittlung prozeduraler Fertigkeiten ohne Störung der laufenden Produktion,
- Training und Analyse von noch nicht realisierten oder aufwändigen Prozessen,
- Verkürzung der Trainingszeiten,
- Schulung und Simulation personengefährdender Abläufe,
- höhere Motivation durch Spielcharakter der VR-Umgebung und
- VR als Kommunikationsgrundlage für interdisziplinäre Teams und Hierarchieebenen.

Beim Tragen von HMDs kann es vorkommen, dass dem Nutzer visuell andere Informationen vermittelt werden, als durch seinen Gleichgewichtssinn. Dies tritt auf, wenn auf dem HMD eine Vorwärts- oder Seitwärtsbewegung gezeigt wird, der Nutzer jedoch physisch seine Position nicht verändert. Ein weiteres Beispiel hierfür ist die zeitliche Verzögerung/Latenz zwischen einer Eingabe an einem Bediengerät und der Darstellung in VR. Beide Beispiele können dazu führen, dass dem Nutzer nach kurzer Tragzeit des HMDs übel wird. Wie stark die Latenz das Übelkeitsempfinden beeinflusst, ist von Mensch zu Mensch unterschiedlich [LaV-00]. Weitere Einschränkungen von VR-Training bilden nach [Wal-07]:

- hoher Berechnungsaufwand für komplexe VR-Modelle,
- hohe Anschaffungskosten immersiver Systeme,
- unzureichend ergonomische Gestaltung der Benutzerschnittstellen,
- schwer zu quantifizierender Nutzen und Aufwand durch den Einsatz von VR,
- Anlernphase im Umgang mit VR und
- Gefahr der Überforderung des Nutzers durch zu viele Informationen [Wal-07].

Ergänzend zu zuvor genannten Einschränkungen fehlt zudem bei VR-Trainings der haptische Kontakt zu den Montageobjekten, es wird fast ausschließlich mit standardisierten Eingabegeräten gearbeitet und zwar abseits industrieller Arbeitsplätze. Das virtuelle Training wird bis heute jedoch kaum bei den Arbeitern am Band eingesetzt, obwohl dies eines der ältesten Einsatzgebiete von VR ist. Akzeptanzprobleme der Arbeiter beim Einsatz von HMDs, der hohe Datenaufbereitungsaufwand sowie hohe Hardwarekosten CAVE sind die Gründe hierfür [Sto-19, S. 1].

4.5 Augmented Reality

1994 wurde das Konzept des virtuellen Kontinuums veröffentlicht, in welchem eine Einordnung der Bereiche zwischen Realität und Virtualität vorgenommen wird. Abbildung 4.7 veranschaulicht diese Einordnung anhand eines Getriebekompressors und eines Roboters. Nach [Mil-94] existieren Mischformen zwischen der Realität auf der linken Seite in Abbildung 4.7 und der vollständig virtuellen Umgebung auf der rechten Seite in Abbildung 4.7, welche unter dem Begriff vermischte Realität (*Mixed Reality*, MR) zusammengefasst werden. Zwei Ausprägungen dieser MR bilden erweiterte Realität (*Augmented Reality*, AR) und erweiterte Virtualität (*Augmented Virtuality*, AV). Beide Ausprägungen gehen fließend ineinander über und werden im Folgenden vorgestellt. AV stellt im virtuellen Kontinuum direkt neben VR eine Erweiterung einer simulierten virtuellen Situation durch physische Objekte dar [Neg-18]. Ein Beispiel hierfür ist ein virtueller Fabrikraum in den ein auf einem physischen Marker basierender Roboter eingeblendet wird. Durch ein Verschieben des Markers in der Realität wird auch der Roboter in der virtuellen Umgebung verschoben. Zwischen realer Umgebung und AV wird AR eingeordnet. AR beschreibt im Gegensatz zu AV eine Erweiterung der Realität mit virtuellen Inhalten. Diese Inhalte können in Echtzeit an Kontext und Ort angepasst werden und es besteht die Möglichkeit zur Interaktion mit diesen Inhalten [Mil-94, Azu-97, Kre-10]. Ein Beispiel für AR bildet die Fernseh-Einblendung von Linien, welche die Laufwege von Fußballspielern darstellen. Lediglich das Fernsehbild für den Zuschauer wird für ein besseres Verständnis durch diese Linien virtuell erweitert, sie existieren nicht auf dem Fußballplatz. AR-Anwendungen auf einem Monitor darzustellen

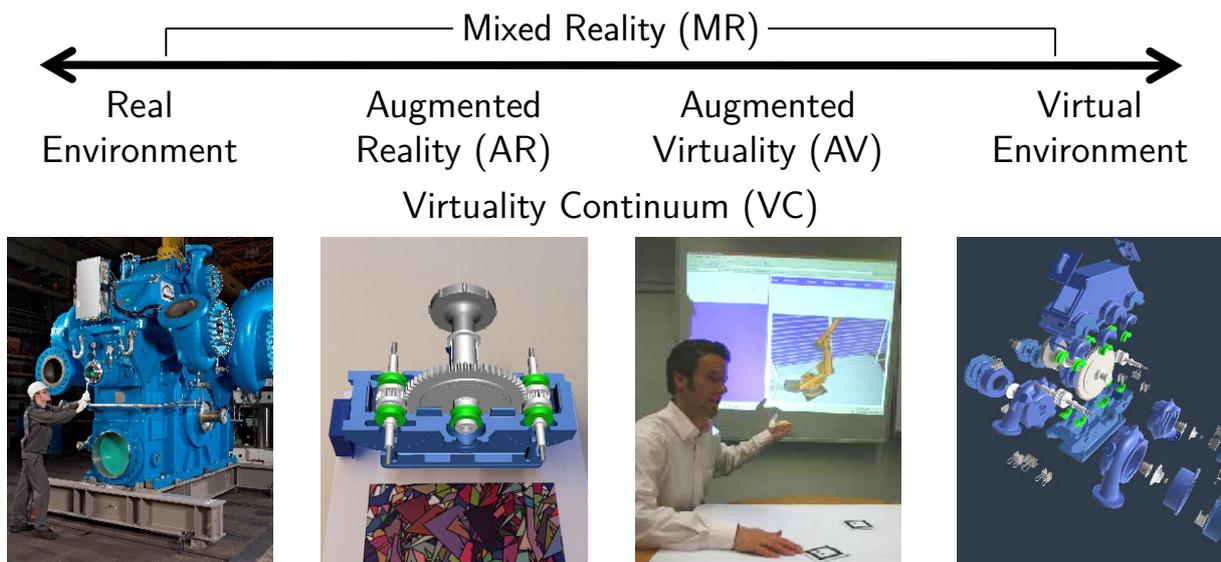


Abbildung 4.7: Virtuelles Kontinuum nach [Mil-94], *Beispielbild zu Augmented Virtuality* aus [Wal-07]

ist jedoch nicht immer vorteilhaft. Wird eine Montagesituation live mit einer Kamera gefilmt und auf einem nebenstehenden Monitor wiedergegeben, geht der Vorteil von AR verloren, Informationen direkt an der Wirkstelle anzuzeigen. Der Blick des Monteurs muss zwischen Montagestelle und Monitor wechseln. Augmented Reality wird daher meist in Verbindung mit HMDs [Fei-93] oder handgeführten Geräten, wie einem Tablet oder Smartphone genutzt [Web-13, Neg-15, Abr-17], oder mithilfe eines Projektors auf eine Oberfläche projiziert [Sat-14]. Abbildung 4.8 zeigt eine beispielhafte Darstellung einer AR-Anleitung für Montagevorgänge. Tabelle E.1 im Anhang gibt einen Überblick über aktuelle HMDs und ihre Eigenschaften.

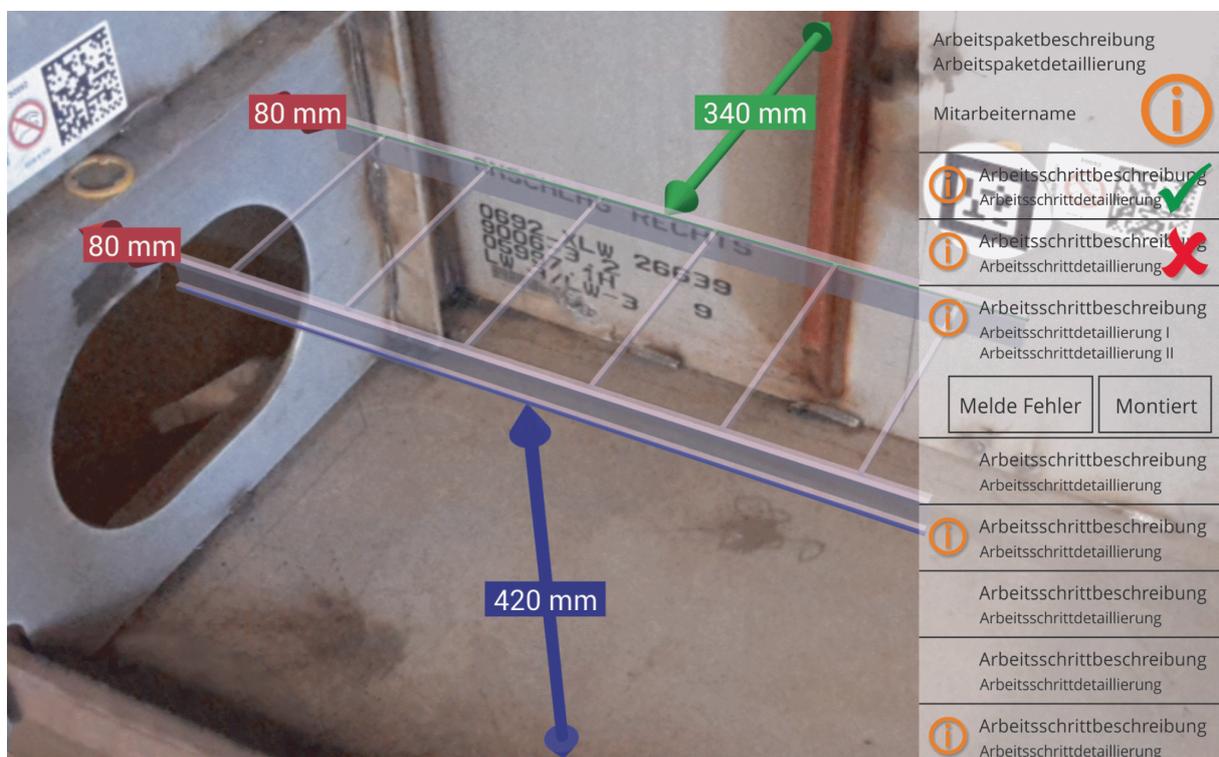


Abbildung 4.8: Beispiel für eine AR-Anleitung [Hal-18]

Die Darstellung virtueller Inhalte kann bei AR entweder *kontextsensitiv*, also örtlich an ein physisches Objekt gebunden, oder *nicht kontextsensitiv*, also an einer festen Position des Displays, erfolgen. Bei kontextsensitiver Darstellung bleiben virtuelle Inhalte auch bei einer Bewegung des Anzeigegeräts weiterhin am Objekt fixiert. Für diese Fixierung am physischen Objekt existieren mehrere Verfahren. Meist werden zweidimensionale, visuelle Marker auf die Objekte geklebt. Ihre Ausrichtung im Raum kann von einer Kamera erfasst und mithilfe von Bildverarbeitungssoftware interpretiert werden. Die virtuellen Inhalte werden dann in Bezug zu diesen Markern eingeblendet. Des Weiteren können 3D-Scans oder CAD-Dateien eine Grundlage bilden, um Objekte selbst als Marker zu nutzen.

Einen der größten Vorteile von AR bildet jedoch die Reduzierung der kognitiven Distanz. Unter kognitiver Distanz wird die Entfernung zwischen einer Anweisung und dem Ausführungsort verstanden. Die Anweisung muss vom Lerner erst aufgenommen, interpretiert und verstanden werden, um anschließend am Ausführungsort umgesetzt zu werden. Diese Übertragungsleistung wird umso größer, je stärker die Art der Darstellung der Anleitung von der Anwendung in der Realität abweicht. [Por-17] führt als Beispiel ein Navigationsgerät im Auto an. Die zweidimensionale Darstellung des Routenverlaufs auf dem Display muss vom Fahrer interpretiert und in Kongruenz mit der vor ihm liegenden dreidimensionalen Straße gebracht werden. Die Übertragung zwischen Display und Straße, welche auch Kopf- und Augenbewegungen beinhaltet, verdeutlicht, dass die kognitive Distanz auch eine physische und zeitliche Komponente hat. Die Nutzung von AR reduziert die kognitive Distanz, indem Informationen direkt am Ausführungsort eingeblendet werden. Zeitliche und räumliche Übertragung sowie die Interpretation der angezeigten Informationen werden erheblich reduziert. Die kognitive Distanz hat zudem Einfluss auf die kognitive Belastung des Gehirns. Diese kann u. a. nach [Swe-98, Rey-07] in *intrinsische* und *extrinsische* kognitive Belastung eingeteilt werden, welche im Folgenden erläutert werden.

Die *intrinsische* Belastung bezieht sich auf die Interaktivität der einzelnen Lernelemente zueinander. Lernelemente sind hierbei alle Komponenten, die bereits gelernt wurden oder noch zu erlernen sind [Brü-02, Brü-04]. [Swe-05] gibt als Beispiel für Lernelemente die Substantive einer zu erlernenden Sprache an. Viele dieser Substantive können erlernt werden, ohne interaktiven Bezug zu anderen Wörtern. Die Übersetzung des Wortes *Katze* kann erlernt werden, ohne die Übersetzung des Wortes *Hund* erlernen zu müssen. Beim Erlernen einer Sprache müssen jedoch nicht nur einzelne Wörter, sondern auch die Syntax, also die Satzlehre verstanden werden. Beim Erlernen möglicher Reihenfolgen der zu verwendenden Wörter innerhalb eines Satzes kann es jedoch vorkommen, dass sowohl die syntaktischen als auch die semantischen Eigenschaften jedes Wortes in Bezug auf jedes der anderen Wörter berücksichtigt werden müssen. Die Semantik behandelt die Bedeutung von Sätzen, Satzteilen und Wörtern. Die einzelnen Aufgabenelemente können nicht voneinander getrennt erlernt werden, da sie miteinander interagieren, beim Erlernen von Verben, wobei mehrere semantische und syntaktische Beziehungen verstanden werden müssen.

Die intrinsische kognitive Belastung beim Erlernen einzelner Vokabeln ist gering, da sie kaum miteinander interagieren. Trotzdem kann das Erlernen von Vokabeln schwierig sein. Dies jedoch nicht aufgrund der Schwierigkeit eine einzelne Vokabel zu erlernen, sondern aufgrund einer hohen Anzahl an Vokabeln, welche das Gehirn dazu veranlasst diese hohe Anzahl an zu lernenden Elementen in kurzer Zeit im Langzeitgedächtnis zu speichern. Beim Erlernen der Sprachsyntax können die Elemente der zu erlernenden Informationen schwer aufzunehmen sein, da sie nicht isoliert erworben wer-

den können. Eine hohe Interaktivität zwischen den Elementen führt also zu einer hohen intrinsischen Belastung und einem schwereren Aufnehmen der Lerninhalte. Sie kann jedoch auch zu einem tieferen Verständnis des Lerninhalts führen [Swe-05].

Die *extrinsische* Belastung wird auch als lernirrelevante kognitive Belastung bezeichnet und ist von der Art der Darbietung [Swe-94] sowie der kognitiven Distanz abhängig [Por-17]. Diese lernirrelevante kognitive Belastung kann je nach Darbietungsart und kognitiver Distanz dazu führen, dass Lerninhalte leicht oder schwer verständlich sind [Rey-07]. Eine geringe kognitive Distanz sowie eine leicht verständliche Darstellung der Inhalte führen somit zu einer geringen extrinsischen kognitiven Belastung und zu einem schnelleren Lernprozess.

Zu den weiteren Potenzialen von AR-Training zählen nach [Wal-07]

- AR als unterstützendes Medium zur Steigerung der Leistungsfähigkeit der Mitarbeiter,
- Reduzierung der Suchzeiten nach Informationen, z. B. bei HMD-Einsatz,
- Parallelisierung von Haupt- und Nebentätigkeiten, z. B. bei HMD-Einsatz,
- mobiles, virtuelles Handbuch für Prozessabläufe,
- kaum Schulung erforderlich, durch die situationsbezogene Bereitstellung von Informationen, z. B. Handlungsanweisungen,
- Einsparung von Schulungspersonal und
- Reduzierung von Fehlhandlungen.

Zu den Herausforderungen der Nutzbarkeit von AR für Trainingszwecke zählen nach [Wal-07]

- Investitionskosten für die Hardware.
- Fehlen von alltagstauglicher Hardware: Probleme bei Ergonomie und beim Einsatz im industriellen Umfeld.
- hohe Anforderungen bei Einsatz eines Trackingsystems.
- unzureichend ergonomische Gestaltung der HMDs: Tragekomfort, Gewichtsverteilung.
- kein Übernehmen der bekannten Interaktionsmetaphern vom Desktop möglich und
- schwer zu quantifizierender Nutzen und Aufwand durch den Einsatz von AR.

[Jes-14] stellte bei einem Vergleich von Print-, Video- und Animationsanleitungen das Auftreten eines „wiederholungsbedingten Lerneffekts anhand einer mengenmäßigen Leistungssteigerung [fest]. Diese ist unabhängig von der Art des Arbeitsplans“ [Jes-14, S. 5]. Die Art der Arbeitsanleitung hat nach [Jes-14] also keinen Einfluss darauf, wie schnell ein Arbeitsvorgang erlernt werden kann. Jedoch wurde in den Untersuchungen deutlich, dass mit abnehmendem Abstraktionsgrad bzw. mit zunehmender informativischer Reichhaltigkeit der Arbeitspläne die Erstaussführungsdauer sinkt [Jes-14, S. 5]. [Jes-14] bezog in seinen Untersuchungen keine AR-Anwendungen mit ein. Die Eignung von AR-Anleitungen könnte für den Sondermaschinenbau jedoch höher als für die Serienfertigung sein, da die Erstaussführungsdauer eines zu erlernenden Vorgangs einen wesentlich höheren Einfluss im Sondermaschinenbau als in der Serienfertigung hat.

Obwohl AR-Lösungen in vielen Szenarien eingesetzt werden können, birgt ihr Einsatz nicht immer einen Nutzen [Hal-18, S. 21]. [Sch-08a, S. 1], [Sch-15a, S. 90] und [Hal-18, S. 21] nennen zusätzlich zur generellen Rentabilität der AR-Anwendung folgende Bedingungen, unter denen der Einsatz von AR sinnvoll ist:

- manuelle Montagetätigkeiten mit hoher Komplexität,
- Montagevorgänge mit hohen Zuverlässigkeitsanforderungen und
- Vorhandensein von 3D-Konstruktionsdaten.

Bestehende Forschungsarbeiten zu AR beziehen sich oft nur auf die Montage einfacher Produkte [Hou-13, Han-15, Syb-15] oder untersuchen AR nur in der Anwendung auf Monitoren oder Projektoren [Rad-15, Tat-17], jedoch kaum in Verbindung mit Datenbrillen (*Head-Mounted-Displays*) (HMDs) in der Montage [Pal-18]. Bei Forschungsarbeiten mit industriellem AR-Bezug sind die Testgruppen oft nicht groß genug, um valide Ergebnisse zu erzielen oder sie bestehen nur aus Studierenden [Tan-03, Dün-08]. Zudem wird kaum auf den Erstellungs- und Implementierungsaufwand und nur selten auf die Kosten von Hard- und Software eingegangen. AR-Anwendungen, welche dem Nutzer ein Feedback über die Qualität seiner durchgeführten Tätigkeiten geben, sind kaum vorhanden [Wan-16].

VR und AR werden von [Sch-15a] als Visualisierungstechnologien bzw. als Benutzerschnittstellen der digitalen Fabrik bezeichnet. AR lässt sich jedoch u. a. nach [Sch-15a] im Produktentstehungsprozess stärker der Produktion zuordnen, wobei VR eher für den Einsatz in der Produktionsplanung geeignet ist. Die in diesem Kapitel analysierten Visualisierungstechnologien werden in Abschnitt 6.3.1.3 miteinander verglichen und bewertet. Abbildung 4.9 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die Vor- und Nachteile der einzelnen Technologien.

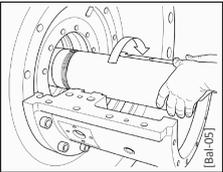
					
	Print - Text/Bild	Video	Animation	Virtual Reality (VR)	Augmented Reality (AR)
Vorteile	schnell erstellt wenige Kenntnisse für Erstellung nötig	intuitiv Darstellung der Realität	interaktiv Produkt muss nicht existieren	hohe Immersion gefährliche Abläufe simulierbar	Informationen direkt an der Wirkstelle geringe kognitive Distanz
Nachteile	nicht interaktiv schwer verständlich	ein Blickwinkel Produkt und Arbeitsplatz müssen existieren	CAD-Dateien müssen vorhanden sein aufwendige Erstellung	teuer haptisches Feedback schwierig	aufwendige Erstellung

Abbildung 4.9: Übersicht Visualisierungstechnologien

5 Handlungsbedarf

Beim Erlernen von Montagevorgängen werden im Sondermaschinenbau vermehrt detailarme Arbeitsanweisungen in Printform wie Bauteilzeichnungen und textuelle Anleitungen verwendet, da die Vorgänge meist wenig standardisiert sind. Diese sind jedoch wenig geeignet, um die komplizierten Montagevorgänge auf den jeweiligen Lerner angepasst zu trainieren. Hierbei erschweren geringe Interaktivität, Sprachschwierigkeiten, hohe kognitive Distanz und vor allem eine ausgeprägte Lehrerzentrierung ein effizientes Training. Für das Training der Fertigkeiten, welche benötigt werden, um einen neuen Maschinentyp zu montieren, werden daher zusätzlich erfahrene Trainer eingesetzt. Diese Trainer können auf die individuellen Vorkenntnisse und Fragen der Servicemonteure, welche Montage- und Wartungstätigkeiten durchführen sollen, eingehen. Montagetraîner können für die Inhaltsvermittlung im kognitiven Lernbereich zusätzlich auf Vorträge durch Produkt- oder Prozessexperten zurückgreifen. Dieses *arbeitsorientierte* Lernen mit lehrerzentrierten Vorträgen drängt die Trainingsteilnehmer jedoch in eine rezeptive, passive Rolle und regt nicht zur aktiven Teilnahme und Verarbeitung der präsentierten Inhalte an. Zudem ist das Lerntempo nicht an das Individuum angepasst. Intelligente Tutorensysteme (ITS) bilden einen Ansatz, mit dem individuelles kognitives Lernen ohne Trainer ermöglicht werden kann. Die Erstellung dieser ITS ist jedoch mit einem enormen Aufwand verbunden.

Bei praktischen Trainings an der physischen Sondermaschine stehen Trainer vor der Herausforderung, psychomotorische Fertigkeiten oft mehreren Teilnehmern in möglichst kurzer Zeit zu vermitteln. Auch in diesem praktischen Teil ist das Lerntempo nur schwer individualisierbar. Da die hergestellten Produkte oft einen hohen Wert haben, stehen meist keine oder eine nicht ausreichende Anzahl an Trainingsmaschinen für die Teilnehmer zur Verfügung. Teilweise werden daher Maschinen aus der Produktion für *arbeitsgebundenes* Lernen direkt an der Maschine genutzt. Hierbei dürfen Monteure jedoch nur in begrenztem Umfang selbst montieren. Stattdessen müssen die Montagevorgänge primär anhand der Montagevorführung durch einen erfahrenen Mitarbeiter nachvollzogen werden. Dies liegt darin begründet, dass das Risiko eines Bauteilschadens aufgrund fehlerhafter Montage eines unerfahrenen Trainingsteilnehmers als zu hoch betrachtet wird, um eine oft mehrere Monate dauernde und teure Ersatzteilbeschaffung zu riskieren. Aufgrund kurzer Trainingszeit und zeitintensiver Montagevorgänge, kann die Montage meist nicht ausreichend praktisch geübt werden, um in die nach der kognitiven Lernphase folgende assoziative und später die autonome Lernphase einzutreten [Fit-67]. Servicemonteure benötigen daher ein an ihre speziellen Anforderungen angepasstes Training, welches individuelle Wissensvermittlung in kurzer Zeit ermöglicht und die Trainer entlastet. Eine direkte Verbindung praktischer und theoretischer Inhalte in Form von *arbeitsverbundenem* Lernen abseits der Produktion, könnte hierbei von Vorteil sein. In der Serien- und Massenfertigung werden oft bebilderte oder videobasierte Anleitungen genutzt, welche leichter verständlich und trotzdem kostengünstig sowie für einen genau definierten Ablauf angepasst sind. Kürzere Produktinnovationszyklen und stärkere Produktvariantenbildung erfordern jedoch nicht nur im Sondermaschinenbau, sondern auch in der Serienfertigung eine Erhöhung der Lehr- und Lernproduktivität, damit Mitarbeiter die erforderlichen Fertigkeiten effektiv und effizient trainieren können.

Die Einteilung der Lern- und Lehrmethoden zum Erlernen von Arbeitsvorgängen nach [Jes-13, Sch-05] verdeutlicht, dass bisher kaum ein Fokus auf die lernerzentrierte Vermittlung psychomotorischer Lerninhalte in bestehenden Lernmethoden gelegt wird. Bei den psychomotorischen Methoden überwiegt die Lernerzentrierung. Individuelle Trainings sind somit schwer möglich. Die lernerzentrierten Methoden, welche im Mischbereich zwischen psychomotorischem und kognitivem Lernbereich liegen, sind für das Montagetraining im Sondermaschinenbau entweder zu zeitaufwendig wie die Leittextmethode, kaum zum Training von Montagevorgängen geeignet wie Planspiel oder Projektmethode oder nur auf das Training von einer oder zwei Personen ausgerichtet wie die Simulationsmethode. Zudem integrieren die von [Jes-13, Sch-05] aufgeführten Methoden keine der neueren Visualisierungstechnologien wie erweiterte Realität (*Augmented Reality*, AR), virtuelle Realität (*Virtual Reality*, VR) oder Animation. Die Vorteile, welche eine Kombination aus didaktischer Methode und interaktiver Visualisierungstechnologie ermöglichen, werden derzeit somit kaum genutzt.

Beim Erlernen von Montagevorgängen ist die Montagedurchführungszeit zu Beginn des Lernprozesses aufgrund einer starken kognitiven Belastung höher als bei den nachfolgenden Durchführungen [Fit-67]. Die kognitive Belastung kann in intrinsische und extrinsische Belastung unterteilt werden [Swe-98, Rey-07]. Die intrinsische Belastung entsteht durch die Interaktivität zwischen den zu erlernenden Elementen wie Werkzeugbezeichnungen, Aussehen von Montageobjekten, Sicherheitsregeln oder Reihenfolgen von Montagevorgängen und ist notwendiger Bestandteil des Lernprozesses. Die extrinsische Belastung wird durch die Anweisungsgestaltung und die kognitive Distanz zwischen Anweisung und Ausführungsort beeinflusst und hat somit auch eine Auswirkung auf den Lernprozess und die Montagedurchführungszeit [Jes-14]. Eine hohe kognitive Distanz führt zu einem langen Lernprozess und zu hohen Montagedurchführungszeiten. Treten zeitintensive Montagevorgänge regelmäßig, jedoch in großen Abständen auf, müssen sie vor ihrer Durchführung oft neu erlernt werden und es entsteht erneut eine hohe kognitive Belastung. Zeitintensive Montagevorgänge existieren besonders häufig im Sondermaschinenbau. Die hier hergestellten Unikate haben oft einen hohen Produktwert, wodurch Montagefehler zu hohen Kosten führen können. Daher werden von den Monteuren dieser Sondermaschinen spezielle Kenntnisse und Vorgehensweisen gefordert. Visualisierungstechnologien wie AR oder VR ermöglichen es, aufgrund von geringer kognitiver Distanz, relevante Inhalte direkt an der Wirkstelle einzublenden und somit die Analyse komplizierter Montagezusammenhänge zu vereinfachen.

Lernzeuge bieten die Möglichkeit der Erhöhung der Lern- und Lehrproduktivität sowohl im kognitiven als auch im psychomotorischen Lernbereich. Sie bilden eine lernerzentrierte Methode welche auch für das Erlernen von Arbeitsvorgängen genutzt werden kann. Bisher fehlt jedoch ein standardisiertes Vorgehen für ihre Erstellung und Nutzung sowie eine Einbindung in ein didaktisches Konzept. Zudem sind auch hier die Potentiale der analysierten Visualisierungstechnologien bisher noch nicht ausreichend aufgegriffen worden.

6 Lernzeugmethode

Im Folgenden werden digitale Lernzeuge für das lernerzentrierte Training psychomotorischer Montagevorgänge entwickelt, um die Lern- und Lehrproduktivität zu erhöhen. Zudem sollen sie individuelles Lernen sowie die Reduktion von Montagefehlern ermöglichen. Hierbei wird ein erster Schwerpunkt auf die Erstellung dieser Lernzeuge nach Maßgabe der Anwendung gelegt. Bei den in die Lernzeuge zu integrierenden Visualisierungstechnologien werden sowohl ältere Technologien wie Print-, Video- und Animationsanleitungen betrachtet als auch im Besonderen neuere Visualisierungstechnologien wie Augmented Reality (AR) und Virtual Reality (VR).

Um die entwickelten Lernzeuge erfolgreich nutzen zu können, wird eine lernerzentrierte und auf den psychomotorischen Lernbereich ausgerichtete didaktische Methode benötigt. Ihre Konzeption bildet den zweiten Schwerpunkt der folgenden Ausarbeitung. Durch die Nutzung der lernerzentrierten digitalen Lernzeuge unter Anwendung der entwickelten didaktischen Methode sollen Montagetrainer in der Vermittlung psychomotorischer Trainingsinhalte für Montagevorgänge unterstützt werden. Sowohl bei der Entwicklung aber auch vor allem bei der späteren Implementierung wird verstärkt die Sondermaschinenmontage betrachtet, da hier im Vergleich zu anderen Produktionsformen der Einfluss der Montageerstdurchführungsdauer auf die Dauer des Lernprozesses besonders hoch ist. Aufgrund des Trends der Mass-Customization in der Massenfertigung und der immer stärkeren Modularisierung in der Serienfertigung, wird der Einfluss der Erstdurchführungsdauer jedoch auch in diesen Produktionsformen immer größer und eine Übertragbarkeit des Konzepts denkbar.

Der erfolgreiche Einsatz von IKT in den zu entwickelnden Lernzeugen für die Vermittlung von Montagevorgängen hängt nach [Rie-13] vor allem vom didaktischen Konzept ab, also von: verfolgten Zielen, passenden Voraussetzungen bei Lernenden und Rahmenbedingungen, methodischer Aufbereitung sowie sozialer Organisation des Lernprozesses. Daher wird zunächst eine didaktische Methode für die Lernzeugnutzung in Montagetrainings entwickelt. Das in Abbildung 6.1 zusammengefasste Vorgehen bei der Entwicklung der didaktischen Lernzeugmethode wird anschließend beschrieben.

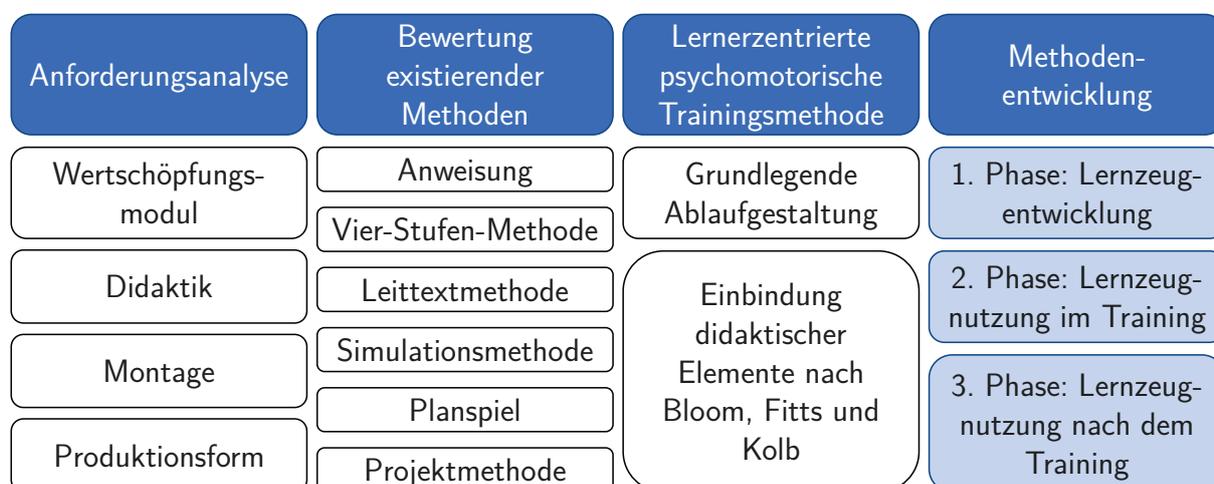


Abbildung 6.1: Konzeptentwicklung

Zuerst werden Anforderungen an die zu entwickelnde Methode auf Grundlage des Wertschöpfungsmoduls nach [Sel-08] ermittelt. Anhand dieser Anforderungen werden anschließend die in Abschnitt 3.3 analysierten Lernmethoden auf ihre Anwendbarkeit zur Vermittlung psychomotorischer Inhalte in Montagetrainings untersucht. Basierend auf den Erkenntnissen von [Blo-56], [Fit-67], [Kol-71] und [Jes-13] werden hiernach bestehende Methoden nach [Sch-05] zu einer psychomotorischen und lernerzentrierten Trainingsmethode kombiniert. Die einzelnen Schritte der Methode, welche die u. a. von [Rie-13] geforderten Lernziele, die Zielgruppe und die methodische Aufbereitung adressieren, werden hiernach vorgestellt. Der *erste Schritt* der Methode umfasst die Entwicklung der zu nutzenden Lernzeuge. Das Konzept der Lernzeuge u. a. nach [Sel-09] enthält vielversprechende Ansätze, um Trainer in Montagetrainings für Sondermaschinen zu entlasten und ein stärker lernerzentriertes Erlernen von Montagevorgängen zu fördern, nimmt jedoch kaum Bezug auf die Entwicklung neuer Lernzeuge. Durch eine im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Lernzeugmorphologie wird es möglich, bestehende Lernzeuge zu kategorisieren. Zudem wird durch ihre Verwendung bei der Gestaltung neuer Lernzeuge auf Kriterien hingewiesen, welche dabei helfen, einen möglichst hohen Lernerfolg zu erzielen. Dem Ersteller wird somit ein möglicher Lösungsraum aufgezeigt. Um die Lernzeugerstellung besser strukturieren zu können, werden zudem Methoden vorgestellt, welche für den Designprozess von Lernzeugen genutzt werden können. Anschließend werden die in Kapitel 4 aufgeführten klassischen und neuen Visualisierungstechnologien auf ihre Anwendbarkeit als Mensch-Maschine-Schnittstelle in Lernzeugen und in der neuen Methode untersucht, ihr zukünftiges Potenzial wird diskutiert und die neue Rolle des Lehrenden und Lernenden innerhalb des Konzepts erörtert. Des Weiteren wird untersucht, wie kognitive Lerninhalte den Lerner im Erreichen seiner psychomotorischen Ziele unterstützen können. Hierdurch kann die zunächst rein psychomotorische Wissensvermittlung je nach Wissensstand des Lerner auch auf die kognitive Ebene der Wissensvermittlung erweitert werden. Der *zweite Schritt* der Methode umfasst die Integration und Nutzung der entwickelten Lernzeuge in Montagetrainings. Die Rolle des Lernzeugs für lernerzentriertes individuelles Lernen psychomotorischer Inhalte wird diskutiert. Besonderer Bezug wird hierbei zur Möglichkeit der Rückmeldung über die erreichte Montagequalität an den Lernenden genommen. Wichtig ist zudem die Meinung der Lernenden über die genutzten Lernzeuge zu erfassen, um Verbesserungen an den entwickelten Lernzeugen vornehmen zu können. Hierzu wurden in der späteren Implementierung Tests mit unterschiedlichen Nutzergruppen durchgeführt. Der *dritte Schritt* der Methode umfasst schließlich die Nutzung der entwickelten Lernzeuge nach dem Training sowie die geänderten Anforderungen an Lernzeuge aufgrund fehlender physischer Lernobjekte und Trainer.

Im anschließenden Kapitel werden mehrere Lernzeuge für Montagetrainings mithilfe der Morphologie und der aufgezeigten Designmethoden entwickelt. Der Nutzen der entwickelten Methode zur lernerzentrierten Vermittlung psychomotorischer Inhalte wird nach ersten Tests mit Studierenden der Ingenieurwissenschaften durch die Einbindung dieser Lernzeuge in Montagetrainings für Sondermaschinen verifiziert.

6.1 Anforderungen nach Wertschöpfungsfaktoren

Im Folgenden werden Anforderungen an eine lernerzentrierte psychomotorische Methode zur Vermittlung von Montagetätigkeiten gebildet. Um die wertschöpfenden Inhalte beim Erlernen von Montage-

vorgängen identifizieren zu können, wird eine Einteilung der Anforderungen anhand der Wertschöpfungsfaktoren des Wertschöpfungsmoduls nach [Sel-08] vorgenommen, welches Abbildung 6.2 entnommen werden kann. Sollten Anforderungen mehreren Wertschöpfungsfaktoren zugeordnet werden können, so werden sie zur besseren Übersicht nur bei einem Wertschöpfungsfaktor genannt.

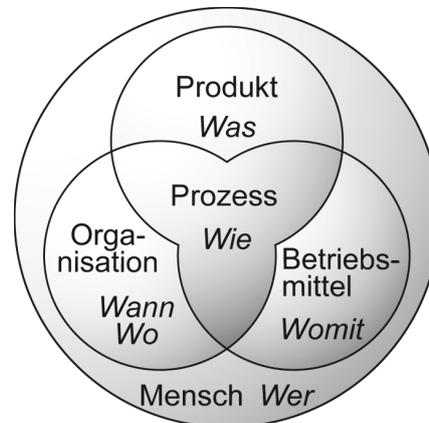


Abbildung 6.2: Wertschöpfungsmodul nach [Sel-08]

Das *Produkt* bezeichnet in der vorliegenden Arbeit nicht das Ergebnis der Montage, sondern wird im Folgenden als der innerhalb eines Montagetrainings zu vermittelnde Lerninhalt interpretiert. Folgende Anforderungen werden bezüglich des Lerninhalts an die zu entwickelnde Methode gestellt:

- **Montagevorgangvermittlung:** Die zu entwickelnde Methode soll für das psychomotorische Training von Montagevorgängen genutzt werden. Hierzu müssen die einzelnen in Abschnitt 2.3 genannten Elemente des Montagevorgangs nach [Nof-97, Boo-10, Rad-15, VDI2860] erlernt werden. Die Methode soll die Schritte Identifikation, Handhabung, Ausrichtung, Fügen, Anpassung und Überprüfung manueller Montagetätigkeiten vermitteln können.
- **Lernzielkommunikation:** Um eine erfolgreiche Wissensvermittlung realisieren zu können, müssen die zu erreichenden Lernziele dem Nutzer deutlich kommuniziert werden [Blo-56, Rie-13, Big-14, Men-18c].
- **Darstellung komplizierter Zusammenhänge:** Die zu entwickelnde Methode muss in der Lage sein, komplizierte Zusammenhänge, bspw. aus der Sondermaschinenmontage, so darzustellen, dass sie von einem Experten *erkannt* und *analysiert* werden können [Sno-07, Ham-14b].
- **Vermeidung arbeitsgebundenen Lernens:** Das Training direkt in der Produktion kann in der Serien- und Massenfertigung durchaus von Vorteil sein, da hierdurch der Aufbau teils kostenintensiver Trainingsstationen vermieden wird und die im Training erstellten Produkte nach entsprechenden Qualitätssicherungsmaßnahmen verkauft werden können. Hierzu muss jedoch die Möglichkeit der Entkopplung der Trainingsstation aus dem Arbeitstakt bestehen oder ausreichende Materialpuffer vorgehalten werden, um nicht den gesamten Produktionsprozess zu verlangsamen. Im Sondermaschinenbau hingegen sollte das Training an hochpreisigen Unikaten in der Produktion vermieden werden, um eine Beschädigung sowie Lieferverzug zu vermeiden. Bei der alternativen Nutzung mehrerer Trainingsmaschinen sind vor allem Kosten und Platzbedarf kritisch zu betrachten [Bok-06, Sch-10a, Pös-16, Men-18a].

Die zur Wissensvermittlung benötigten *Betriebsmittel* bestehen aus den für den Lernprozess anzuwendenden Lernzeugen. Im Folgenden wird auf die Anforderungen dieser Lernzeuge an die zu entwickelnde Methode eingegangen. Auf die Anforderungen, welche an die Lernzeuge und zugehörigen Visualisierungstechnologien selbst gestellt werden, wird detailliert in Abschnitt 6.3.1.2 und 6.3.1.3 eingegangen:

- **Lernzeugnutzung:** Die zu entwickelnde Methode soll die Einbindung digitaler Werkzeuge zum Lernen, sog. Lernzeuge, erlauben, welche durch den Einsatz von IKT prinzipiell ein Lernen ohne menschlichen Trainer ermöglichen [Sel-09].
- **Lernzeugentwicklung:** Neben der Nutzung soll zudem die Entwicklung von Lernzeugen thematisiert werden, da diese essentiell für einen erfolgreichen Lernprozess ist [Sel-09, Men-18c].

In der *Organisation* werden Faktoren wie Gruppengröße oder Lernort adressiert. Aus organisatorischer Sicht wird näher auf die Anforderungen an die zu entwickelnde Methode eingegangen. Es konnten folgende Anforderungen identifiziert werden.

- **Sozialisation:** Soziale Interaktion sowie ein Austausch mit anderen Trainingsteilnehmern durch gemeinsame Erfahrung, Nachahmung und Übung ermöglicht die Weitergabe impliziten Wissens nach [Non-92, Sch-96, Non-12]. Die Vermittlung impliziten Wissens alleine durch die Lernzeugnutzung wäre nur schwer innerhalb eines Trainings möglich.
- **Variable Gruppengröße:** Die Methode soll Lerngruppengrößen von einer bis ca. 25 Personen ermöglichen, um flexibel in unterschiedlichen Szenarien einsetzbar zu sein.
- **Simulation gefährlicher Abläufe:** Potenziell gefährliche Abläufe sollen in einer für den Lerner sicheren Umgebung simuliert werden können [Hac-93, Bon-99, Sch-05, Thi-16].

Der *Prozess* umfasst das didaktische Vorgehen zur Wissensvermittlung. Aus dem Wissensvermittlungsprozess ergeben sich aus didaktischer Sicht folgende Anforderungen an die neue Methode:

- **Interaktiv und intuitiv:** Die Methode soll eine interaktive und intuitive Art der Wissensvermittlung ermöglichen, um ungewollte Fehlhandlungen sowie langwierige Interpretation und Verarbeitung der gegebenen Informationen zu vermeiden [Rey-07].
- **Rückmeldung:** Der Lerner benötigt eine Rückmeldung darüber, ob er die erlernten Montagefähigkeiten richtig durchgeführt hat [Hac-93, Shn-17].
- **Lernerzentrierung:** Die zu erlernenden psychomotorischen Vorgänge sollen lernerzentriert vermittelt werden, um dem Lerner eine aktivere Rolle nach neuerer konstruktivistischer Sicht zu ermöglichen [Rei-06, Rie-11].
- **Psychomotorisches Lernen** Erreichen der psychomotorischen Lernziele Imitation, Manipulation, Präzision, Handlungsgliederung und Naturalisierung nach [Blo-56] sowie Eintritt in kognitive, assoziative und autonome Lernstufe nach [Fit-67].

Der Wertschöpfungsfaktor *Mensch* adressiert die Lehrenden und die Lernenden, denen psychomotorische Montageinhalte vermittelt werden sollen. Folgende Anforderungen der Lernenden an die neue Methode wurden identifiziert:

- **Individualisierung:** Dem Lerner sollte ermöglicht werden, die Darstellungsweise des Lerninhalts zu individualisieren und somit auch zu entscheiden, welche kognitiven Inhalte er für das Erlernen eines psychomotorischen Vorgangs benötigt und in welcher Weise und in welchem Umfang diese ihm dargeboten werden. Somit sollen möglichst alle Lerntypen nach [Kol-71, Kol-81] angesprochen werden.
- **Sprachreduzierung:** Eine sprachreduzierte Wissensvermittlung verringert den zeitintensiven Leseaufwand sowie die kognitive Distanz. Sollte eine Sprachreduzierung nicht möglich sein, so ist eine mehrsprachige Ausführung der Lerninhalte anzustreben [Sel-09, Men-16].

6.2 Bewertung existierender Methoden

Nach *Schelten* [Sch-05] existiert keine lernerzentrierte Methode für die primäre Vermittlung psychomotorischer Tätigkeiten. So wird nach *Schelten* [Sch-05] die Simulations-/Trainingsmethode zwischen psychomotorischem und kognitivem Lernbereich eingeordnet. Diese wird nach *Schlick* [Sch-18] unter Verweis auf *Bonz* [Bon-99] zwar stärker dem psychomotorischen Lernbereich zugeteilt, hierbei bezieht sich *Bonz* [Bon-99] jedoch auf ein früheres Werk von *Schelten* [Sch-95], welches er in einer Neuauflage später anpasst und welches zu der in der vorliegenden Arbeit genutzten Einteilung führt [Sch-05]. Keiner der zuvor genannten Autoren nimmt Bezug darauf, wie neuere Technologien wie AR, VR oder MR in diesem Zusammenhang integriert werden können. Daher wird im Folgenden eine neue Methode zur lernerzentrierten Vermittlung im psychomotorischen Lernbereich entwickelt, welche diese Anforderung erfüllt. Hierzu werden zunächst die existierenden Methoden auf ihre Anpassbarkeit auf den neuen Schwerpunkt untersucht. Um einen erhöhten Anpassungsaufwand zu vermeiden, werden nur die an den lernerzentrierten psychomotorischen Lernbereich angrenzenden Methoden nach [Sch-05] betrachtet, in welchem die neue Methode liegen soll. Um auf Basis einer existierenden Methode eine neue lernerzentrierte psychomotorische Methode erstellen zu können, kann entweder bei Methoden mit einem Schwerpunkt im psychomotorischen Lernbereich die Lernerzentrierung verstärkt oder es können lernerzentrierte Methoden stärker auf den psychomotorischen Lernbereich ausgerichtet werden. Abbildung 6.3 verdeutlicht die beiden Anpassungsrichtungen und hebt die für diese Anpassung geeigneten Methoden hervor. Aus ihnen sollen im Anschluss strukturelle Elemente für die zu entwickelnde Methode übernommen werden.

Um beurteilen zu können, welche Elemente in die neue lernerzentrierte psychomotorische Methode übernommen werden können, wurden die existierenden Methoden nach dem Grad der Erfüllung der zuvor gebildeten Anforderungen an die zu entwickelnde Methode in Tabelle 6.1 bewertet.

		Lernbereich		
		psychomotorisch	psychomotorisch und kognitiv	kognitiv
Zentrierungsform	Lehrer	Anweisung		Vortrag
	Lehrender und Lernender	Vier-Stufen-Methode, - analytische Methode, - handlungsregulatorische Methode		Lehrgespräch
	Lerner		Leittextmethode, Simulations-/ Trainingsmethode, Planspiel, Projektmethode	Fallmethode

Abbildung 6.3: vertikaler (1) und horizontaler (2) Anpassungspfad für eine lernerzentrierte, psychomotorische Methode nach [Sch-05]

Tabelle 6.1: Bewertung existierender Methoden

Methode	Montagevorgangvermittlung	Lernzielkommunikation	Darstellung komplizierter Zusammenhänge	Vermeidung arbeitsgebundenen Lernens	Lernzeugnutzung	Lernzeugentwicklung	Sozialisation	Variable Gruppengröße	Simulation gefährlicher Abläufe	Interaktiv und intuitiv	Rückmeldung	Lernerzentrierung	Psychomotorisches Lernen	Individualisierung	Sprachreduzierung
Anweisungen	●	●	○	○	○	○	○	●	○	○	○	○	●	○	○
Vier-Stufen-Methode	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○	○
Leittextmethode	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Simulations-/Trainingsmethode	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Planspiel	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Projektmethode	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Legende: ● voll erfüllt, ● größtenteils erfüllt, ○ zur Hälfte erfüllt, ○ teilweise erfüllt, ○ nicht erfüllt

Folgende allgemeine Aussagen beziehen sich auf die qualitative Bewertung aus Tabelle 6.1. Es wird deutlich, dass keine der Methoden die Lernzeugentwicklung adressiert und die Lernzeugeinbindung nur teilweise möglich ist. Eine Sprachreduzierung wird von keiner Methode angestrebt, ist jedoch bei Anweisungen leicht realisierbar. Bezogen auf die einzelnen Methoden können folgende weitere Aussagen getroffen werden:

- Lehrerzentrierte *Anweisungen* lassen sich nur schwer individualisieren, sind jedoch sowohl für einzelne Lerner als auch für große Gruppen geeignet, sofern genug Trainingsmaschinen zur Verfügung stehen. Je nach genutzter Visualisierungstechnologie lassen sich komplizierte Zusammenhänge mehr oder weniger gut vermitteln. Eine Simulation gefährlicher Abläufe findet hier-

bei kaum statt, da Anweisungen meist direkt am Montageobjekt genutzt werden. Eine Rückmeldung über den Lernerfolg erfolgt bei der Anweisungsnutzung nicht.

- Die *Vier-Stufen-Methode* wurde für das Erlernen psychomotorischer Abläufe entwickelt, erfordert jedoch die Anwesenheit eines Lehrenden in den ersten Durchläufen der zu vermittelnden Tätigkeit. Hierdurch sind diese ersten Durchläufe stark lehrerzentriert, bieten jedoch auch die Möglichkeit für den Lehrenden korrigierend einzugreifen und Rückmeldungen über die Qualität der Durchführung zu geben. Bei größeren Gruppen erfolgen diese Rückmeldungen jedoch nicht immer zeitnah und Anwendungsfehler einzelner Lerner können leicht übersehen werden. Im späteren Übungsverlauf kontrolliert der Lehrende den Lerner nicht mehr. Die Methode wird somit im zeitlichen Verlauf zwar stärker lernerzentriert, durch die Abwesenheit des Lehrenden sind Anwendungsfehler jedoch auch leichter möglich. Eine individuelle Betreuung der Lerner durch den Lehrenden ist zudem nur bei kleinen Gruppengrößen sinnvoll möglich, da der zeitliche Betreuungsaufwand bei größeren Gruppen enorm steigt. Bei der Vier-Stufen-Methode werden Abläufe nicht simuliert, es wird direkt am Montageobjekt geübt.
- Die *Leittextmethode* ermöglicht eine lernerzentrierte Wissensvermittlung. Die eingesetzten Leittexte erlauben dem Lerner eine individuelle Lösungsfindung. Diese ist jedoch auch aufgrund der Rechercharbeiten vor allem bei komplizierten Sachverhalten sehr zeitintensiv. Arbeitsverbundenes und arbeitsorientiertes Lernen sind bei der Leittextmethode üblich, zudem ermöglicht die Arbeit in Gruppen eine gute Sozialisation und implizite Wissensweitergabe. Eine Rückmeldung über die Montagequalität durch den Lehrenden erfolgt während des Lernprozesses nur wenn der Lernende dies explizit verlangt, ansonsten findet sie zeitversetzt in einem Fachgespräch nach Abschluss der Aufgabe statt.
- *Simulationen* ermöglichen es, arbeitsorientiert gefährliche Abläufe in einer sicheren Umgebung zu üben. Aufgrund der teuren Simulationsumgebung stehen jedoch meist nicht genug Trainingsplätze für das zeitgleiche Training mehrerer Teilnehmer zur Verfügung.
- *Planspiel* und *Projektmethode* werden eher für Führungskräfte trainings, bzw. für die zeitintensive Ausbildung und kaum für die Vermittlung von Montagetätigkeiten genutzt.

Vier-Stufen- und *Leittextmethode* bilden die meistgenutzten Methoden zur Vermittlung psychomotorischer Inhalte [Sch-05]. Eine individualisierte Darstellungsweise der präsentierten Informationen ist jedoch bei der Vier-Stufen-Methode kaum vorgesehen und vor allem bei großen Lerngruppen schwer umsetzbar. Zudem sind beide sehr zeitintensiv in ihrer Durchführung und erfordern die Anwesenheit eines Lehrenden [Sch-05]. Die Simulation potenziell gefährlicher Abläufe in einer sicheren Umgebung sowie die Vermeidung der Montage direkt an Produkten wird innerhalb der *Simulations-/Trainingsmethode* am besten erfüllt. *Anweisungen* vermitteln Wissen gut strukturiert und benötigen keine Anwesenheit eines Lehrenden bei der Vermittlung. Sie sind jedoch trotzdem stark lehrerbezogen und schränken den Nutzer in der Möglichkeit der individualisierten Darstellung der Lerninhalte ein. Zudem hängt die Anweisungsqualität stark von gewählter Visualisierungstechnologie und deren Aufbereitungsgrad ab.

6.3 Lernerzentrierte psychomotorische Trainingsmethode

Für die Entwicklung einer lernerzentrierten, psychomotorischen Trainingsmethode wird eine Kombination der beiden Anpassungspfade aus Abbildung 6.3 gewählt. Da Planspiel und Projektmethode weniger zur Vermittlung von Montagetätigkeiten geeignet sind, werden Bestandteile von *Vier-Stufen-Methode*, *Anweisung*, *Simulation* und *Leittextmethode* zu einer neuen Methode kombiniert.

Die weit verbreitete und etablierte Vier-Stufen-Methode zur Erlernung psychomotorischer Montagetätigkeiten hat eine leicht verständliche Abfolge an Trainingsschritten, erfordert jedoch vor allem zu Beginn die Anwesenheit und aktive Mitarbeit eines Trainers. Er gibt den Lernern den nötigen Input, plant die Durchführung des Trainings und gibt Rückmeldung über die Qualität der durchgeführten Aufgabe. Lediglich Nachahmungs- und Übungsphase am Ende sind lernerzentriert. Die Vier-Stufen-Methode bildet somit eine gute Struktur, für die Entwicklung einer neuen Methode zur lernerzentrierten Wissensvermittlung in der psychomotorischen Montage, wenn es gelingt, die Lehrerzentrierung in den ersten Stufen zu reduzieren. Durch die vielen Wiederholungen und Nachahmungen des Montagevorgangs, ist sie jedoch sehr zeitaufwendig. Zudem ist der Betreuungsaufwand für den Trainer sehr hoch. Die Methode ist eher für eine kleine Teilnehmerzahl ausgelegt, Gruppengrößen von bspw. 15 Personen sind schwer für einen einzigen Trainer zu betreuen.

Das Wissen des Trainers innerhalb der Vier-Stufen-Methode durch eine Anleitung zu vermitteln, wäre prinzipiell möglich und würde den Trainer entlasten. Hierdurch wäre aber die Individualisierung des Trainings weder für geringe noch für hohe Teilnehmerzahlen gegeben. Statt einem starren Lernpfad wie bei einer schriftlichen, bebilderten oder Video-Anleitung zu folgen, könnte der Inhalt durch ein Lernzeug vermittelt werden, welches eine Visualisierungstechnologie mit einem größeren Interaktionspotenzial nutzt. Lerner könnten stärker bestimmen, welcher Lerninhalt in welcher Darstellungsart wann erlernt wird. Je nach verwendeter Visualisierungsart können Lernsituationen mithilfe von Lernzeugen auch simuliert werden. AR, VR und Animationen bieten die Möglichkeit interaktiv den Lerninhalt anzupassen und diesen ohne eine Gefährdung von Mensch oder Montageobjekt nachzuvollziehen. AR ermöglicht zudem die simulierten Inhalte direkt am Montageobjekt einzublenden.

Im Gegensatz zur Vier-Stufen-Methode, wurde die Leittextmethode primär für die Vermittlung grundlegender Kenntnisse in der Ausbildung entwickelt und nicht für die Vermittlung von Montageinhalten. Grundlegende Kenntnisse sind jedoch bei Teilnehmern von Weiterbildungen schon vorhanden. Ein weiterer wesentlicher Bestandteil der Leittextmethode besteht in der inhaltlichen Auseinandersetzung mit den im weiteren Verlauf zu erfüllenden Arbeitsaufgaben. Mithilfe von Leitfragen wird der Lerner an alle wesentlichen Aspekte erinnert und in die Lage versetzt eine theoretische Lösung zu erarbeiten, welche anschließend mit dem Lehrenden diskutiert wird. Dies ist auch in Verbindung mit einem Lernzeug möglich. Ein Montagevorgang kann vor seiner Durchführung von Trainingsteilnehmern theoretisch durchdacht werden, bevor er anschließend mithilfe des Lernzeugs durchgeführt wird. Nach der Durchführung kann diskutiert werden, warum die vom Lerner entwickelte Lösung von der des Lernzeugs abweicht und ob die vom Lerner entwickelte Lösung schlechter, besser oder gleichwertig ist zu der des Lernzeugs. Hieraus ergibt sich auch ein Verbes-

serungspotenzial zur Weiterentwicklung des Lernzeugs. Das Lernzeug selbst führt den Lerner wie eine Anweisung/Anleitung durch den Montagevorgang. Anders als Anleitungen adressieren Lernzeuge jedoch Sprachreduzierung, Individualisierung, Interaktivität sowie Intuitivität und sind dadurch meist schneller in der Vermittlung von Montageinhalten. Zudem ermöglichen sie die Reduzierung von Montagefehlern durch eine direkte Rückmeldung zur Montagequalität. Des Weiteren bieten Lernzeuge die Möglichkeit wie bei einer Simulation Inhalte gefahrlos zu üben. Tabelle 6.2 gibt einen Überblick darüber, welche Inhalte für die neue Methode übernommen werden.

Tabelle 6.2: Übersicht der aus den einzelnen Methoden entnommenen Bestandteile für die neue Methode

Vier-Stufen-Methode	grundlegende Ablaufstruktur
Leittextmethode	optionale gedankliche Vorwegnahme des Arbeitsablaufs durch die Lerner zusammen mit einer Identifikation benötigter Werkzeuge, Bauteile sowie möglicher Gefahrenquellen
Anweisung	detaillierte Ablaufbeschreibung
Simulation	gefahrlose Vorgangssimulation, Entkopplung des Trainings von hochpreisigen Produkten, flexible Inhaltsanzeige
Lernzeug	automatische Vermittlung der Nutzbarkeit an den Lerner, Individualisierung der Darstellung

Die einzelnen Stufen der lernerzentrierten psychomotorischen Methode können Abbildung 6.4 entnommen werden. In den Abschnitten 6.3.1 bis 6.3.3 wird auf sie detailliert Bezug genommen. Tabelle 6.4 auf Seite 69 ermöglicht hierbei eine zusammenfassende Übersicht über die einzelnen Phasen sowie die Rollen von Lerner, Lernzeug und Lehrendem innerhalb der Methode.

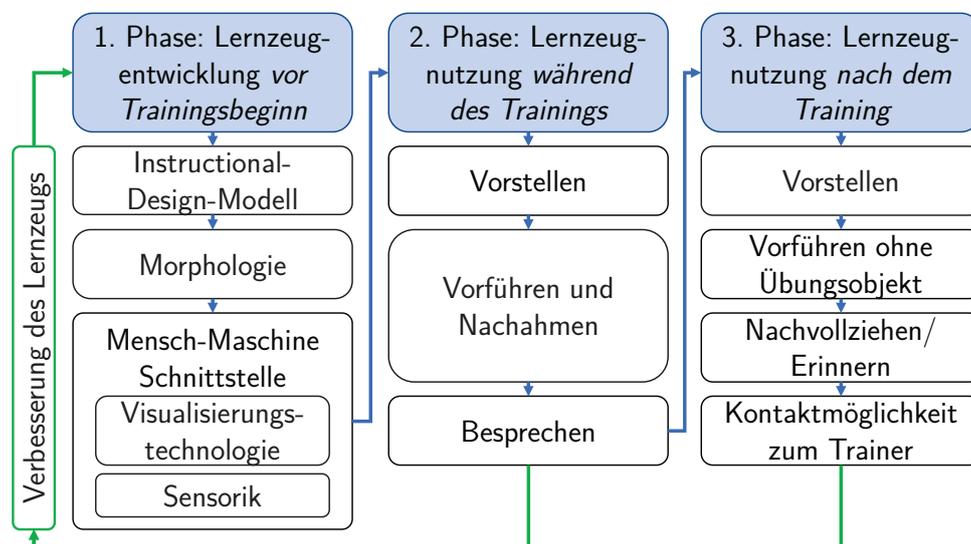


Abbildung 6.4: Lernerzentrierte psychomotorische Trainingsmethode

Die erste Phase der lernerzentrierten psychomotorischen Methode thematisiert die Entwicklung von Lernzeugen, basierend auf Anforderungen aus Instructional-Design-Modellen, der zu entwickelnden Lernzeugmorphologie und den eingesetzten Mensch-Maschine Schnittstellen. Diese Phase findet vor einem Training statt und kann zeitlich flexibel gestaltet werden. Konkret betrachtet werden bei der Lernzeugentwicklung, neben den produktionstechnisch gebotenen Gestaltungsmaßnah-

men bezogen auf Funktionalität und Gerät, das Bestimmen von Zielgruppe, Lerninhalt, Lernzielen, Visualisierungstechnologie und Sensorik. Die zweite Phase adressiert die Lernzeugnutzung während des Trainings und umfasst zunächst das Vorstellen, Vorführen und Nachahmen der zu erlernenden Montagevorgänge. Diese werden mithilfe des zuvor entwickelten Lernzeugs durchgeführt. Das Nachahmen kann zudem durch Sensorik im Lernzeug überwacht werden. Als letzter Schritt der zweiten Phase werden gewonnene Erkenntnisse in der Gruppe besprochen. Die letzte Phase beinhaltet das lernzeuggestützte Üben nach dem eigentlichen Training, bei dem keine physischen Artefakte mehr zur Verfügung stehen und somit andere Lernzeuganforderungen gelten.

6.3.1 Lernzeugentwicklung vor Trainingsbeginn

Im Folgenden wird näher auf die Entwicklung lernerzentrierter Lernzeuge eingegangen. Hierbei werden zunächst Zielgruppe und Lerninhalt adressiert, wie von den meisten Instructional-Design-Modelle vorgesehen. Anschließend wird das bestehende Lernzeugkonzept durch die Entwicklung einer Morphologie erweitert.

6.3.1.1 Instructional-Design-Modell

Vor Trainingsbeginn müssen Zielgruppe definiert, Lerninhalt bestimmt sowie geeignete Lernzeuge identifiziert oder entwickelt werden. Hierbei kann nach dem von [Pal-17] entwickelten Instructional Design Model for Engineering Education (IDMEE) vorgegangen werden. Hiernach kann die Entwicklung von Kursen in die folgenden vier Stufen eingeteilt werden:

- *Who Wer? Zielgruppe* Mensch
- *What Was? Lerninhalt* Produkt
- *How Wie? Lernmethode* Prozess
- *By which means Mit welchen Lernmitteln? Auswahl von Werkzeugen* Betriebsmittel

Neben dem IDMEE kann auch das am häufigsten verwendete Instructional-Design-Modell: ADDIE verwendet werden, welches die Bestandteile *Analysis, Design, Development, Implementation and Evaluation* enthält [Bra-75, Nie-08, Mor-11]. Auch bei ADDIE müssen innerhalb der Analyse mithilfe von Leitfragen Zielgruppe und Lernziele identifiziert werden. In Design und Entwicklung werden anschließend Lernmethode und verwendete Lernwerkzeuge identifiziert und entwickelt. Zusätzlich zum Ablauf nach dem IDMEE werden bei ADDIE wie auch in der vorliegenden Arbeit in Kapitel 7 die entwickelten Elemente implementiert und evaluiert. Um den Lerninhalt besser strukturieren zu können, kann auf die Unterweisungsgliederung nach der Vier-Stufen-Methode zurückgegriffen werden. Hier müssen die Fragen *Was? Wie? und Warum so?* beantwortet werden. Hierdurch werden Lerninhalte festgelegt, welche anschließend mithilfe des Lernzeugs vermittelt werden sollen. Diese Vorgehensweise wird auch für die lernerzentrierte psychomotorische Methode übernommen, da sie die Auseinandersetzung des Trainers mit den Lerninhalten fördert. Nach der Festlegung von Zielgruppe und Lerninhalt wird in der lernerzentrierten psychomotorischen Methode zunächst das zu erstellende Lernzeug mithilfe einer Morphologie näher eingegrenzt.

6.3.1.2 Erweiterung des Lernzeugkonzepts und Entwicklung einer Morphologie

Um bestehende Lernzeuge einteilen zu können und zukünftige Lernzeuge zielgerichteter mithilfe von Standards entwickeln zu können, wurde in [Men-18a] eine in Tabelle 6.3 visualisierte Lernzeugmorphologie auf Grundlage der Morphologie für Lernfabriken [Abe-17] entwickelt. Alle in dieser Arbeit entwickelten Lernzeuge wurden in die Morphologie integriert und können Tabelle 7.2 bis 7.8 entnommen werden.

Tabelle 6.3: Lernzeugmorphologie *Übersicht* nach [Men-18c]

Entwicklung und Betrieb	
Zielgruppe	Grundschulbildung, Sekundarstufe, Hochschulbildung, Weiterbildung
Anbieter	akademische Institution, Industrieunternehmen, Dienstleister
Entwicklungsprojekt	intern, extern unterstützt, extern
Finanzierung der Entwicklung	intern, öffentlich, Crowdfunding
Finanzierung des Betriebs	produktorientiert, nutzenorientiert, ergebnisorientiert
Zugänglichkeit	eingeschränkt, frei verwendbar, frei änderbar
didaktisches Design	
kognitive Lernziele	Erinnern, Verstehen, Anwenden, Analysieren, Evaluieren, Erschaffen
affektive Lernziele	Aufnehmen, Reagieren, Werten, Wertordnung, Bestimmtsein durch Werte
psychomotorische Lernziele	Imitation, Manipulation, Präzision, Handlungsgliederung, Naturalisierung
Kompetenzen	sozio-kommunikativ, technisch und methodisch, persönlich, aktivitäts- und handlungsorientiert
individuelle Lernadaption	keine, Bildungslevel, Kultur, Vorwissen, Lernstil
parallele Lerner	limitiert (bestimmte Anzahl), unlimitiert
Autonomie des Lernenden	extern reguliert, selbstreguliert, selbstorganisiert
Immersion	keine, gering, mittel, hoch, vollständig
Lerndauer	Minuten, Stunden, Tage, Wochen
Rückmeldung an den Lerner	indirekt, richtig/falsch, berichtigend, assistierend, permanente Unterstützung
Verbindung zum Arbeitsplatz	arbeitsgebunden, arbeitsverbunden, arbeitsorientiert
didaktische Einbindung	eigenständiges Konzept, integriert in bestehendes Konzept
technisches Design	
Tangibilität	vollständig digital, digitales Lernzeug und physisches Modell, digitales Lernzeug und physisches Produkt
Komplexität	einfach, kompliziert, komplex, chaotisch, ungeordnet
Mobilität	stationär, teilweise mobil, mobil
Abstraktionsgrad	gering, mittel, hoch
Komponenten	standard, angepasst, neu entwickelt

Sprachabhängigkeit	voll abhängig, reduziert, unabhängig
zusätzliche Wertschöpfung	verarbeitete Materialien, Hardware, Software, Service
Umgebung	
Phase des Produktlebenszyklus	Entwicklung, Produktion, Distribution, Nutzung, Lebensende
Prozesstyp	Unikat-, Kleinserien-, Serien- und Massenproduktion
Fabrikebene	Netzwerk, Fabrik, Zelle, Station, extern

Die Definition der Lernzeugeigenschaften u. a. nach [Sel-09, Men-18c] wurde bereits in Abschnitt 3.3.4 beschrieben. Um diese Eigenschaften realisieren zu können, werden im Folgenden einige Methoden vorgestellt und ihre Auswirkungen auf die Lernzeugdefinition erläutert. Für die Entwicklung von Lernzeugen mit Bezug auf den kognitiven Lernbereich sei an dieser Stelle auf Veröffentlichen zum Thema ITS verwiesen [Fry-60, Pso-88, Van-11]. Die Erhöhung der Lern- und Lehrproduktivität wird vor allem durch die geeignete Auswahl der Visualisierungstechnologie sowie eine intuitive Gestaltung erreicht. Auf die Visualisierungstechnologie sowie auf die Auswirkungen von Sprachreduzierung wird in Abschnitt 6.3.1.3 eingegangen. Die intuitive Gestaltung wird im Folgenden näher erläutert.

Um bei einem Lernzeug die automatische Vermittlung seiner Funktionalität durch die Benutzung an den Nutzer zu ermöglichen, müssen gewisse Bedingungen erfüllt werden. Zunächst muss der Nutzer in die grundlegende Bedienung des Lernzeugs eingeführt werden, diese sollte möglichst einfach gehalten werden. Zum Erlernen der Bedienung können Bilder, Videos, Animationen, Text, Audiomitteilungen oder weitere Elemente verwendet werden. Lernzeuge sollten laut Definition IKT enthalten, welche u. a. die Funktionalitätsvermittlung steuert. Da in der vorliegenden Arbeit vor allem die visuelle Komponente der Informationsvermittlung behandelt wird, werden im Folgenden verstärkt visuelle Elemente von Mensch-Maschine-Schnittstellen adressiert. Nach [Dix-04] existieren generelle jedoch unverbindliche Grundsätze für die Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen. Sie können in die drei Oberkategorien *Erlernbarkeit*, *Flexibilität* und *Robustheit* eingeteilt werden.

- Die *Erlernbarkeit* beschreibt, wie leicht die Funktionsweise einer Anwendung verstanden und erlernt werden kann. Hierbei bilden Vorhersagbarkeit, Nachvollziehbarkeit, Vertrautheit, Generalisierbarkeit und Konsistenz die wesentlichen Elemente um die Erlernbarkeit eines Systems zu ermöglichen. Eine Verbindung von Erlernbarkeit und extrinsischer kognitiver Belastung scheint hierbei sinnvoll, da das einfache Verstehen der Funktionsweise einer Anwendung in einer geringen extrinsischen kognitiven Belastung resultiert.
- Die *Flexibilität* einer Anwendung beschreibt, inwieweit einem Nutzer die Möglichkeit geboten wird, alternative Interaktionsformen auszuwählen, um die von ihm bevorzugte wählen zu können. Dialog-Initiative, Nebenläufigkeit, Migrationsfähigkeit, Austauschbarkeit und Individualisierbarkeit können hierbei die Flexibilität einer Anwendung erhöhen. Flexibilität und Interaktivität haben hierbei direkten Einfluss auf die intrinsische kognitive Belastung, welche für einen guten Lernerfolg möglichst hoch sein sollte.
- Die *Robustheit* einer Anwendung unterstützt den Nutzer dabei sein Ziel zu erreichen und informiert ihn über seinen Fortschritt innerhalb der Anwendung. Die Robustheit wird durch Sichtbarkeit, Wiederherstellbarkeit, Reaktionsvermögen und Aufgabenkonformität beschrieben.

Neben den Gestaltungsgrundsätzen von [Dix-04] existieren weitere Ansätze zum Thema Usability und Entwicklung von Schulungs-/Trainingswerkzeugen, von denen im Folgenden einige beispielhaft präsentiert werden:

- *Heuristik der acht goldenen Regeln* [Shn-17]: Acht goldene Regeln des Interface Designs:
 - *Streben nach Konsistenz*: Einheitliche Nutzung von Farben, Formen und Abläufen in ähnlichen Situationen.
 - *universelle Gebrauchstauglichkeit*: Anpassung der Inhalte auf die zu identifizierenden Nutzergruppen mit Bezug auf Wissensunterschiede, Alter, Behinderungen und technologische Vielfalt. Ermöglichen einer Schritt-für-Schritt Anleitung für unerfahrene Benutzer sowie die Möglichkeit Inhalte zu überspringen oder Tastenkürzel zu nutzen.
 - *Rückmeldung*: Darstellen von Handlungskonsequenzen, um dem Nutzer zukünftiges Verbesserungspotenzial aufzuzeigen.
 - *Abschluss von Handlungen verdeutlichen*: Wird der Abschluss einer Handlung oder Handlungsfolge deutlich gekennzeichnet, kann sich beim Anwender ein Erfolgserlebnis einstellen und er kann sich auf neue Aufgaben konzentrieren.
 - *Nutzerfehler vermeiden oder tolerieren*: Eine Fehlerhafte Handlung des Nutzers sollte nicht dazu führen den gesamten Prozess zu wiederholen, sondern nur den einen fehlerhaften Schritt. Bei einer fehlerhaften Formulareingabe sollte nicht das gesamte Formular neu beantwortet werden müssen, sondern Vorschläge für einen korrigierten Eintrag gemacht werden.
 - *Möglichkeit geben, Aktionen rückgängig zu machen*: Um dem Nutzer die Angst vor dem Begehen von Fehlern zu nehmen, sollten diese immer rückgängig gemacht werden können.
 - *System kontrollierbar gestalten*: Ein überraschendes oder inkonsistentes Verhalten des Systems auf Nutzereingaben soll vermieden werden, um beim Nutzer keine Frustration hervorzurufen. Er soll stets wissen, welche Systemreaktionen durch sein Verhalten ausgelöst werden.
 - *keine unnötigen Informationen vermitteln*: Relevante Informationen sollten stets eingeblendet sein, komplexe Inhalte dagegen vermieden werden.
- *Design Thinking* [Ueb-15, Lew-17]: Design Thinking ermöglicht das Erarbeiten innovativer Lösung durch Input von Menschen unterschiedlicher Fachdisziplinen und berücksichtigt dabei das menschlich-psychologische Faktoren genauso, wie technische, prozessuale und Faktoren der Wirtschaftlichkeit.
- *Axiomatisches Design* [Suh-98, Lee-06, Fie-09]: Mithilfe von Axiomen, Strukturen und Prozessen, soll ein zu entwickelndes Design möglichst intuitiv gestaltet werden. Bei den Axiomen sollen Designparameter und/oder Funktionsanforderungen nicht gekoppelt werden. Falls mehrere Designs eine Funktion gleich gut erfüllen, sollen Informationsgehalt minimiert und Erfolgswahrscheinlichkeit maximiert werden. Innerhalb der Strukturen liegen Kunden- *was benötigt wird* und Prozessdomäne *wie es erzeugt wird* sowie funktionale *was es tut* und physische *wie es aussieht* Domäne. Innerhalb der Prozesse werden Zerlegungsschritte festgelegt, um Designparameter und Funktionsanforderungen festzulegen.

- *Methodisches Konstruieren* [Nae-18] nach [VDI2221, Fel-13]: Auf Basis der Systemtechnik soll Konstruieren mit methodischer Unterstützung effizient, zielsicher und mit bestmöglichem Ergebnis erfolgen.

6.3.1.3 Bewertung und Auswahl von Visualisierungstechnologien

Viele produzierende Unternehmen nutzen vorrangig text- oder bildbasierte Montageanleitungen zu Schulungs- und Trainingszwecken, wollen jedoch mehr in digitale Trainingsunterlagen investieren [Wie-14b]. Da diese Umfrage jedoch bereits fünf Jahre zurückliegt, wurde für die vorliegende Arbeit 2019 eine erneute Umfrage bei 80 Unternehmen durchgeführt, um die derzeitige Situation bei produzierenden Unternehmen in Deutschland zu erfassen. Die folgenden Ergebnisse beziehen sich auf die 37 Unternehmen, welche manuelle Montagefähigkeiten ausführen und die Umfrage vollständig beantwortet haben. Die vollständigen Ergebnisse der Umfrage können dem Anhang ab Seite 152 entnommen werden. Es wird deutlich, dass fast 60 % der Unternehmen derzeit weder AR noch VR einsetzen und nur ca. 20 % AR für Trainingszwecke nutzen. Die beiden Firmen, welche AR-Entwicklungen von Fremdfirmen nutzen, geben an, mit den angebotenen Leistungen eher zufrieden bzw. sehr zufrieden zu sein. Bei den sieben Firmen mit AR-Eigenentwicklungen waren die meisten insgesamt eher zufrieden, bei der Preis-Leistung jedoch eher unzufrieden, bzw. sehr unzufrieden. Bei der Frage welche AR-Vorteile bei Trainings für Firmen am ehesten kaufentscheidend seien, sind kürzere Anlernzeiten, Qualitätssicherung und Fehlerminimierung die häufigsten Antworten. 30 der 37 Befragten schätzen die Kompetenz ihrer Kollegen eigene AR-Anwendungen zu erstellen als sehr schlecht oder eher schlecht in Bezug zu AR ein. Nur 7 von 37 Befragten geben an AR schon einmal selbst in einem Training eingesetzt zu haben. Als Haupthindernisgründe für die Einführung von AR im eigenen Unternehmen werden zu hoher Erstellungs- und Änderungsaufwand und zu hohe Erstellungskosten genannt. Die Unternehmen geben an, neben AR folgende Trainingsmethoden zu nutzen:

- Einarbeitung durch erfahrene Kollegen 71 %
- Schulung/Workshop durch Experten 55 %
- Bereitstellung linearer Dokumentation und Lehrmaterialien: schriftliche Anleitungen: PDF, Bildanleitungen... 51 %
- Videos 28 %
- 3D-PDF 6 %
- Virtual Reality (VR) 6 %
- kein formales Training 4 %

Für die zu entwickelnden Lernzeuge muss eine passende Visualisierungstechnologie ausgewählt werden. Nach [Hal-18] sind Erstellungs- und Interpretationsaufwand über den Aufbereitungsgrad eines Trainingsdokuments miteinander verbunden, wie aus Abbildung 1.1 ersichtlich wird. Dieser Aufbereitungsgrad ist jedoch auch abhängig von der Visualisierungstechnologie selbst. [Hal-18] gibt als Beispiel für einen geringen Aufbereitungsgrad eine textuelle Informationsbereitstellung, als mittleren Aufbereitungsgrad Umrisse von Formen und als hohen Aufbereitungsgrad detailgetreue CAD-Modelle an, bezieht sich dabei jedoch lediglich auf die Visualisierungstechnologie AR. Einige Visualisierungs-

technologien haben somit das Potenzial einen höheren Aufbereitungsgrad zu erreichen als andere. Im Folgenden werden daher beispielhafte Einflussgrößen identifiziert und ihre Auswirkung auf Erstellung und Interpretation der einzelnen Visualisierungstechnologien qualitativ bewertet. Sie werden im Folgenden für den Erstellungs- und Interpretationsaufwand aufgezeigt. Abbildung 6.5 gibt anschließend einen qualitativen Überblick darüber wie stark diese Einflussgrößen bei den einzelnen Visualisierungstechniken ausgeprägt sind.

Erheblichen Einfluss auf den *Erstellungsaufwand* haben neben Aufgabenumfang und -inhalt vor allem die für die Erstellung eines Lernzeugs benötigten Fertigkeiten, welche von der verwendeten Visualisierungstechnologie abhängen. Reicht die Fertigkeit ein Textsatzprogramm bedienen zu können oder werden Programmierfertigkeiten benötigt? Der Erstellungsaufwand steigt auch mit dem Aufbereitungsgrad der Technologie. Der *Interpretationsaufwand* gibt an, wie schwer es einem Lerner fällt, Informationen zu verarbeiten und auf die vor ihm liegende Aufgabe zu übertragen. Ein hoher Interpretationsaufwand führt zu einer hohen extrinsischen und somit lernirrelevanten kognitiven Belastung [Por-17]. Vor allem bei den ersten Montagewiederholungen im Erlernen psychomotorischer Tätigkeiten wird für das Verständnis des Montagevorgangs nach [Fit-67] der kognitive Bereich angesprochen. Weiteren Einfluss auf den Interpretationsaufwand haben die folgenden Größen:

- *kognitive Distanz*: Eine Erhöhung der kognitiven Distanz erfordert auch eine Erhöhung der lernirrelevanten kognitiven Belastung und somit auch des Interpretationsaufwands [Por-17].
- *Sprachabhängigkeit*: Eine starke Sprachabhängigkeit erhöht die extrinsische kognitive Belastung, da die textuellen Inhalte erst für den visuellen Montagevorgang interpretiert werden müssen.
- *Eignung für komplizierte Prozesse*: Die vorgestellten Visualisierungstechnologien eignen sich unterschiedlich gut, um komplizierte Montagevorgänge darzustellen wie sie bspw. im Sondermaschinenbau häufig auftreten. Wie gut das *Erkennen* und *Analysieren* komplizierter Zusammenhänge möglich ist, hängt also von der genutzten Visualisierungstechnologie ab.
- *Immersion*: Das Immersionsmaß beschreibt in Bezug auf virtuelle Realität wie sehr ein Nutzer in eine virtuelle Welt integriert werden kann. Je natürlicher die virtuelle Umgebung wahrgenommen wird und je mehr Sinne angesprochen werden, umso höher ist das Maß der Immersion. Das Maß der Immersion bei Printanleitungen, Videos und Animationen ist sehr gering. Die natürliche Umgebung ist stark von der Anleitung abgegrenzt, eine Vermischung zwischen beiden ist nicht gegeben. VR und AR haben dagegen ein sehr hohes Maß an Immersion da der Nutzer vollständig in die virtuelle Umgebung integriert werden kann. Seine Sichtweise ist bei VR und bei den meisten AR-Anwendungen egozentrisch. Im Gegensatz dazu ist die Sichtweise bei Bildschirmvisualisierungen oder Printanleitungen exozentrisch. Innerhalb von AR-Anwendungen steigt das Maß an Immersion durch eine kontextsensitive Einbindung von Inhalten, also einer Einblendung von Informationen direkt an der Wirkstelle. Bei nicht kontextsensitiven AR-Anwendungen werden Inhalte an einer festen Position der Brille oder des Displays projiziert. Weiteren Einfluss auf die Immersion übt die Wahl des Darstellungsgerätes aus. AR kann mit geringer Immersion auf Monitoren, mit mittlerer Immersion durch Projektoren oder mit hoher Immersion in HMD dargestellt werden.

Abbildung 6.5 verdeutlicht, dass das Immersionsmaß für die einzelnen Visualisierungstechnologien von links nach rechts zunimmt. Ein hohes Maß an Immersion ermöglicht das Verständnis komplizierter Prozesse. Um eine starke Immersion zu erreichen, ist ein hoher Erstellungsaufwand erforderlich. Er steigt auch von links nach rechts. Bezogen auf den Erstellungsaufwand gilt für die einzelnen Visualisierungstechnologien:

- *Text*: Zur Erstellung einer einfachen Textanleitung müssen lediglich eine Sprache sowie der Umgang mit Stift und Papier oder mit einem Textsatzprogramm beherrscht werden.
- *Bild*: Werden dem Text Bilder hinzugefügt, muss der Umgang mit einer Kamera und Bildbearbeitungssoftware beherrscht werden.
- *Video*: Videos benötigen nicht nur Kenntnisse über die Bearbeitung eines einzelnen Bildes, sondern über die eines aus vielen Bildern zusammengesetzten Films. Der Umgang mit Videokameras und -bearbeitungssoftware ist erforderlich sowie neben der örtlichen die zeitliche Anordnung von Informationen innerhalb des Films.
- *Animation*: Die Erstellung kann anders als beim Film nicht auf existierende Produkte und Abläufe zurückgreifen, diese müssen erst erstellt und animiert werden. Hierzu ist der Umgang mit einem CAD-System sowie mit Animationssoftware nötig. Zeitliche und räumliche Anordnung von Informationen auf einem zweidimensionalen Display müssen implementiert werden.
- *VR*: Für die Erstellung einer VR-Lernumgebung müssen Informationen nicht nur wie bei einer Animation in Raum und Zeit auf einem zweidimensionalen Display angeordnet werden, sondern in einem HMD oder in einer CAVE im dreidimensionalen Raum. Zudem muss eine Interaktion mit dem virtuellen Inhalt durch handgeführte Interaktionsgeräten implementiert werden.
- *AR*: AR benötigt neben den von VR geforderten Fertigkeiten zusätzlich die Kombination von physischer und virtueller Umgebung mithilfe von Markern.

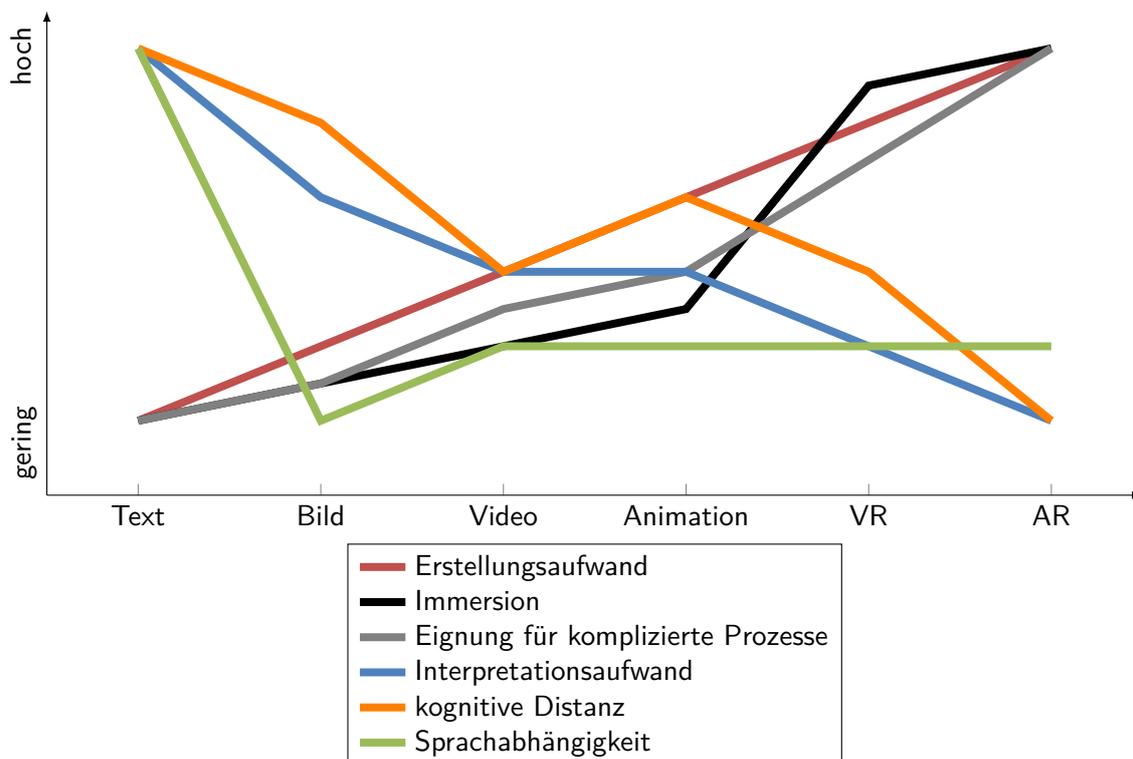


Abbildung 6.5: Qualitativer Vergleich der Visualisierungstechnologien

Gegenläufig zum Erstellungsaufwand entwickelt sich der Interpretationsaufwand nach Abbildung 1.1 mit steigendem Aufbereitungsgrad innerhalb einer Visualisierungstechnologie. Dies hängt jedoch nicht nur vom Aufbereitungsgrad, sondern wie Abbildung 6.5 verdeutlicht auch von der Visualisierungstechnologie selbst ab. Auf den Interpretationsaufwand üben u. a. Sprachabhängigkeit und kognitive Distanz einen Einfluss aus. Textuelle Visualisierungen sind vollständig sprachabhängig, Bilder nicht. Video, Animation, VR und AR können vollständig ohne Sprache auskommen. Meist haben sie jedoch einen geringen Sprachanteil, um mehrdeutige Zusammenhänge von Animationen eindeutig zu kommunizieren. Die kognitive Distanz ist bei Nutzung von Text besonders stark ausgeprägt, da hier Beschreibungen erst interpretiert und mit visuellen Bauteilen verglichen werden müssen. Bilder, Videos und Animationen können den Interpretationsprozess vereinfachen. VR verbindet Anleitung und Wirkstelle im virtuellen und AR verbindet sie im physischen Raum. Abbildung 6.6 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Entwicklungs- und Interpretationsaufwand qualitativ und adressiert zudem das Entwicklungspotenzial der vorgestellten Visualisierungstechnologien. Printanleitungen (Text und Bild) stellen die älteste Form der Visualisierungstechnologien dar. Ohne einen disruptiven Innovationssprung sind weder im Erstellungs- noch im Interpretationsaufwand große Verbesserungen im Interpretations- und Entwicklungsaufwand zu erwarten. Bei Videos sind in Zukunft zwar eine bessere Qualität sowie eine stärkere Einbindung von Computeranimationen zu erwarten, letztgenannte erhöhen jedoch auch den Erstellungsaufwand. Computeranimationen, AR und VR bieten alle das Potenzial vollständig oder zumindest teilautomatisiert erstellt werden zu können, da die enthaltenen Informationen vollständig digital generiert werden. Hierdurch könnte der Erstellungsaufwand drastisch gesenkt, der Interpretationsaufwand jedoch kaum erhöht werden.

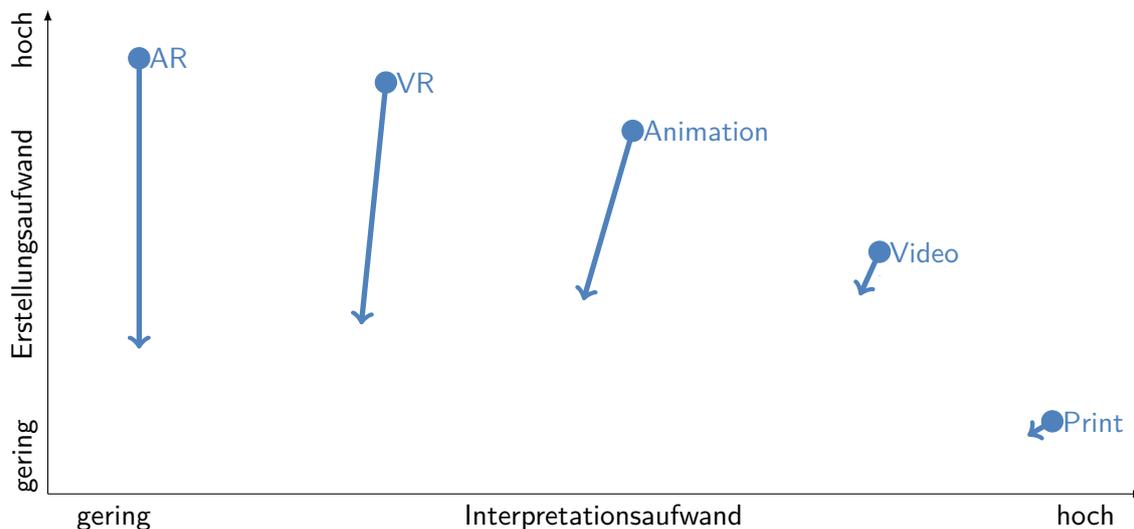


Abbildung 6.6: Qualitative Darstellung des Entwicklungspotenzials von Visualisierungstechnologien

Die prinzipielle Möglichkeit der teilautomatisierten Erstellung von AR-Lernzeugen konnte innerhalb der vorliegenden Arbeit verifiziert werden. Hierzu wurde innerhalb der Programmierumgebung Unity ein Plugin entwickelt, in welchem der Anwender schrittweise durch den Erstellungsprozess geführt wird. Anders als bei [Mak-13] wird keine existierende Montagereihenfolge auf Basis von Extensible Markup Language (XML)-Dokumenten vorausgesetzt. XML bildet eine Weiterentwicklung von HTML und wird genutzt, um Daten zwischen Programmen auszutauschen. Für die teilautomatisier-

te Erstellung mit dem entwickelten Unity Plugin werden zunächst Polygonmodelle des zu montierenden Objekts im montierten Zustand geladen. Anschließend wird vom Programm ein Vorschlag für die Montagereihenfolge generiert, welcher vom Anwender angepasst werden kann. Hiernach wird automatisiert in umgekehrter Montagereihenfolge mithilfe von inkrementeller Kollisionsprüfung die Montagebaugruppe wie bei [Mak-13] automatisch demontiert. Zeitgleich werden die Animationen für eine Montagedarstellung generiert. Abschließend hat der Anwender noch die Möglichkeit die Montagepfade anzupassen. Zudem können Texte, Bilder und Videos eingefügt werden, um Zusammenhänge zu verdeutlichen. Ein passender Marker für die Darstellung in AR wird ebenfalls vom Programm generiert, basierend auf einem vom Anwender zu definierenden Bild. Hiernach kann die AR-Anwendung zur Nutzung auf Smartphone oder Tablet kompiliert und nach der Übertragung und Installation auf dem Anwendungsgerät sofort genutzt werden. Herausforderungen ergeben sich jedoch, wenn die Montage nicht nur translatorisch erfolgt, sondern zusätzlich von einer rotatorischen Bewegung überlagert wird, wie bei der Montage einer Schraube. Hierbei führt die alleinige translatorische Kollisionsprüfung zu keinem Ergebnis. Auch wenn bei der Montage Objekte verformt werden müssen wie bei einer Clip-Verbindung, reicht eine Kollisionsprüfung nicht aus, um teilautomatisiert Montageanimationen zu erstellen. Zudem müssen ein Rückmeldesystem zur Kontrolle des Lernalters sowie die automatische Vermittlung der Nutzbarkeit des Lernzeugs an den Nutzer weiterhin manuell implementiert werden. Durch eine teilautomatisierte Erstellung von AR-Lernzeugen, sinken Erstellungsaufwand und -kosten. Zu den Erstellungskosten zählen auch die Investitionskosten für Hardware und Software, [Rad-14] welche gesondert für die entwickelten Lernzeuge untersucht werden. Dies kann durch einer Wirtschaftlichkeitsrechnung erfolgen.

6.3.2 Lernzeugnutzung *während des Trainings*

Um die entwickelten Lernzeuge effizient nutzen zu können, wird eine didaktische Lernmethode benötigt. Tabelle 6.4 verdeutlicht die Unterschiede der Aufgaben von Lehrer, Lerner und Lernzeug innerhalb von Vier-Stufen-, Leittext- und neuer Lernzeugmethode. Nach der Entwicklung des Lernzeugs soll der Trainer eher eine lernbegleitende Rolle übernehmen. Er muss nur aktiv werden, falls eine Frage durch die Lernzeuganwendung nicht beantwortet werden kann. Diese Fragen der Lernenden bieten ein hohes Verbesserungspotenzial für die Weiterentwicklung der Lernzeuge.

Abbildung 6.7 verdeutlicht speziell die Unterschiede zwischen Vier-Stufen- und Lernzeugmethode. Die Funktion des Lehrenden wird fast vollständig vom Lernzeug übernommen, er entwickelt die Lernzeuge vor dem Training und fungiert während des Trainings nur noch als Ansprechpartner bei eventuell auftretenden Problemen. Im Vergleich zur Vier-Stufen-Methode, kann in der Lernzeugmethode das Eintreten des Lernalters in den aktiven Prozess der Montagedurchführung viel früher erfolgen. Nach dem Vorstellen der Lerninhalte kann der Lerner nun die einzelnen Montagevorgänge induktiv nachvollziehen und nachahmen und lernt schrittweise den gesamten Montagevorgang kennen. Bei der Vier-Stufen-Methode wird meist ein eher deduktiver Ansatz gewählt, in welchem zunächst der gesamte Montagevorgang vom Trainer mehrfach vorgeführt wird und der Lerner diesen passiv beobachtet. Im Folgenden werden die einzelnen Phasen der Lernzeugmethode *Vorstellen, Vorführen und Nachahmen, Besprechen* und *Üben nach dem Training* detailliert vorgestellt und erläutert.

Tabelle 6.4: Vergleich der Aufgaben von Lehrendem, Lernendem und Lernzeug bei Vier-Stufen-, Leittext-, und Lernzeugmethode angelehnt an [Sch-05, S. 153] nach [Koc-91, S. 15]

Vier-Stufen-Methode		Leittextmethode		Lehrender lehrt durch...	Lernzeugmethode Lernzeuginteraktion	Lernender lernt durch...
Lehrender lehrt durch...	Lernender lernt durch...	Lehrender lehrt durch...	Lernender lernt durch...			
Erklären	Zuhören	Entwickeln von Leitfragen Besprechen von Antworten	selbständiges Informieren	Entwickeln und Verbessern von Lernzeugen	Aufzeigen adäquater Lernziele, automatische Vermittlung der eigenen Funktionalität	selbständige Interaktion mit dem Lernzeug optionales erfahrungsbasiertes Planen
Vormachen	Zuschauen	Entwickeln von Planungshilfen Besprechen von Vorschlägen	selbständiges Planen		Sprachreduzierung, Interaktivität und individualisierte Darstellung IKT gestütztes Feedback	
Korrigieren	Nachmachen	Entwickeln von Leitsätzen Besprechen von Problemen	selbständiges Durchführen	Besprechen von Problemen und Verbesserungspotenzialen		selbständiges lernzeuggestütztes Durchführen, Vergleich eigener Ablaufplanung mit Lernzeugdarstellung
Bewerten	Üben	Entwickeln von Kontrollbögen Auswerten der Ergebnisse	selbständiges Kontrollieren	Besprechen von Problemen und Verbesserungspotenzialen	interaktive, individualisierbare Wiederholung	selbständiger Nachvollzug des zuvor Gelernten

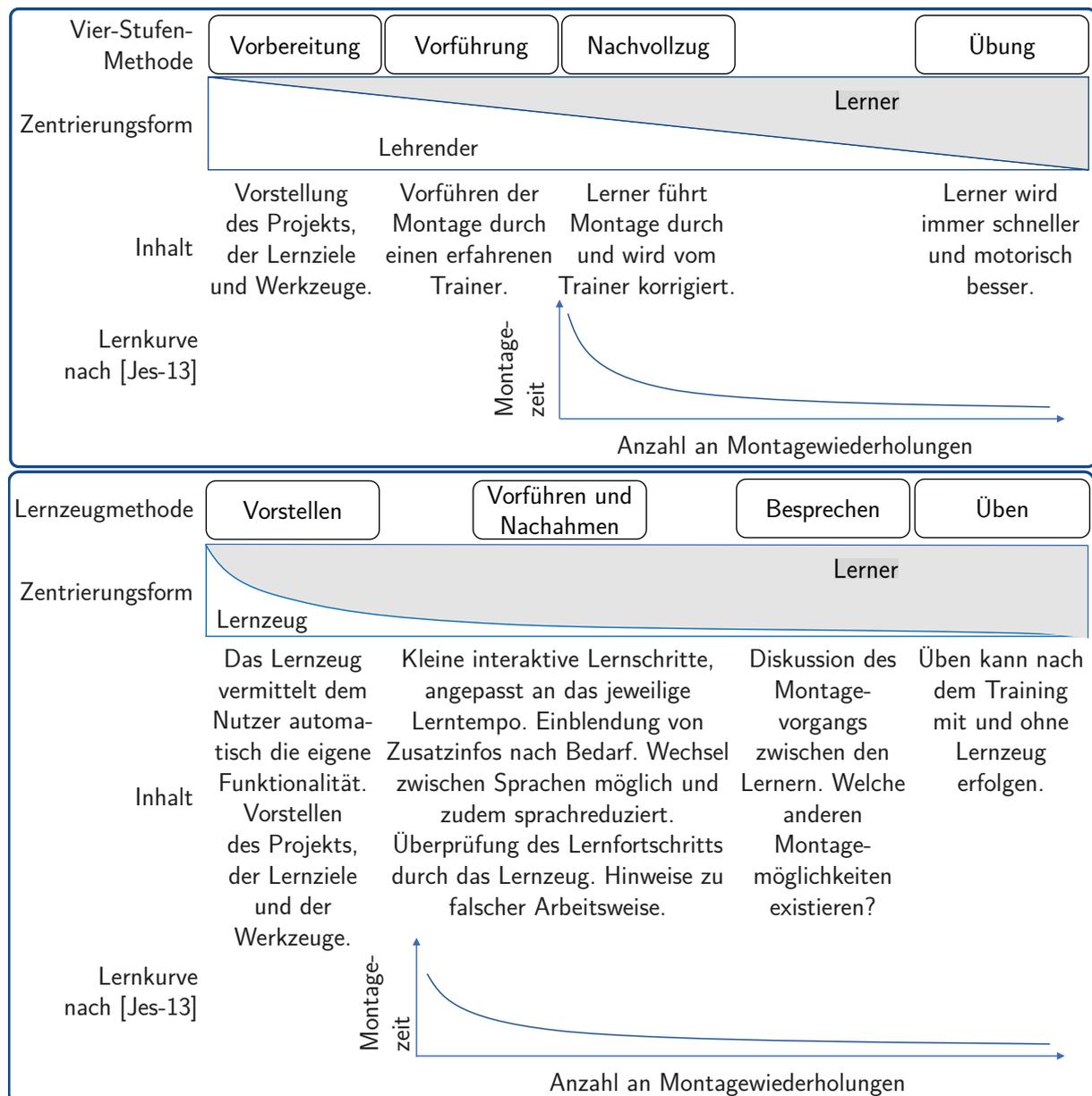


Abbildung 6.7: Vergleich zwischen Vier-Stufen- und lernerzentrierter psychomotorischer Lernzeugmethode

6.3.2.1 Vorstellen mithilfe von Lernzeugen

Anders als die Interaktion mit einem Trainer bei der Vier-Stufen-Methode oder das zeitintensive Lesen von Informationsarbeitsblättern in der Leittextmethode, muss der Umgang mit einem Lernzeug zunächst kurz erlernt werden. Eine einheitliche Gestaltung von Bedienkonzept und Aufbau der Lernzeuge innerhalb der Trainingssituationen eines Unternehmens, kann diesen Aufwand bei Folgenutzungen jedoch erheblich reduzieren. Hierbei kann u. a. auf die zuvor beschriebenen Gestaltungsgrundsätze nach [Dix-04] und [Shn-17] zurückgegriffen werden. Bei neueren Technologien wie VR und AR existieren Bedienkonzepte, welche mithilfe von Gesten- oder Sprachsteuerung oder mithilfe von Controllern eine Interaktion mit dem virtuellen Inhalt ermöglichen. Der Umgang mit diesen Bedienkonzepten ist den meisten Nutzern zunächst fremd und muss erlernt werden. Mithilfe von Video, Text, Au-

dio und oder Animationen wird das Auswählen einer Schaltfläche verdeutlicht. Sie soll anschließend vom Nutzer nachgeahmt werden. Erst wenn der Umgang mit dem Lernzeug erlernt wurde, wird der Lerninhalt adressiert.

Beim lernzeuggesteuerten Vorstellen der Arbeitsaufgabe werden wie in der Leittext- und Vier-Stufen-Methode Informationen darüber gegeben, was getan werden soll. Der Inhalt der durchzuführenden Arbeitsaufgabe wird mithilfe einer kurzen textuellen, bebilderten oder animierten Darstellung erläutert. Die Planung einer Arbeitsaufgabe vor ihrer Durchführung bildet einen weiteren lernerzentrierten Bestandteil der Leittextmethode und ermöglicht eine Auseinandersetzung des Lerners mit den zu erlernenden Inhalten auf Basis seines Vorwissens. Eine Planung der durchzuführenden Arbeitsaufgabe kann je nach verfügbarer Zeit und Zielstellung des Trainings von den Lernern erarbeitet und im Anschluss an die Durchführung der Aufgabe mit dem Lernzeug verglichen werden.

6.3.2.2 Vorführen und Nachahmen mithilfe von Lernzeugen

Vorführen und Nachahmen eines Montagevorgangs können innerhalb der lernerzentrierten psychomotorischen Lernzeugmethode individuell vom Lerner gestaltet werden. Der Trainer gibt lediglich einen groben Rahmen vor und stellt die benötigten Lernzeuge zur Verfügung. Bei der Vier-Stufen-Methode werden Trainingsgeschwindigkeit und die Art wie gelernt wird vom Trainer bestimmt. In der Lernzeugmethode wird beides dem Lerner überlassen. Je nach Vorwissen kann er sich zunächst einen groben Überblick über die Montagevorgänge verschaffen, indem er lediglich die visuellen Elemente des Montagevorgangs betrachtet. Er kann jedoch auch Detailinformationen zu bestimmten Trainingsinhalten erhalten oder Schritt-für-Schritt einzelne Montagesequenzen anzeigen und anschließend nachvollziehen. Der lernerzentrierte Anteil wird hierdurch stärker betont als in der Vier-Stufen-Methode. Die Interaktivität innerhalb des Lernzeugs kann durch die Wahl einer geeigneten Visualisierungstechnologie stark verbessert werden [Rey-07]. Eine Manipulation des dargestellten Inhalts in Form von Schnitten durch Bauteile, rotatorische und translatorische Bauteilverschiebung, Ein- und Ausblenden von Bauteilen, Anzeige von Bauteilnamen oder Einblenden von Sicherheitshinweisen lässt sich mithilfe eines höheren Aufbereitungsgrades bei einigen Visualisierungstechniken wie AR, VR und Animation gut realisieren. Die Nutzung von AR ermöglicht zudem eine sehr geringe kognitive Distanz zwischen Lern- und Anwendungsort.

Wenn der Lerner zuvor wie bei der Leittextmethode anhand von Leitfragen das Arbeitsvorgehen selbst geplant hat, kann dieses nun mit der vom Lernzeug vorgegebenen Arbeitsmethode verglichen werden. Die Abweichungen zwischen beiden Methoden können im nächsten Schritt *Besprechen der Ergebnisse* dann mit den anderen Trainingsteilnehmern oder dem Trainer diskutiert werden.

Mithilfe von Sensorik kann das Lernzeug prüfen, ob ein Montagevorgang der Vorgabe entspricht oder ein Montagefehler begangen wurde. Hierbei ist es möglich, mithilfe von Vorranggraphen eine Logik zu implementieren, welche unterschiedliche Montagepfade erlaubt [Neg-15]. Es können sowohl die Identifikation als auch das Fügen überwacht werden [Mül-16a]. Bei geeigneter Sensorik ist auch eine Verifizierung von Prüfvorgängen denkbar. Durch diese u. a. von [Hac-93] geforderte direkte Rückmeldung über die Qualität der von ihm durchgeführten Teilaufgabe wird der Lernerfolg deutlich erhöht.

Um beim Erlernen der ausgewählten Montagevorgänge neben der expliziten Wissensvermittlung durch das Lernzeug auch eine implizite Wissensvermittlung realisieren zu können, kann auf die implizite Vermittlung durch Sozialisation nach [Sch-96, Non-92] zurückgegriffen werden. Gemeinsame Erfahrungen können bei zeitgleicher Nutzung von Lernzeugen innerhalb von Kleingruppen dazu führen, dass implizites Wissen zwischen den Lernern ausgetauscht wird. Um zusätzlich die unterschiedlichen Lerntypen nach [Kol-71] zu adressieren, können die Trainingsteilnehmer unterschiedliche Rollen im Wissensvermittlungsprozess übernehmen. Ein Teilnehmer kann das Lernzeug bedienen, ein anderer montiert das Produkt, ein weiterer notiert Unterschiede zwischen dem vom Lernzeug dargestellten Montagevorgang und der Erfahrung in der Gruppe und ein vierter Teilnehmer übernimmt die Koordination der Rollenverteilung und organisiert einen Rollentausch nach einem Montagedurchlauf. Die einzelnen Rollen innerhalb der Durchführung des Montagevorgangs können hierbei beliebig mehrfach getauscht werden. Je nach Vorwissen der Lerner, können bestimmte Schwerpunkte im Training auch von den Lernern selbst gesetzt werden. Ausgehend von Blooms Taxonomie der Lernziele sollte den Lernern in einem Montagetraining immer ermöglicht werden, sich auf kognitiver Ebene an die gezeigten Inhalte zu *erinnern*, diese zu *verstehen* und sie hiernach *anwenden* zu können [Blo-56]. In komplizierten Umgebungen sollten die Lernenden zudem in die Lage versetzt werden, die gegebenen Inhalte zu *analysieren* [Sno-07], was durch eine entsprechende grafische Aufbereitung und IKT-Unterstützung vereinfacht werden kann.

Diese kognitiven Lernziele sind u. a. nach [Fit-67] für das Erreichen psychomotorischer Lernziele ausschlaggebend. Die erste kognitive Lernstufe im Erlernen motorischer Fertigkeiten erfordert erhöhte Aufmerksamkeit des Lerners, um zu verstehen was sich wann und wie bewegen muss, um ein bestimmtes Ergebnis zu erzielen [Fit-67]. Innerhalb eines Trainings können die psychomotorischen Lernziele *Imitation* und *Manipulation* nach [Blo-56] erreicht werden. Das Erreichen des nächsthöheren Lernziels, der *Präzision*, hängt von der Dauer des Montagetrainings und der Wiederholungszahl ab. Werden die zu erlernenden Vorgänge nur ein bis zweimal wiederholt, wie im Sondermaschinenbautraining üblich, so ist die Stufe der *Präzision* meist erst nach dem Training erreichbar.

Die affektiven Lernziele eines Montagetrainings innerhalb der Lernzeugmethode sind am schwierigsten zu bestimmen, da ihre Einteilung nach [Blo-56, Kra-64] weniger präzise ist als auf der kognitiven Ebene. Innerhalb der Lernzeugmethode wird das Erreichen der affektiven Lernziele *Aufnehmen* und *Reagieren* angestrebt. Eine Erhöhung der Lernmotivation und Hörbereitschaft, wie im Lernziel *Aufnehmen* gefordert, kann bspw. durch die Verwendung innovativer Lernzeuge und neuartiger Visualisierungstechnologien erreicht werden. Diese Art der Motivation nimmt jedoch mit dem Neuheitsgrad der Technologie oder des Lernzeugs ab [Her-14]. Die geforderte aktive Beteiligung der Lernenden am Lernprozess wird durch die Lernzeugverwendung gefördert. Präsentationen und Vorträge sind nicht geeignet, um das affektive Lernziel des *Reagierens* zu erreichen, da sie den Lerner in einer passiven Rolle halten.

6.3.2.3 Besprechen der Ergebnisse

Für Montagetätigkeiten in der Serienfertigung wird meist nur eine Montagereihenfolge aus dem existierenden Vorranggraphen vermittelt, welche möglichst effizient ist oder eine geringe Fehlerwahrscheinlichkeit enthält. In der Sondermaschinenmontage müssen Servicemonteure oft basierend auf ihrem Wissen und anhand einer Bauteilzeichnung eine geeignete Montagereihenfolge selbst identifizieren. Daher ist es erforderlich, dass die Teilnehmer untereinander weitere Reihenfolgen aus dem Vorranggraphen und ihre Vor- und Nachteile diskutieren. Der Input kann hierbei direkt von den Trainingsteilnehmern kommen und vom Trainer oder einem Teilnehmer moderiert werden. Haben die Teilnehmer vor der Durchführung der Montage eigene Vorgehensweisen entwickelt, können diese nun nach der Durchführung mit der durch das Lernzeug vermittelten Methode verglichen werden. Zudem sollten vom Trainer Unterschiede zwischen Lernzeugdarstellung und physischer Montage adressiert werden. Oft werden diese aber bereits von den Teilnehmern bemerkt und angesprochen.

6.3.3 Lernzeugnutzung *nach dem Training*

Der Übungsvorgang findet aus Zeitgründen meist nach dem eigentlichen Präsenztraining statt. Er dient dem Wiederholen der während des Präsenztrainings erlernten psychomotorischen Montagevorgänge, um sie später einfacher anwenden zu können. Das Üben gemeinsam mit einem Trainer bzw. unter seiner Beobachtung ist bei Trainings der Sondermaschinenmontage nur begrenzt möglich, da dieser sich nach dem Training meist nicht mehr in örtlicher Nähe zum Lerner befindet. Es erfolgt ein eigenständiges Üben der Montagevorgänge. Auch hierzu können Lernzeuge eingesetzt werden, jedoch ändern sich die Anforderungen an diese Lernzeuge sowie die genutzte Visualisierungstechnologie. Die hochpreisigen und oft schweren physischen Übungsobjekte sind kaum zur Mitnahme durch die Lernenden geeignet und nicht in ausreichender Anzahl für alle Teilnehmer vorhanden. Daher müssen Lernzeuge für nach dem Training stattfindende Übungsvorgänge vollständig intangibel sein. Die interaktiven Visualisierungstechnologien VR und Animationen eignen sich sehr gut für diese Übungsvorgänge, da sie vollständig intangibel sind. Auch Videos wären denkbar, sie ermöglichen jedoch meist nur eine lineare Darstellung der Montagevorgänge. Zudem ist eine interaktive Betrachtung der Montagevorgänge aus unterschiedlichen Blickwinkeln bei Videos nicht möglich. Auch AR eignet sich nur bedingt zum Üben nach dem Training, wenn die Übungsobjekte an denen die AR-Einblendungen visualisiert werden nicht mitgeführt werden können. Die Darstellungen und die Art der Interaktion sollten nach dem Training nach Möglichkeit dieselbe wie während des Trainings oder zumindest vom Bedienkonzept an diese angelehnt sein, um ein erneutes Erlernen im Umgang mit dem Lernzeug zu vermeiden.

6.4 Bewertung

Auf Grundlage der Vier-Stufen- und der Leittextmethode konnte eine neue Lernmethode für die Lernzeugnutzung im lernerzentrierten Training psychomotorischer Montagevorgänge entwickelt werden. Einflüsse aus Anweisungs-, und Simulationsmethode sowie die Einbindung von Lernzeugen ermöglichen eine stärkere Lernerzentrierung innerhalb der neuen Methode. Der Trainer ist in der neuen Methode für die Erstellung und Weiterentwicklung der Lernzeuge zuständig sowie für das Besprechen der Ergebnisse nach dem Training. Die Rolle des Montagetrainers wandelt sich somit von einem aktiven Trainer stärker zu einem Lernzeugentwickler und zu einem begleitenden Coach. Tabelle 6.5 visualisiert den Erfüllungsgrad der Anforderungen innerhalb der Lernzeugmethode. Fast alle Anforderungen werden größtenteils oder voll erfüllt. Eine Sozialisation für die implizite Wissensvermittlung entsteht innerhalb der Lernzeugmethode nur, wenn sie in Gruppen durchgeführt wird. Die Lernzeugmethode ermöglicht dies zwar, erfordert es aber nicht. Eine Rückmeldung über die Qualität der durchgeführten Arbeit hängt wie bei der Simulationsmethode stark von der Art der genutzten Sensorik und ihrer Lernzeugeinbindung ab.

Tabelle 6.5: Bewertung der Lernzeugmethode

	1 Montagevorgangvermittlung	2 Lernzielkommunikation	3 Darstellung komplizierter Zusammenhänge	4 Vermeidung arbeitsgebundenen Lernens	5 Lernzeugnutzung	6 Lernzeugentwicklung	7 Sozialisation	8 Variable Gruppengröße	9 Simulation gefährlicher Abläufe	10 Interaktiv und intuitiv	11 Rückmeldung	12 Lernerzentriert	13 Psychomotorisches Lernen	14 Individualisierung	15 Sprachreduzierung
Lernzeugmethode	●	●	●	◐	●	●	◐	●	●	●	◐	●	●	●	◐

Legende: ● voll erfüllt, ◐ größtenteils erfüllt, ◑ zur Hälfte erfüllt, ◒ teilweise erfüllt, ○ nicht erfüllt

7 Beispielhafte Implementierung

Im Folgenden werden Lernzeuge für das lernerzentrierte Training von Montagefähigkeiten nach der Lernzeugmethode entwickelt und getestet. In einem ersten Schritt wird die prinzipielle Eignung der Visualisierungstechnologien AR, VR und Animation an einfachen Montagebeispielen mit einer großen Gruppe von Testteilnehmern verifiziert. Die aus diesen Tests zur grundlegenden Eignung der Visualisierungstechnologien gewonnenen Erkenntnisse und das Feedback der Lerner werden genutzt, um die Lernzeuge zu verbessern und anschließend nach der entwickelten Lernzeugmethode im Sondermaschinenbau zu testen. Der Sondermaschinenbau wurde als Produktionstyp ausgewählt, da hier am häufigsten komplizierte Montagevorgänge auftreten. Sollte die Lernzeugmethode bei diesen komplizierten Vorgängen eingesetzt werden können, so ist eine Übertragbarkeit auf weitere einfachere Montagevorgänge wie sie häufiger in Serien- und Massenproduktion auftreten als wahrscheinlich anzusehen. Die Tests im Sondermaschinenbau werden beim Unternehmen MAN Energy Solutions SE (MAN ES), Berlin vorgenommen. MAN ES wurde als Beispiel für ein Sondermaschinenbauunternehmen ausgewählt, da die Firma komplizierte und hochpreisige Sondermaschinen auf Kundenwunsch in Baustellenmontage fertigt und somit jedes Produkt ein Unikat darstellt. MAN ES agiert weltweit und Mitarbeiter sowie Kunden arbeiten in einem internationalen Umfeld.

In der *ersten Phase der Lernzeugmethode* werden angelehnt an den Ablauf der Instructional-Design-Modelle ADDIE und IDMEE zunächst die Zielgruppe der Servicemonteure sowie der zu vermittelnde Lerninhalt der Getriebekompressormontage adressiert. Anschließend werden die entwickelten Lernzeuge beschrieben. Hierbei wird speziell auf die ausgewählte Visualisierungstechnologie und Sensorik sowie auf die Einordnung des Lernzeugs in die Morphologie und die berücksichtigten Gestaltungsgrundsätze eingegangen. Es werden drei unterschiedliche Arten von Lernzeugen vorgestellt. Das erste digitale Lernzeug vermittelt psychomotorische Abläufe anhand eines physischen Modells. Das zweite vermittelt diese Abläufe mithilfe eines physischen Originals und das dritte ist vollständig digital und wird primär für die Nutzung ohne physische Objekte nach dem Abschluss eines Trainings entwickelt. Die Nutzbarkeit der Lernzeuge während des Trainings in der *zweiten Phase der Lernzeugmethode* oder nach dem Training in der *dritten Phase der Lernzeugmethode* wird anschließend anhand von Nutzertests validiert. Bei MAN ES finden Montagetrainings nur ein- bis zweimal jährlich mit Gruppengrößen von bis zu 15 Personen statt. Die hierbei trainierten Montagevorgänge können eine Montagezeit von mehreren Stunden oder auch Tagen umfassen. Um trotzdem einen Vergleich mehrerer Visualisierungstechnologien und Methoden mit vielen Nutzern in kurzer Zeit realisieren zu können, werden für die ersten Tests kürzere 10-15 minütige Montagevorgänge untersucht, welche nicht vollständig dem Sondermaschinenbau zuzuordnen sind, jedoch eine größere Gruppe an Testteilnehmern ermöglichen. Hierbei soll die prinzipielle Eignung der ausgewählten Visualisierungstechnologien AR, VR und Computeranimationen untersucht werden. Wie in der Lernzeugmethode beschrieben, werden die aus diesen ersten Nutzertests gewonnenen Erkenntnisse anschließend genutzt, um die Lernzeuge zu verbessern und weiterzuentwickeln. Die Lernzeugverbesserungen sowie die Änderungen des Lerninhalts für die Sondermaschinenmontage werden hiernach kurz vorgestellt. Abschließend werden die Lernzeuge in Sondermaschinenmontagetrainings implementiert und ihre Wirksamkeit wird validiert.

7.1 Zielgruppe und Lerninhalt

In der ersten Phase der Lernzeugmethode werden zunächst die Zielgruppe und der Lerninhalt analysiert. Um die Zielgruppe einzugrenzen, wird im Folgenden die Trainingssituation bei MAN ES betrachtet. Bei MAN ES, Berlin finden bisher jährlich für die Montage von Getriebekompressoren ein bis zwei einwöchige Trainings statt. Je nach Gruppengröße von bis zu 15 Teilnehmern, organisieren und leiten ein bis zwei Trainer diese Trainings. Wissensträger aus Konstruktion und Fertigung halten Vorträge oder führen Montagevorgänge an Maschinen in der Produktion vor. Teilnehmer dieser Trainings sind internationale Field Service Engineers (FSEs).

Tabelle 7.1 gibt einen Überblick über die Zielgruppe der FSEs. Neben den FSEs könnten die zu entwickelnden Lernzeuge auch durch Auszubildende, Werkmonteure, Konstrukteure, Arbeitsvorbereiter oder mittleres und oberes Management genutzt werden, um grundlegende Kenntnisse über einen Getriebekompressor und seine Montage zu erlangen. Diese weiteren Zielgruppen werden in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht weiter betrachtet, da die Anforderungen an die langjährige Ausbildung von Werkmonteuren sowie die Vermittlung des prinzipiellen Aufbaus und der Funktion einer Sondermaschine an Führungskräfte inhaltlich und strukturell von den Anforderungen eines weiterbildenden Trainings für Servicemonteure stark abweichen.

Tabelle 7.1: Zielgruppenanalyse

Eigenschaft	Field Service Engineers (FSEs)
Arbeitsort	extern bei internationalen Kunden
Alter in Jahren	25-55
Geschlecht	vorwiegend männlich
Medien-Affinität	hoch bis sehr hoch
Montageerfahrung	sehr hoch
Vorwissen zum Getriebekompressor	Das Vorwissen der FSEs ist stark unterschiedlich. Dies ist vor allem auf die vielen existierenden Produktvarianten, stark divergierende Berufsentwicklungspfade sowie eine hohe Mitarbeiterfluktuation bei FSEs zurückzuführen.
Arbeitsprachen	Englisch sowie die jeweilige Muttersprache
bisherige Lernmethoden	Expertenpräsentationen und Nachvollzug der Montage anhand der Montagevorführung durch einen erfahrenen Mitarbeiter.
Tätigkeiten	Schadensaufnahme und -analyse, Demontage, evtl. Reparatur, Montage und Endprüfung
Arbeitsweisenstreuung	sehr hoch, jeder arbeitet auf seine Weise und auf das jeweilige Problem angepasst
genutzte Hardware	Android und Apple Smartphones, Windows Laptops
was wird benötigt?	individuell anpassbare Visualisierungen der Montagevorgänge

Alle FSEs bei MAN ES haben langjährige Erfahrung in der Montage von Sondermaschinen, welche sie entweder in der Produktion bei MAN ES oder bei anderen Arbeitgebern erworben haben. Das Einstiegsalter für einen Servicemonteure liegt bei ca. 25 Jahren. Aus mehreren mündlichen und schriftlichen Befragungen mit FSEs wurde deutlich, dass alle entweder ein Smartphone oder ein Tablet besitzen und dieses auch mehrfach täglich nutzen [Men-17]. Ein prinzipielles Verständnis im Umgang mit digitalen Medien kann also vorausgesetzt werden. Zudem wurde aus Interviews mit den FSEs deutlich, dass sie sich eine bessere Visualisierung der Montagevorgänge wünschen, als es die im Sondermaschinenbau üblichen Bauteilzeichnungen ermöglichen. Aufgrund der internationalen Ausrichtung von MAN ES und weltweit lokalisierter Servicestandorte, werden die Montagetrainings meist in englischer Sprache durchgeführt. Hierbei kann jedoch nicht von einem einheit-

lich guten Sprachverständnis bei allen Teilnehmern ausgegangen werden, auch wenn dies explizit gefordert wird. Eine Reduzierung des Sprachanteils in den zu entwickelnden Lernzeugen könnte daher vorteilhaft sein.

MAN ES produziert in Berlin mit ca. 400 Mitarbeitern Kompressoren für Anwendungen in Raffinerien, der Kohlenwasserstoff verarbeitenden Industrie und der Industriegasbranche. Jeder Kompressor wird individuell auf Kundenwünsche als Unikat gefertigt. Die beiden in Berlin gefertigten Kompressortypen sind Getriebekompressor (*Radial Gear Type compressor, RG*) und Einwellenkompressor (*Radial Barrel Type compressor, RB*). MAN ES Berlin ist zudem weltweites Kompetenzzentrum für die in Abbildung 7.1 dargestellten RG-Kompressoren. Diese RG-Kompressoren sind Mehrwellen-Radialverdichter. Das von einer Dampfturbine oder einem Elektromotor erzeugte Drehmoment wird über eine Welle auf das Getrieberad in der Mitte des Kompressors übertragen. Wie bei einem Planetengetriebe sind um dieses Sonnenrad planetenförmig ein bis fünf Ritzelwellen angeordnet. An jeder Ritzelwelle sitzen ein bis zwei Verdichterstufen. Die Anzahl der Stufen wird von den Prozessanforderungen und dem Verhältnis von Kosten zu Effizienz bestimmt. Typische Vorteile von Getriebekompressoren sind hohe Effizienz, niedrige Betriebskosten, geringer Investitionsaufwand und großer Arbeitsbereich. Spezifische Anwendungen umfassen Industriegase, Öl- und Gas-, CO₂-, Harnstoff-, gereinigte Terephthalsäure- oder Salpetersäure-Prozesse. Typische Leistungsdaten eines Getriebekompressors umfassen Saugvolumenströme bis 690.000 m³/h und einen maximalen Austrittsdruck von 250 bar. Zu den Merkmalen des Getriebekompressors gehören individuell wählbare Impellergeschwindigkeit für optimale Strömung, modulare Komponentenpakete für kurze Lieferzeiten, modulare Dichtungssysteme, maximale Flexibilität des Antriebs sowie Kühlungsmöglichkeiten zwischen den einzelnen Verdichterstufen [MAN-19].

Zur Definition der Lernziele auf Basis der Vier-Stufen-Methode werden die Fragen *Was? Wie? und Warum so?* in Bezug auf die durchzuführenden Montagetätigkeiten in Interviews mit MAN ES-Monteuren diskutiert. Des Weiteren wird die Montage von Getriebekompressoren über mehrere Monate begleitet und schriftliche sowie fotografische Aufzeichnungen angefertigt. Die Lernziele der zu entwickelnden Lernzeuge werden im Folgenden für jedes Lernzeug beschrieben.



Abbildung 7.1: Montage eines Getriebekompressors mit freundlicher Genehmigung von MAN ES Energy Solutions SE

7.2 Lernzeugentwicklung und -validierung

Im Folgenden werden in der *ersten Phase der Lernzeugmethode* mehrere Lernzeuge zur Vermittlung psychomotorischer Montagevorgänge entwickelt und während der Nutzung in Montagetrainings in der *zweiten und dritten Phase der Lernzeugmethode* validiert. Wie zuvor beschrieben ist die Validierung der zu entwickelnden Lernzeuge jedoch innerhalb von Sondermaschinenbauunternehmen aufgrund der geringen Verfügbarkeit von Testteilnehmern nur selten möglich. Externe Testteilnehmer wie Studierende dürfen die Lernzeuge für die Montage des originalen Getriebekompressors aufgrund von Geheimhaltungs-, Sicherheits- und Zeitgründen nicht testen. Um trotzdem die Eignung der Visualisierungstechnologien AR, VR und Computeranimation mit einer großen Anzahl an Testteilnehmern zunächst grundlegend zu testen, werden Lernzeuge für einfache Montagevorgänge entwickelt und diese anschließend mit Studierenden, Auszubildenden und FSEs getestet. Die aus diesen Tests zur grundlegenden Eignung der Visualisierungstechnologien gewonnenen Erkenntnisse, werden hiernach genutzt, um die Lernzeuge für ein Montagetraining eines Getriebekompressors anzupassen. Anschließend wird die Erhöhung der Lern- und Lehrproduktivität der entwickelten Lernzeuge in Sondermaschinenmontagetrainings validiert.

Für die Validierung der grundlegenden Eignung der ausgewählten Visualisierungstechnologien wurde darauf geachtet, dass sowohl der Arbeitsinhalt als auch die Testsituation möglichst nah an den Gegebenheiten der Sondermaschinenmontage liegen, da nicht alle Testteilnehmer in der Sondermaschinenmontage arbeiten. Aufgrund der meist mehrere Stunden dauernden Montage einzelner Komponenten im Sondermaschinenbau, ist es oft nicht möglich, Montagevorgänge innerhalb eines Trainings mehr als ein- oder zweimal zu üben. Der Einfluss der verwendeten Trainingsmethode auf die Montagedurchführungszeit ist bei der ersten Durchführung zudem am größten. Daher erhalten die getesteten Studierenden, Auszubildenden und FSEs auch nur ein- bis zweimal die Möglichkeit dieselbe Montage durchzuführen. Vor allem die Durchführungszeit und die Fehlerhäufigkeit des ersten Montagevorgangs werden detailliert untersucht. Es werden drei Lernzeuge entwickelt, welche die interaktiven Visualisierungstechnologien AR /VR und Computeranimation nutzen. Die Lernzeuge sowie die genutzten Montageobjekte werden im Folgenden adressiert:

- AR/VR-Lernzeug zur Montage physischer Modelle am Beispiel eines additiv gefertigten Getriebekompressormodells
- HoloLens-Lernzeug zur Montage physischer Originale am Beispiel einer Steckdose, eines Lichtschalters sowie eines Getriebekompressors
- 3D-PDF-Lernzeug zur virtuellen Montage am Beispiel eines elektrischen Radnabenmotors sowie eines Getriebekompressors

Steckdose und Radnabenmotor wurden als Montageobjekte für die prinzipielle Eignung der Visualisierungstechnologien AR und Animation gewählt, da sie aufgrund von geringer Größe und Gewicht leicht transportabel sind und die Montagevorgänge keinen großen Zeitaufwand erfordern. Die zur Lernzeugerstellung benötigten CAD-Daten werden bei Sondermaschinenbauunternehmen bereits im Produktentstehungsprozess erzeugt und können für die Nutzung in AR, VR oder 3D-PDF umgewandelt werden. CAD-Daten ermöglichen es, neue Produkte welche physisch noch nicht existie-

ren virtuell in eine Trainingsunterlage zu integrieren. So kann die Montage eines Produktes anders als bei Videos oder fotografischen Bildanleitungen bereits vor dessen Produktion geübt werden und der Montagevorgang kann interaktiv aus beliebigen Betrachtungswinkeln und durch Einblendung verdeckter Komponenten nachvollzogen werden. Abbildung A.10 auf Seite 149 visualisiert den Aufbau der Lernwerkzeuge bei einem MAN ES-Montagetaining. Sie werden in eine Trainingsumgebung bei MAN ES eingebunden, deren prinzipieller Aufbau in Abbildung 7.2 zu erkennen ist. Kernstück dieser Trainingsumgebung bildet ein 1994 produzierter Getriebekompressor, dargestellt in Abbildung 7.3.

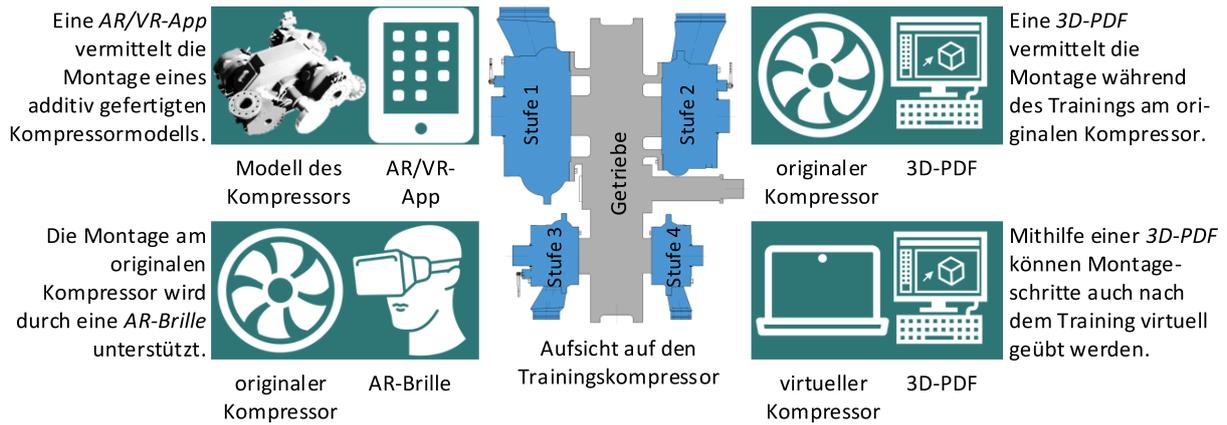


Abbildung 7.2: Layout der Trainingsumgebung bei MAN ES nach [Men-18b] und [Men-19]

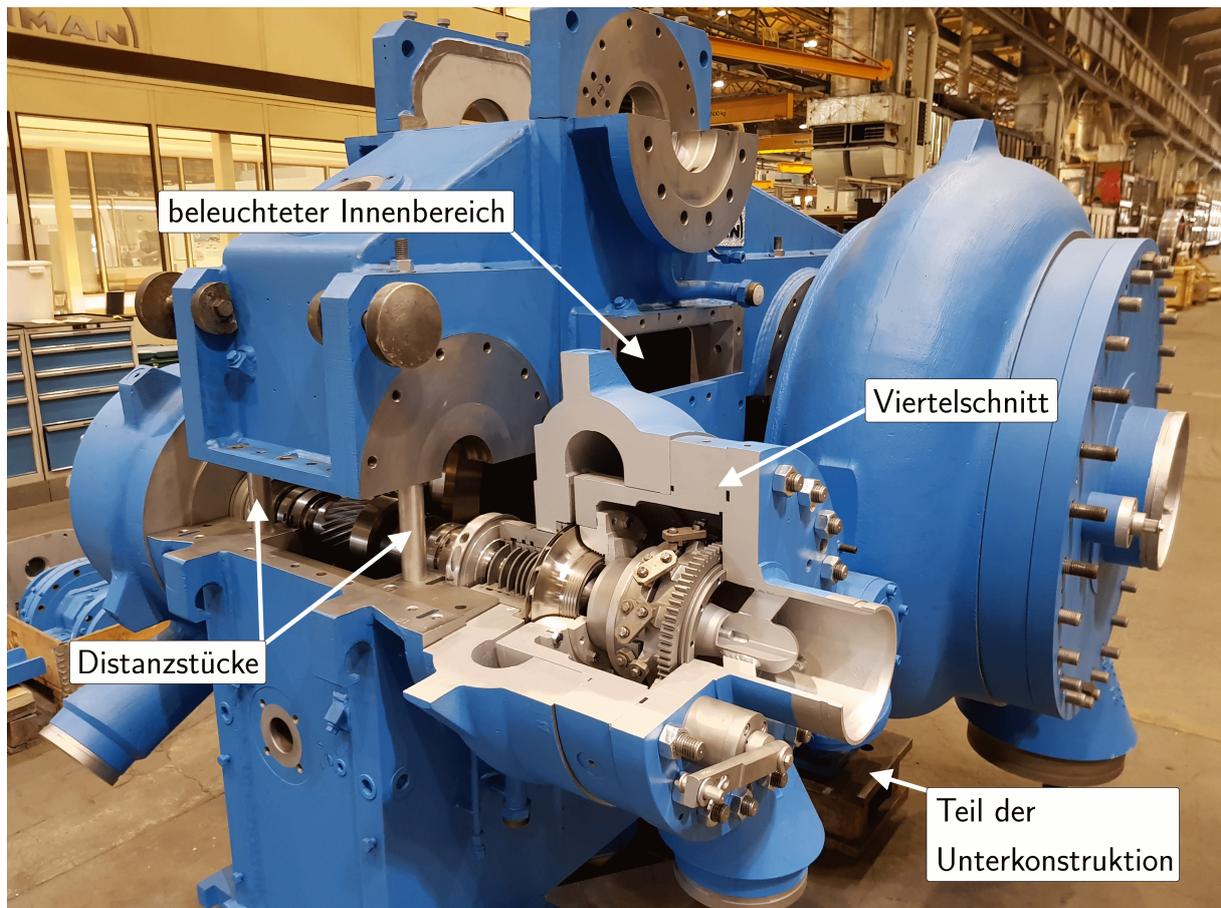


Abbildung 7.3: MAN ES Trainingskompressor

Der Kompressor wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit konstruktiv für die Nutzung in Montage-
trainings angepasst. Dies umfasst unter anderem:

- Ausführen eines Viertelschnitts durch alle nicht-drehenden Bauteile einer Kompressorstufe, um den inneren Stufenaufbau zeigen zu können
- Aufsetzen des Gehäuseoberteils auf Distanzstücke, um in das Getriebe sehen zu können
- Ausstatten des Kompressors mit Beleuchtungselementen
- Auswahl, welche Komponenten an welcher der sechs Kompressorstufen arrangiert werden, um die einzelnen Montageschritte abbilden zu können
- Design einer Unterkonstruktion und Hydraulikhebevorrichtung für den Kompressor, um ihn mobil auch ohne Kran aufstellen zu können

Durch die Nutzung dieses originalen Kompressors besteht die Möglichkeit, FSEs arbeitsverbunden Montagetätigkeiten trainieren zu lassen. Am Anfang eines Trainings soll das AR/VR-Lernzeug genutzt werden, um mithilfe eines additiv gefertigten Kompressormodells einen Überblick über den Getriebekompressor und die prinzipiellen Montagevorgänge der wichtigsten Bauteile zu vermitteln, wie es in Abbildung 7.2 verdeutlicht wird. Hiernach kann anschließend mithilfe der HoloLens oder eines 3D-PDFs die Montage am originalen Trainingskompressor trainiert werden. Im Anschluss an das Training können Montagevorgänge interaktiv mit einem 3D-PDF wiederholt und geübt werden. Im Folgenden werden für jedes Lernzeug zunächst Lernzeugentwicklung und -aufbau beschrieben. Anschließend wird die genutzte Visualisierungstechnologie auf ihre prinzipielle Eignung zur Vermittlung von Montageinhalten untersucht. Hiernach werden Lerninhalte aus der Getriebekompressormontage in die Lernzeuge eingefügt und die Lernzeuge werden basierend auf den Ergebnissen der Nutzertests verbessert. Abschließend wird die Validierung der Erhöhung der Lern- und Lehrproduktivität für das Training der Getriebekompressormontage beim Sondermaschinenhersteller MAN ES vorgenommen.

7.2.1 AR/VR-App zum Montage-Grundlagentraining mithilfe physischer Modelle

3D-gedruckte Modelle können sich besser als Konstruktionszeichnungen oder einfache VR-Anleitungen eignen, um schneller und mit weniger Fehlern im Anschluss physische Bauteile zu montieren. In einer Studie konnte gezeigt werden, dass das Training mithilfe von 3D-gedruckten Bauteilen schneller und weniger fehleranfällig ist. Verglichen mit der Nutzung von Bauteilzeichnungen konnte die durchschnittliche Montagezeit auf 30 % gesenkt werden und verglichen mit einer VR-Anleitung auf 41 % [AI-18]. [AI-18] geht allerdings nicht darauf ein, wie die einzelnen Anleitungen aussahen oder wie das Training mithilfe des 3D-Drucks ablief.

Die Montage einer einzelnen Kompressorstufe kann abhängig von Größe und Teileanzahl mehrere Tage dauern und die Montage des gesamten RG-Kompressors mit einer bis zehn Stufen erfordert teilweise mehrere Mitarbeiterwochen Arbeit. Die Teilnehmer von Montagetrainings im Sondermaschinenbau haben unterschiedliche Vorerfahrungen und Kenntnisse. Um alle auf einen gemeinsamen Wissensstand zu bringen, sollen zu Beginn eines Trainings in kurzer Zeit ein Grundverständnis von Montageobjekt und -ablauf ermöglicht und die für die Montage benötigten psycho-

motorischen Fertigkeiten initial trainiert werden. Hierzu wird ein RG-Kompressor von MAN ES mithilfe eines 3D-Druckverfahrens in einem Modell im Maßstab 1:12 nachgebildet. Zunächst muss das CAD-Modell des Kompressors vereinfacht werden. Diffizile Bauteile, welche im originalen Kompressor durch kleine Schrauben verbunden sind, werden zu größeren Baugruppen zusammengefügt und als Einzelteil gedruckt. Somit ergibt sich für den 3D-Druck eine Gesamtbauteilzahl von lediglich 47 Bauteilen, verglichen mit über 2000 Bauteilen für den originalen Getriebekompressor.

7.2.1.1 Lernzeugentwicklung und -beschreibung

Dem Ablauf der *ersten Phase der Lernzeugmethode* entsprechend, werden im Folgenden Lerninhalt, Morphologie, Visualisierungstechnologie und Sensorik adressiert. Zur Vorbereitung auf die Montage eines originalen Getriebekompressors werden grundlegende Montagevorgänge anhand der Montage des 3D-gedruckten Kompressormodells trainiert. Um diese zu erlernen, wird eine mit der Software Unity entwickelte App genutzt. Ein Umschalten zwischen deutscher und englischer Sprache erfolgt im Hauptmenü mit einem Fingertipp auf die in Abbildung 7.4 links unten zu erkennende Landesflagge. Für die meisten Inhalte werden Piktogramme genutzt, um die Sprachabhängigkeit zu reduzieren. Die App kann sowohl auf Smartphones als auch auf Tablets genutzt werden. Bei Nutzung eines

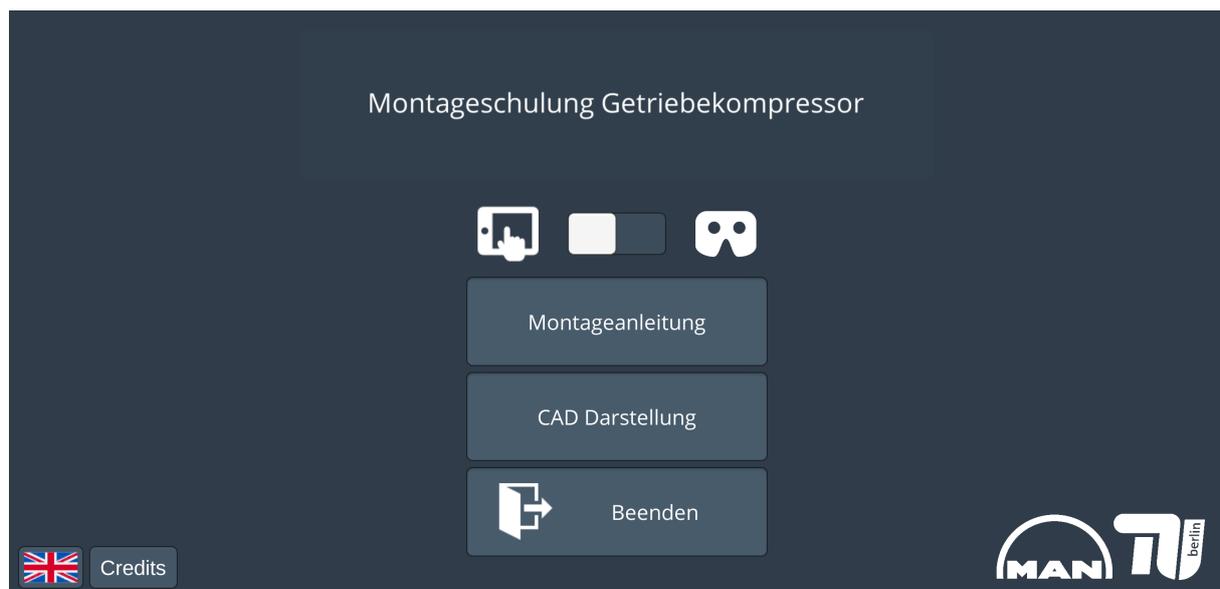


Abbildung 7.4: Hauptmenü der App

Smartphones kann durch einen Klick auf das entsprechende Feld im Menü der HMD-Modus aktiviert werden. Der Bildschirm des Smartphones wird dann in zwei für jedes Auge individuelle Bereiche geteilt und der Blick des Nutzers vollständig auf die App fokussiert, wodurch ein stärker immersives Erlebnis möglich wird. Die Vermittlung der Lernzeugfunktionalität erfolgt durch eine animierte Schritt-für-Schritt-Anleitung. Sie zeigt, wie das Smartphone in eine HMD-Halterung einzusetzen und zu bedienen ist. Da das Smartphone nicht mehr mit den Fingern bedient werden kann, wird ein Xbox-Bluetooth-Controller benötigt wie er in Abbildung 7.5 rechts zu sehen ist. Der Nutzer kann alle Funktionen der App mit dem Controller bedienen. Sie werden vor dem Einsetzen des Smartphones in das HMD durch Animationen erläutert und können auf Tastendruck erneut erklärt werden. Tabelle 7.2 zeigt die Einordnung der App in die Lernzeugmorphologie.



Abbildung 7.5: Smartphone-VR-HMD links [Ama-18a] und Xbox-Bluetooth-Controller rechts [Ama-18b]

Tabelle 7.2: Lernzeugmorphologie AR-App *Prototyp*

Entwicklung und Betrieb	
Zielgruppe	Weiterbildung
Anbieter	Industrieunternehmen
Entwicklungsprojekt	extern unterstützt
Finanzierung der Entwicklung	intern
Finanzierung des Betriebs	nutzenorientiert
Zugänglichkeit	eingeschränkt
didaktisches Design	
kognitive Lernziele	Erinnern, Verstehen, Anwenden, Analysieren
affektive Lernziele	Aufnehmen, Reagieren
psychomotorische Lernziele	Imitation, Manipulation
Kompetenzen	technisch und methodisch, aktivitäts- und handlungsorientiert
individuelle Lerneradaption	Vorwissen, Lernstil, Kultur
parallele Lerner	limitiert <i>bezogen auf den 3D-Druck</i> , unlimitiert <i>bezogen auf die App</i>
Autonomie des Lernenden	selbstreguliert und -organisiert
Immersion	mittel
Lerndauer	einige Minuten
Rückmeldung an den Lerner	indirekt
Verbindung zum Arbeitsplatz	arbeitsverbunden
didaktische Einbindung	eigenständiges Konzept
technisches Design	
Tangibilität	digitales Lernzeug mit physischem Modell
Komplexität	einfach
Mobilität	mobil
Abstraktionsgrad	mittel
Komponenten	angepasst
Sprachabhängigkeit	reduziert und teilweise unabhängig

Umgebung

Phase des Produktlebenszyklus	Produktion
Prozesstyp	Unikatfertigung
Fabrikebene	Station

Sowohl die Darstellung auf Tablet und Smartphone als auch die Darstellung in einem HMD ermöglichen die Nutzung der beiden Untermenüs *Montageanleitung* und *CAD-Darstellung*, welche im Hauptmenü aus Abbildung 7.4 ausgewählt werden können. Sie werden im Folgenden näher erklärt.

Beim Start der Montageanleitung erhält der Nutzer die Aufforderung die Kamera auf einen Bildmarker zu richten wie er in Abbildung 7.6 unten zu erkennen ist. Anschließend wird er durch Text- und Audionachricht aufgefordert das erste Bauteil neben dem Marker zu platzieren. Die Identifikation der Bauteile erfolgt durch einen visuellen Abgleich des Lerners zwischen angezeigtem Bauteil und den auf zwei DIN A3 angeordneten Bauteilen, welche Abbildung A.7 bis A.9 im Anhang entnommen werden können. Durch einen Klick auf die Pfeile rechts und links in Abbildung 7.6, kann der Nutzer durch die einzelnen Montagesequenzen navigieren. Wird der rechte Pfeil gedrückt, startet eine AR-Animation

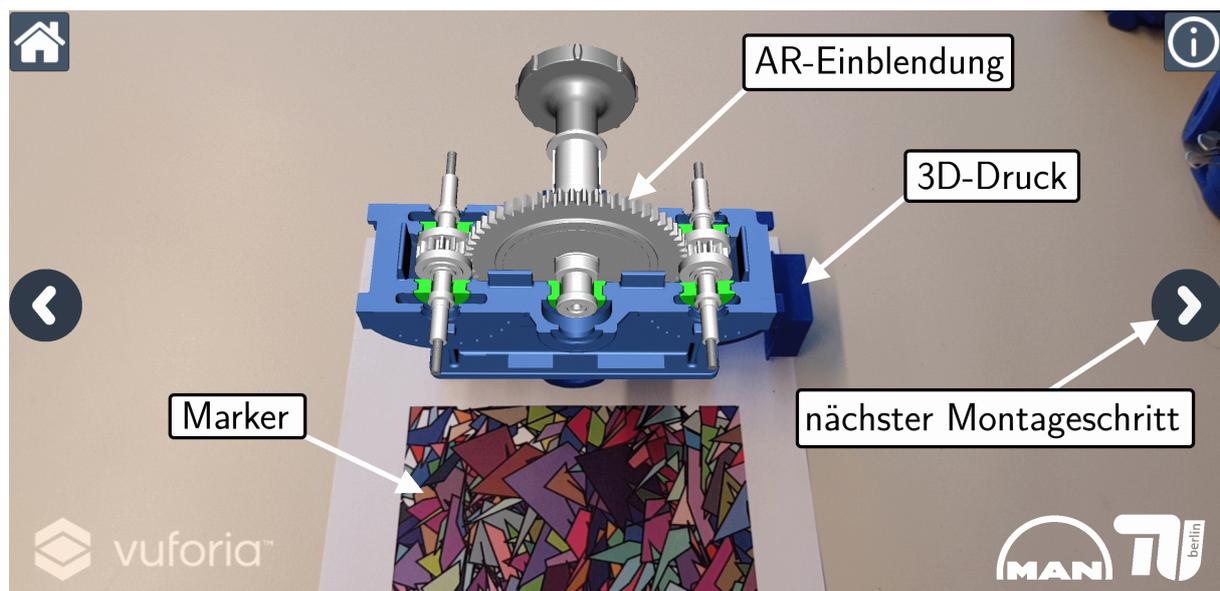


Abbildung 7.6: AR-Darstellung der Montageanleitung

der Bauteilmontage. Der Nutzer kann nun das entsprechende 3D-gedruckte Bauteil auswählen und wie gezeigt montieren. Hierbei werden Handhaben, Ausrichten und Fügen vermittelt. Anpassarbeiten sind bei der Montage des 3D-Drucks nicht nötig. Durch eine visuelle Überprüfung, ob physisches und virtuelles Bauteil deckungsgleich sind, kann valide kontrolliert werden, ob ein Bauteil richtig positioniert wurde. Ein Klick auf den Info-Button rechts oben in Abbildung 7.6 öffnet eine textuelle Anleitung mit Hintergrundinformationen zum gezeigten Montagevorgang. Der *Home-Button* links oben, führt den Nutzer zurück ins Hauptmenü. Um beide Hände für die Montage nutzen zu können, muss das Smartphone oder Tablet nach dem Betrachten eines Montagevorgangs jedoch abgelegt werden oder sich in einer Halterung befinden. Alternativ kann das Smartphone in ein HMD eingesetzt

werden. Die Handykamera erfasst die Umgebung und zeigt sie auf dem zweigeteilten Display des Smartphones an. Per Tastendruck auf den Bluetooth-Controller kann der Nutzer nun zum nächsten Montagevorgang wechseln. Der Controller wird dabei in einer Hand gehalten oder in der Nähe der Bauteile fest platziert.

Die CAD-Darstellung der App kann sowohl im AR- als auch im VR-Modus genutzt werden. Im Folgenden wird zunächst der VR-Modus beschrieben, in welchem der Kompressor virtuell dargestellt wird. Der Kompressor kann mit Smartphone-Gesten wie *Wischen* oder *Auseinanderziehen von zwei Fingern* rotiert oder vergrößert werden. Dem Lerner stehen unterschiedliche Interaktionsmöglichkeiten zur Verfügung, um ein Grundverständnis des Kompressors zu erlangen. Sie sind in Tabelle 7.3 dargestellt.

Tabelle 7.3: Manipulationsmöglichkeiten des virtuellen Kompressormodells

	Funktion	Abbildung VR	Abbildung AR
	Animation der Getriebebewegung	Abb. A.1, S. 144	Abb. A.4, S. 145
	Explosionsdarstellung des Kompressors	Abb. A.2, S. 144	Abb. 7.8, S. 85
	Animation des Gasflusses	Abb. 7.7, S. 84	Abb. A.5, S. 146
	Anzeigen von Bauteilinformationen	Abb. A.3, S. 145	Abb. A.6, S. 146

Es können eine Explosionsdarstellung sowie Animationen der Getriebebewegung und des Gasflusses durch den Kompressor angezeigt werden, vgl. Abbildung 7.7. Wird ein Bauteil angeklickt, färbt es sich weiß, und es öffnet sich ein halbtransparentes Informationsfenster mit Bauteilnamen und zusätzlichen Hintergrundinformationen über das Bauteil, vgl. Abbildung A.6, S. 146. Dem Lerner wird somit eine interaktive Möglichkeit gegeben, sich nicht nur mit der Montage, sondern auch mit der Funktionsweise des Kompressors zu befassen.

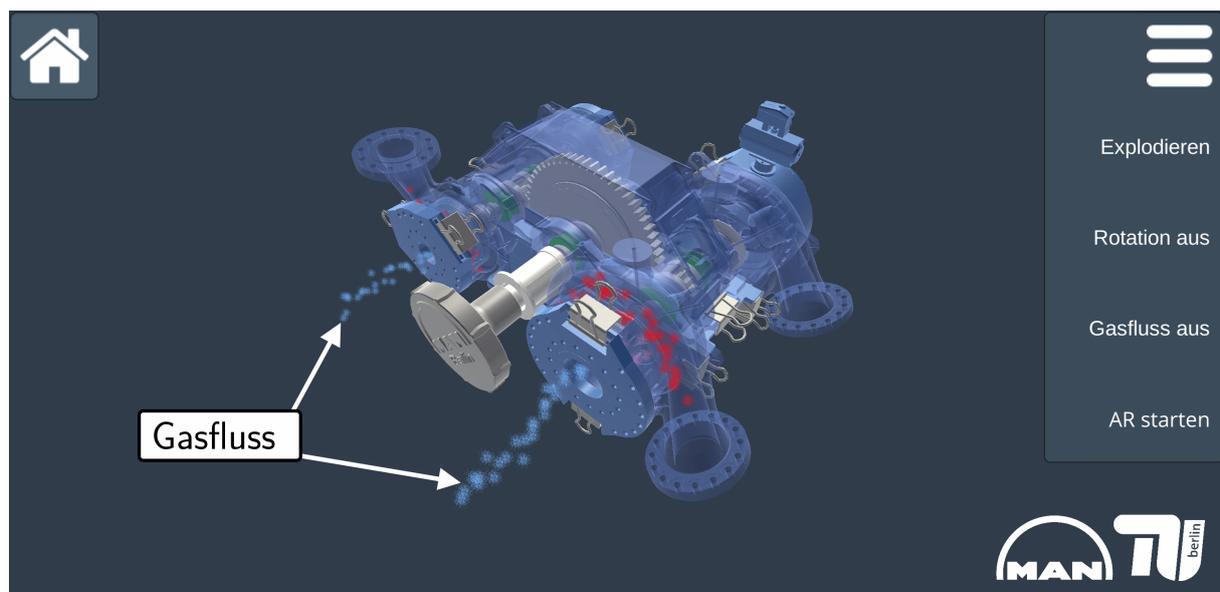


Abbildung 7.7: VR-Darstellung des Gasflusses

Durch die Aktivierung der AR-Ansicht wird die die VR-Darstellung geschlossen und die Kamera aktiviert. Es erscheint die Aufforderung den AR-Marker vor der Kamera zu positionieren. Der Kompressor kann wie zuvor in der VR-Umgebung manipuliert werden wie Abbildung 7.8 verdeutlicht. Zudem können Motor- und Gasbewegung animiert dargestellt werden. Eine sehr intuitive und authentische Art der Betrachtung der einzelnen Komponenten ist somit möglich. Es wirkt so, als stände der Kompressor physisch vor dem Betrachter. Die einzelnen Bauteile können zur Anzeige von Detailinformationen genau wie im VR-Modus auch angeklickt werden.

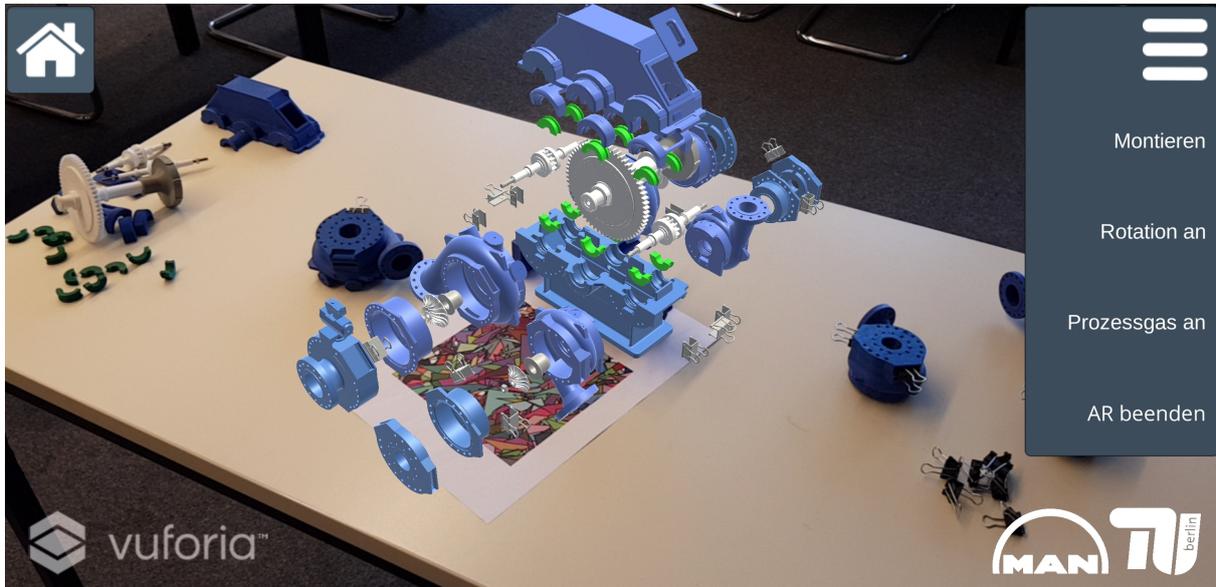


Abbildung 7.8: AR-Explosionsdarstellung

7.2.1.2 Validierung der Eignung zur Vermittlung von Montagetätigkeiten

Im Folgenden wird die AR-Montageanleitung innerhalb der *zweiten Phase der Lernzeugmethode* zur Validierung der Eignung zum Training von Montagetätigkeiten getestet. Die CAD-Darstellung der App wurde von mehreren Anwendern zusätzlich aufgerufen, jedoch nicht validiert. Sie gaben an, die CAD-Darstellung sei eine sinnvolle Ergänzung zur Montageanleitung und ermögliche ein gutes Grundverständnis über Aufbau des Kompressors und Prozessabläufe. Bei den Tests befanden sich die Anwender jeweils alleine mit dem Testleiter, der App und den 3D-gedruckten Bauteilen in einem Raum, um verifizieren zu können, ob die App nicht nur in Gruppen, sondern auch zum Training von Einzelpersonen genutzt werden kann. Zur Vorbereitung des Montagetrainings wurden die 3D-gedruckten Bauteile auf zwei DIN A3-Blättern angeordnet, welche Abbildung A.7 bis A.9 im Anhang entnommen werden können. Auf den Blättern sind Abbildungen aller Bauteile mit Bauteilbezeichnung auf Deutsch und Englisch zur Bauteilidentifikation zu finden. Entsprechend der Lernzeugmethode wurde den Anwendern zunächst das Projekt und die damit verfolgten Lernziele *vorge stellt*. Mithilfe eines Fragebogens wurden sowohl persönliche Daten wie Alter, Geschlecht und Beruf sowie Informationen zu Smartphone- und Tabletnutzung und Vorkenntnisse zur AR und Getriebekompressoren abgefragt. 20 Studierende wurden bereits von [Men-20] getestet. Hiernach wurden elf weitere Studierende getestet, welche den 3D-Druck mithilfe einer im Sondermaschinenbau üblichen Bauteilzeichnung mit kurzen Montagehinweisen montieren sollten. Die Bauteilzeich-

nung ist in Abbildung A.11 im Anhang zu entnehmen. Zudem konnten Tests mit zehn Auszubildenden und zehn FSEs mit derselben App bei MAN ES durchgeführt werden. Es nutzten jeweils fünf Auszubildende und fünf FSEs die App und aus jeder Gruppe jeweils fünf die Bauteilzeichnung. Nach der Lernzeugmethode wurde den Teilnehmern von der App die Montage der Komponenten schrittweise in AR animiert *vorgeführt*. Die Animation konnte beliebig oft aus unterschiedlichen Winkeln und Entfernungen betrachtet werden. Direkt im Anschluss wurde der zuvor gezeigte Montagevorgang durch die Teilnehmer *nachvollzogen* und imitiert. Hiernach sollten die Teilnehmer die Montage des Kompressors ohne AR-Anleitung durchführen. Nach dieser zweiten Durchführung sollten die Teilnehmer die 3D-gedruckten Bauteile dann zu Fotos von Originalbauteilen zuordnen, um die Übertragbarkeit der Trainingserfolge von Montagen von 3D-gedruckten Bauteilen auf Originalbauteile zu prüfen. Eine Montage des originalen Kompressors war für die Studierenden aus Sicherheitsgründen und für die Auszubildenden und FSEs aus Zeitgründen nicht möglich. Die Zuordnung von farblich stark vom Original abweichenden 3D-Drucken zu Fotos konnte von allen Teilnehmern fehlerlos vorgenommen werden. Die Boxplots der Montagezeiten der einzelnen Anwendergruppen sind für die AR-App in Abbildung 7.9 und für die Bauteilzeichnung in Abbildung 7.10 zu erkennen.

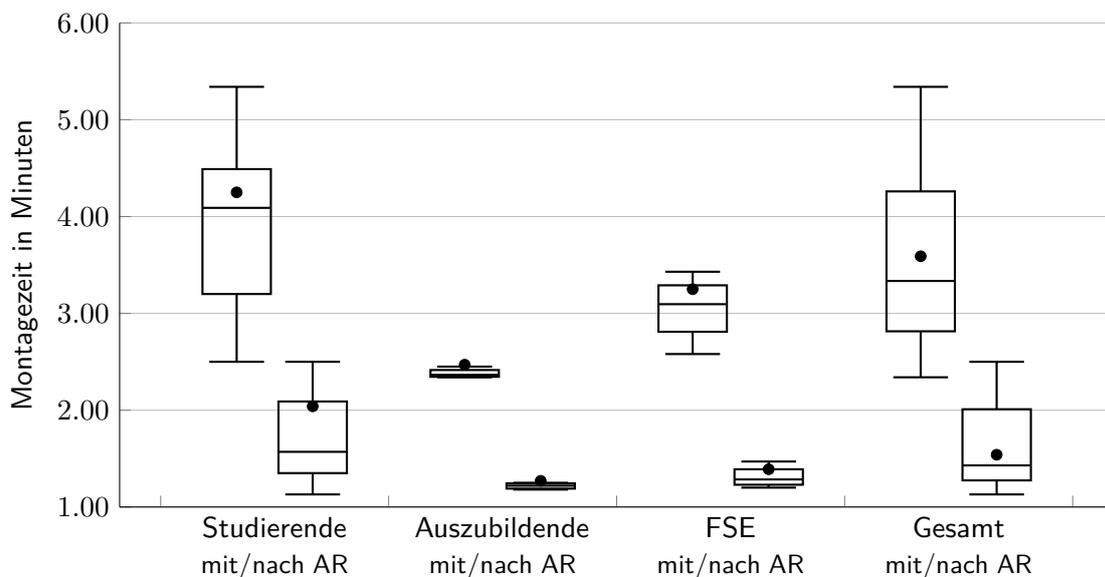


Abbildung 7.9: Montagezeiten mit AR-App und nach der AR-App-Benutzung

Bei der Nutzung der AR-App begingen die Nutzer im Durchschnitt 0,47 Montagefehler, bei der Wiederholung ohne App waren es nur noch 0,13. Wurde die Bauteilzeichnung benutzt, begingen die Nutzer im Durchschnitt 6,67 Fehler, bei der Wiederholung ohne Bauteilzeichnung waren es noch 5,57. Für die App zeigte sich, dass die Montage des Kompressors von allen Teilnehmern bewältigt werden konnte. Beim anschließenden Üben der Montage ohne AR-App traten zuvor begangene Fehler nun nicht mehr auf oder wurden schneller korrigiert. Die Montagefehler entstanden alle bei der Identifizierung der Bauteile. Der rein visuelle Abgleich des gezeigten zum physischen Bauteil war nicht ausreichend, da sich einige Bauteile stark ähnelten. Da die Bauteile anschließend nicht im Modell passten, wurden Fehler jedoch immer bemerkt und konnten leicht korrigiert werden. Bei der Nutzung der Bauteilzeichnung wurde meist stark intuitiv montiert und die Beschreibung der Montage kaum beachtet oder nur überflogen. Hierdurch wurden andere als die vorgegebenen Montagepfade gewählt

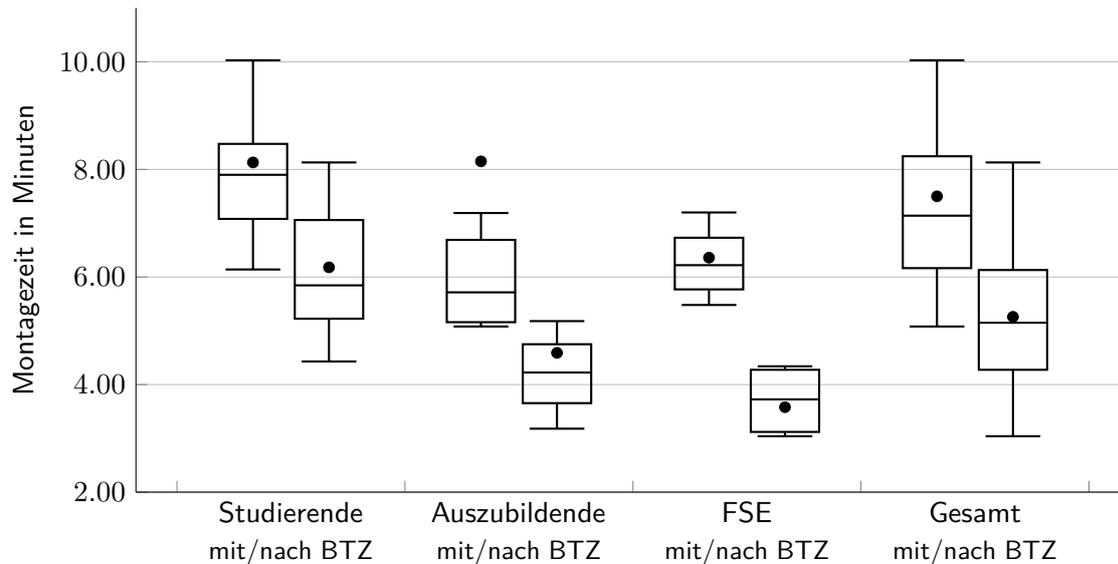


Abbildung 7.10: Montagezeiten mit Bauteilzeichnung (BTZ) und nach der BTZ-Nutzung

und es kam zu Abweichungen zur Montagebeschreibung. Zudem wurden häufiger als bei der AR-App die falschen Bauteile ausgewählt. Beim Vergleich der Montagezeiten wird deutlich, dass die Nutzer der App deutlich schneller waren als die der Bauteilzeichnung. Im Vergleich mit der Bauteilzeichnung benötigten die App-Nutzer lediglich 48 % der Montagezeit im ersten Montagedurchlauf und sogar nur 29 % im zweiten Durchlauf ohne Anleitung. Die Studierenden benötigten insgesamt am längsten für die Montage. Die FSEs waren deutlich schneller und die jungen Auszubildenden bewältigten die Aufgabe am schnellsten. Eine Begründung hierfür könnte sein, dass die Studierenden weniger Montageerfahrung haben und daher psychomotorische Vorgänge langsamer erlernen. Des Weiteren könnte ein Vorteil der Auszubildenden darin gelegen haben, dass sie gegenüber den FSEs das Erlernen neuer Inhalte stärker gewohnt sind und gegenüber den FSEs im Umgang mit einem Smartphone besser geübt sind.

Bei den Nutzertests wurde deutlich, dass mithilfe der AR-App eine Vermittlung von Montagevorgängen schneller und mit einem qualitativ besseren Ergebnis als mit konventionellen Bauteilzeichnungen möglich ist. Die Identifikation von in Form und Farbe ähnlichen Bauteilen bereitete einigen Versuchsteilnehmern jedoch Schwierigkeiten. Daher wurden die im folgenden Abschnitt beschriebenen Lernzeuganpassungen vorgenommen.

7.2.1.3 Lernzeuganpassungen

Die Auswahl des zu montierenden Bauteils erforderte in der ersten App-Version einen Abgleich zwischen virtuellem und physischem Bauteil. Dies konnte optisch oder durch eine Überprüfung des Bauteilnamens erfolgen. Um das zu montierende Bauteil eindeutig identifizieren zu können, wurde eine durch eine *Verbesserung des Lernzeugs* vorgenommen. Dazu wurden alle Bauteile in ein Shadowboard integriert, vgl. Abbildung 7.11. Wird die Kamera des Smartphones oder Tablets nun auf den oben mittig in Abbildung 7.11 erkennbaren Marker gerichtet, zeigt das Display des Smartphones per AR-Einblendung, wo sich das nächste zu montierende Bauteil befindet. Handhaben, Ausrichten, Fügen

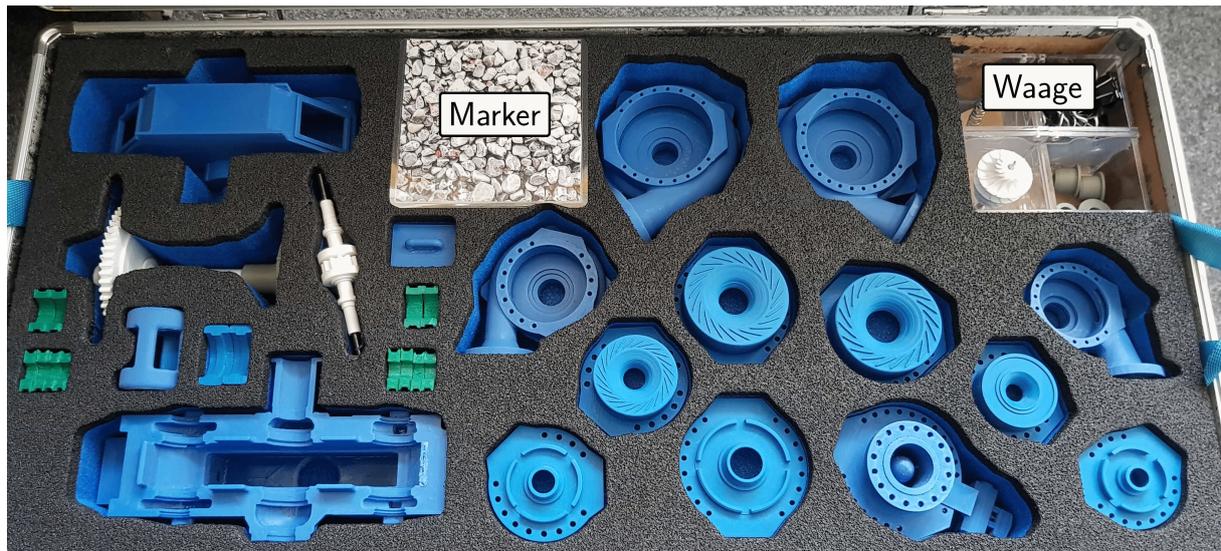


Abbildung 7.11: Bauteilanordnung in einem Shadowboard im Koffer

und Justieren werden wie zuvor mithilfe von AR-Animationen vermittelt. Um dem Nutzer eine Rückmeldung über die korrekte Bauteilwahl zu geben und diese somit prüfen zu können, wurde unter jedem Bauteil ein Photosensor in das Shadowboard integriert. Innerhalb der *ersten Phase der Lernzeugmethode* wird somit die Sensorik angepasst. Die prinzipielle Funktionsweise ist in Abbildung 7.12 dargestellt. Ändert sich der Lichteinfall auf den Photosensor durch die Entnahme

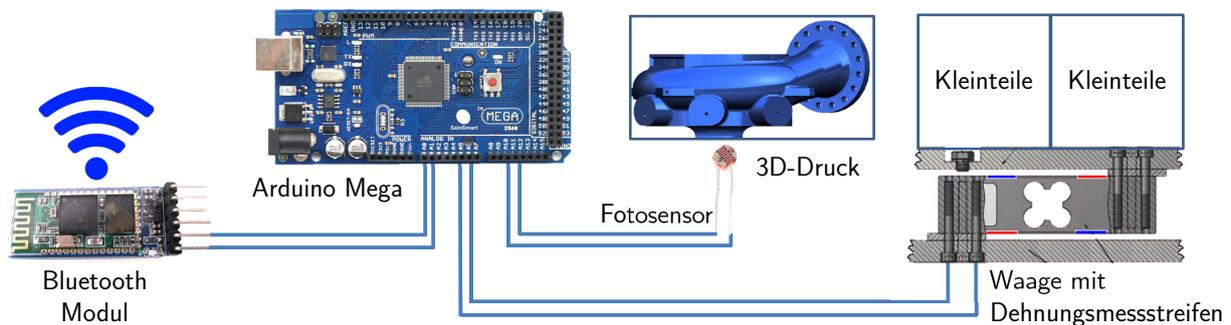


Abbildung 7.12: Prinzipielle Funktionsweise der Bauteilüberwachung

die Bilder wurden den Webseiten eckstein-shop.de, kitskart.com und ebay.de entnommen

befindlichen Bauteils, wird dies vom verbundenen Arduino Mega Kleincomputer registriert und über ein Bluetooth Modul an die AR-App übermittelt. Da einige Bauteile aufgrund ihrer Form oder Größe nicht für die Detektion mit Photosensoren geeignet sind, wurden sie auf einer in Abbildung 7.11 oben rechts zu erkennenden Waage platziert. Diese übermittelt Gewichtsänderungen an den Arduino, welcher aufgrund der Gewichtsdivergenz das entnommene Bauteil identifizieren kann. Wurde vom Nutzer das falsche Bauteil ausgewählt, färbt sich seine AR-Visualisierung rot. Der Nutzer kann nicht zur nächsten Montagesequenz wechseln und im Display erscheint ein Hinweis, das richtige Bauteil zu montieren. In Abbildung 7.13 ist zu erkennen, dass das falsche Bauteil aus dem Koffer entnommen wurde, daher ist es im Modell rot gefärbt. Das auszuwählende Bauteil wird im Koffer hingegen grün markiert. Abbildung 7.13 verdeutlicht zudem, dass in der neuen App-Version für jeden Montagevorgang Bauteilname und -anzahl rechts unten eingeblendet werden. Tabelle 7.4 zeigt die Einordnung des Lernzeugs in die Lernzeugmorphologie.



Abbildung 7.13: AR-Lokalisierung der 3D-gedruckten Bauteile.

Tabelle 7.4: Lernzeugmorphologie AR-App *MAN ES*

Entwicklung und Betrieb	
Zielgruppe	Weiterbildung
Anbieter	Industrieunternehmen
Entwicklungsprojekt	extern unterstützt
Finanzierung der Entwicklung	intern
Finanzierung des Betriebs	nutzungsorientiert
Zugänglichkeit	eingeschränkt
didaktisches Design	
kognitive Lernziele	Erinnern, Verstehen, Anwenden, Analysieren
affektive Lernziele	Aufnehmen, Reagieren
psychomotorische Lernziele	Imitation, Manipulation
Kompetenzen	sozio-kommunikativ, technisch und methodisch, aktivitäts- und handlungsorientiert
individuelle Lerneradaption	Bildungslevel, Kultur, Vorwissen, Lernstil
parallele Lerner	limitiert <i>3D-Druck</i> , unlimitiert <i>App</i>
Autonomie des Lernenden	selbstreguliert, selbstorganisiert
Immersion	hoch
Lerndauer	einige Minuten
Rückmeldung an den Lerner	richtig/falsch, berichtigend, assistierend
Verbindung zum Arbeitsplatz	arbeitsverbunden
didaktische Einbindung	integriert in neues Konzept

technisches Design

Tangibilität	digitales Lernzeug mit physischem Modell
Komplexität	einfach
Mobilität	mobil
Abstraktionsgrad	mittel
Komponenten	angepasst
Sprachabhängigkeit	reduziert und teilweise unabhängig

Umgebung

Phase des Produktlebenszyklus	Produktion
Prozesstyp	Unikatfertigung
Fabrikebene	Station

7.2.1.4 Validierung der Eignung zur Vermittlung der Montage eines Getriebekompressormodells

Um die Auswirkungen der verbesserten Bauteilidentifikation zu untersuchen, wurden Montagetests mit fünf Studierenden an der Universität und acht FSEs während eines Trainings bei MAN ES nach dem Ablauf der *zweiten Phase der Lernzeugmethode* durchgeführt. Da alle Auszubildenden bereits mithilfe der ersten App den 3D-gedruckten Kompressor montiert hatten und somit bereits den Montagevorgang kannten, wurden sie nicht erneut getestet. Die Ergebnisse der Tests mit AR-App und Koffer sind in den Boxplots in Abbildung 7.14 zu erkennen.

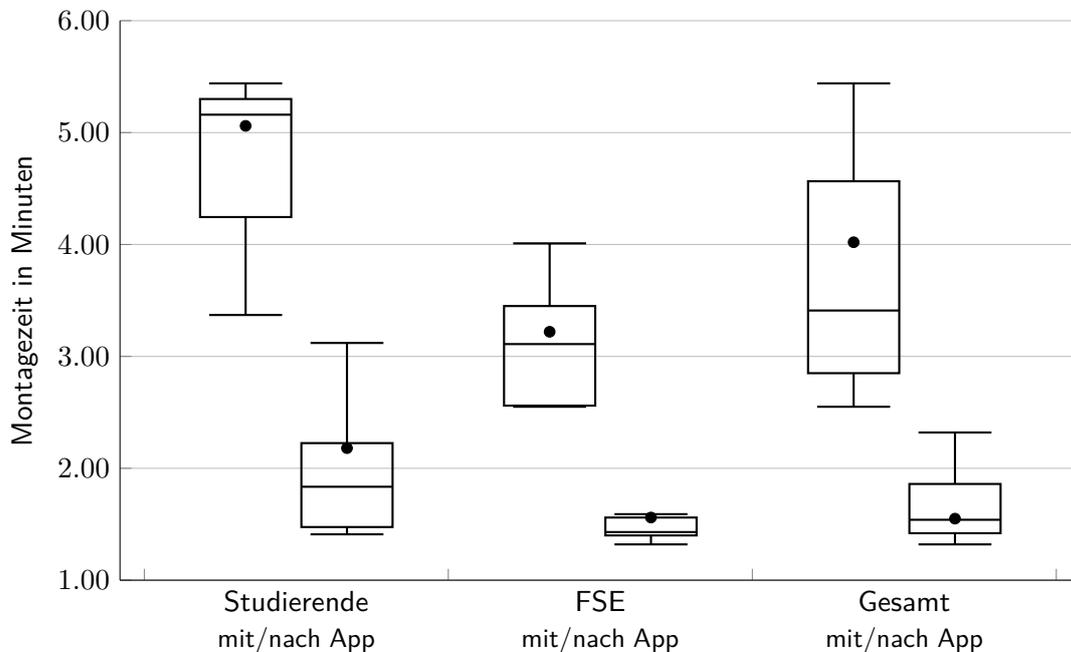


Abbildung 7.14: Montagezeiten mit AR-App und Koffer und nach der Nutzung von AR-App und Koffer

Bei den Tests mit der AR-App zeigt sich, dass die Montage von allen Probanden fehlerfrei durchgeführt wurde, eine fehlerhafte Bauteilidentifikation tritt nicht mehr auf. Die Überprüfung der korrekten Bauteilauswahl wird somit obsolet. Es werden zudem ähnliche Montagezeiten wie bei der Montage ohne AR-Bauteilidentifikation erreicht. Dies liegt vermutlich darin begründet, dass zum einen keine zeitaufwendigen Korrekturbewegungen aufgrund einer fehlerhaften Bauteilauswahl mehr nötig sind. Zum anderen jedoch die Handhabungszeit des Tablets ansteigt, da dieses für die Bauteilidentifikation über einen weiteren Marker gehalten werden muss. Sowohl bei der Montage mit als auch ohne Koffer entstanden vor und nach der Montagedurchführung interessante Gespräche zwischen den Teilnehmern über den Aufbau von Getriebekompressoren. Der Trainer fragte gezielt nach den Unterschieden zwischen 3D-Druck und Trainingskompressor. So wurde speziell auf die Art der Bauteilverbinding und deren Sicherung eingegangen. Während der gesamten Trainingswoche konnte der Aufbau und die Montage des originalen Kompressors mit dem 3D-Modell verglichen werden, was alle Trainingsteilnehmer als sehr positiv bewerteten.

7.2.2 AR-HoloLens zum Montagetraining physischer Originale

Da die Montage eines originalen Getriebekompressors u. a. aus Sicherheits-, Termin- und Geheimhaltungsgründen nicht mit einer großen Anzahl an Testteilnehmern durchgeführt werden konnte, wurde zunächst eine Steckdose als Montageobjekt gewählt, um in einem ersten Schritt die prinzipielle Eignung der Visualisierungstechnologie AR für das Training von Montageabläufen physischer Originale mit mehreren Testteilnehmern zu validieren.

Im Zusammenhang mit dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt *Digihand – Digitalisierung im Handwerk* wurde eine Lernstation zum Training der Montage von Steckdosen und Lichtschaltern für die *Zielgruppe* der Auszubildenden Elektrotechniker entwickelt. Mithilfe der AR-Brille Microsoft® HoloLens werden dem Nutzer alle zur Montage nötigen Informationen direkt in sein Sichtfeld eingeblendet oder über Lautsprecher abgespielt, vgl. Abbildung 7.15. Er kann seine Umgebung jedoch weiterhin durch ein durchsichtiges Display wahrnehmen. Zur Interaktion mit der Brille stehen dem Nutzer unterschiedliche Eingabemöglichkeiten zur Verfügung. Durch Kopfbewegungen kann bspw. ein Button anvisiert werden, anschließend wird er durch das Schließen von Zeigefinger und Daumen ausgewählt. Diese *Tap-Geste* ist in Abbildung 7.16 dargestellt. Des Weiteren kön-



Abbildung 7.15: Microsoft HoloLens [Mic-18]



Abbildung 7.16: *Tap-Geste* [Mic-18]

nen Sprachbefehle genutzt werden, um Buttons auszuwählen oder Funktionen aufzurufen. Mithilfe von Infrarotsensoren und Kameras werden von der Brille Entfernungen zu Objekten in der Umgebung ermittelt. Virtuelle Inhalt können anschließend auf die Oberflächen dieser Objekte projiziert werden. Hierbei funktioniert die Brille autark ohne Computer oder Smartphone [Mic-18]. Die HoloLens ist unter den in Tabelle E.1 auf Seite 168 aufgeführten AR-Brillen die leistungsstärkste mit der am weitesten entwickelten Technologie und dem größten Funktionsumfang.

7.2.2.1 Lernzeugentwicklung und -beschreibung

Der *ersten Phase der Lernzeugmethode* entsprechend, werden im Folgenden Lerninhalte und Morphologie sowie die Mensch-Maschine-Interaktion durch Visualisierungstechnologie und Sensorik adressiert. Für das Montagetraining einer Steckdose und eines Lichtschalters wurde ein Montagetisch präpariert. In einem auf dem Tisch fixierten Koffer, welcher in Abbildung 7.17 links erkennbar ist, befinden sich alle für die Montage benötigten Bauteile und Werkzeuge. In den Tisch eingelassen sind Unterputzdosen, in welche Steckdose und Lichtschalter eingesetzt werden. Die benötigten Kabel wurden unter dem Tisch verlegt und mit einem Arduino-Computer verbunden. Dieser überwacht, ob die Kabel korrekt vom Anwender verbunden werden und sendet diese Information anschließend per W-LAN zur HoloLens. Zudem überwacht er, ob der Anwender wie von der Anleitung gefordert zu Beginn der Montage mit einem Sicherungsschalter den Strom abschaltet. Ein auf dem Montagetisch befindli-

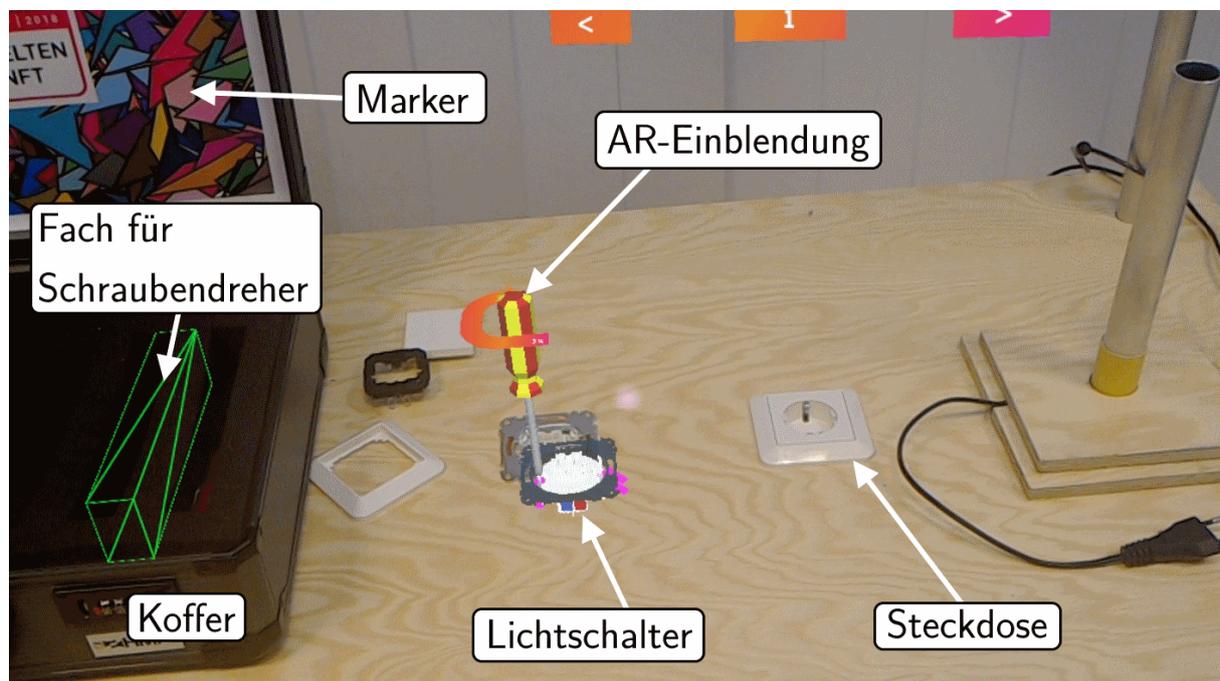


Abbildung 7.17: Montage einer Steckdose mithilfe der HoloLens

ches Tablet vermittelt dem Nutzer anhand von Videos wie die HoloLens aufzusetzen und zu justieren ist. Mit weiteren Videos werden die Interaktionsmöglichkeiten mit der Brille erklärt. Sie ist jedoch auch ohne Tablet nutzbar. Beim Aufsetzen der HoloLens wird der Nutzer durch einen einblendeten Text sowie eine Audionachricht begrüßt. Er wird schrittweise anhand von Animationen und Audionachrichten in die Bedienung der Brille eingewiesen und erlernt diese durch Vormachen und Nachahmen. Hiernach wird dem Nutzer die Lernaufgabe präsentiert und er kann auswählen, ob er die Steckdose oder den Lichtschalter montieren oder die durchgeführte Montage überprüfen möchte. Bei der Montagedurchführung wird der Nutzer zunächst aufgefordert eine Sicherung auszuschalten, um sicher montieren zu können. Ihm wird per Text und Animation verdeutlicht, welche Konsequenzen eine Missachtung haben könnte. Erst wenn die Sicherung ausgeschaltet ist, wird der nächste Montagevorgang einblendet. Hierdurch erhält der Nutzer die u. a. von [Shn-17] geforderte Rückmeldung über die Konsequenz seiner Handlung. Mithilfe von AR-Markierungen der Fächer im Bau-teilkoffer wird gezeigt, wo sich ein Bauteil oder ein Werkzeug befindet. Diese Identifizierung ist in Ab-

bildung 7.17 links visualisiert. Dem Nutzer wird anschließend per AR-Animation an der Montageposition aufgezeigt, wie die Bauteile zu handhaben, auszurichten, zu fügen und eventuell zu justieren sind. Diese Animation wiederholt sich solange, bis der Anwender sich der Montageposition nähert. Damit ihn die Animationen bei der Montage nicht stören, werden sie bei seiner Annäherung ausgeblendet. Über der Animation schwebt eine textuelle AR-Einblendung, in welcher die Arbeitsaufgabe und erforderliche Anpassarbeiten detaillierter beschrieben werden und welche zusätzlich vorgelesen werden kann. Des Weiteren können Animationen und zusätzliche Informationen über Bauteile und Montageinhalte über einen Infobutton aufgerufen werden, wie Abbildung 7.18 verdeutlicht. Nach Abschluss der Montage wird der Anwender zu einer Überprüfung seiner Montagetätig-



Abbildung 7.18: Einblendung von Animationen und Zusatzinformationen mithilfe der HoloLens

keit weitergeleitet. Eine virtuelle, noch ausgeschaltete Lampe wird eingeblendet. Der Nutzer wird aufgefordert die Sicherung wieder einzuschalten. Durch Betätigen des Lichtschalters leuchtet die Lampe. Dies funktioniert jedoch nur, wenn der Arduino die korrekte Verkabelung durch den Nutzer verifizieren und die Information darüber an die HoloLens übermitteln konnte. Bei fehlerhafter Montage leuchtet die virtuelle Lampe nicht auf und der Nutzer muss die Verkabelung überprüfen wie Abbildung 7.19 darstellt. Tabelle 7.5 zeigt die Einordnung des Lernzeugs in die Morphologie.

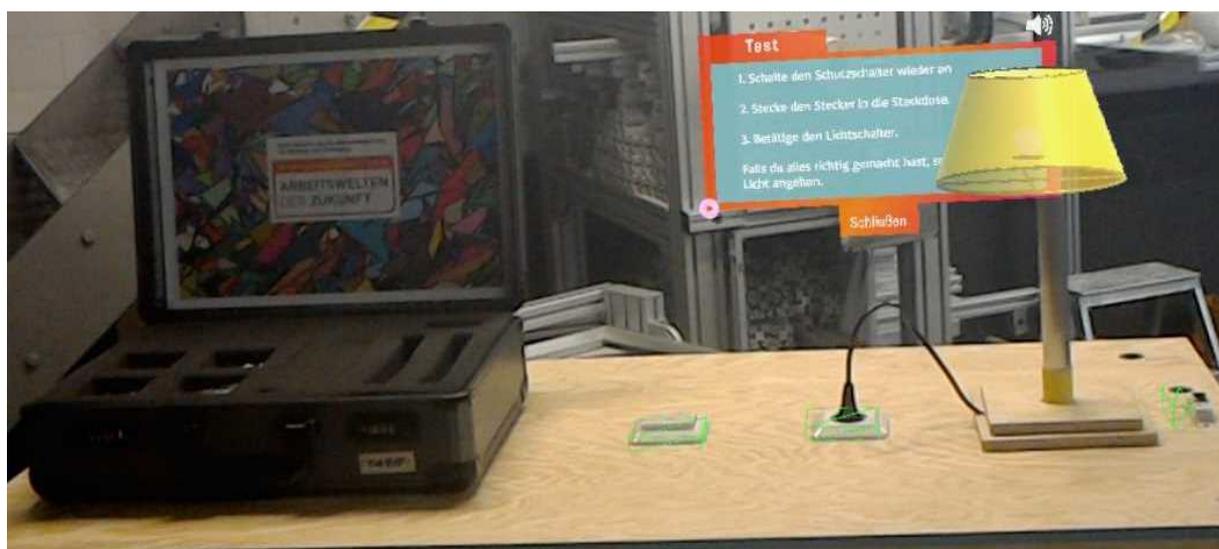


Abbildung 7.19: Überprüfung der Steckdosenmontage mithilfe einer virtuellen Lampe

Tabelle 7.5: Lernzeugmorphologie HoloLens *Studierendenversion*

Entwicklung und Betrieb	
Zielgruppe	Sekundarstufe, Hochschulbildung
Anbieter	akademische Institution
Entwicklungsprojekt	intern
Finanzierung der Entwicklung	öffentlich
Finanzierung des Betriebs	nutzenorientiert
Zugänglichkeit	eingeschränkt
didaktisches Design	
kognitive Lernziele	Erinnern, Verstehen, Anwenden, Analysieren
affektive Lernziele	Aufnehmen, Reagieren
psychomotorische Lernziele	Imitation, Manipulation
Kompetenzen	technisch und methodisch, aktivitäts- und handlungsorientiert
individuelle Lerneradaptation	Lernstil, Vorwissen, Bildungslevel
parallele Lerner	limitiert
Autonomie des Lernenden	selbstorganisiert
Immersion	hoch
Lerndauer	einige Minuten
Rückmeldung an den Lerner	permanente Unterstützung
Verbindung zum Arbeitsplatz	arbeitsverbunden
didaktische Einbindung	eigenständiges Konzept
technisches Design	
Tangibilität	digitales Lernzeug mit physischem Original
Komplexität	einfach
Mobilität	mobil
Abstraktionsgrad	gering
Komponenten	angepasst
Sprachabhängigkeit	reduziert
Umgebung	
Phase des Produktlebenszyklus	Produktion
Prozesstyp	Serienproduktion
Fabrikebene	Station

7.2.2.2 Validierung der Eignung zur Vermittlung von Montagetätigkeiten

Die Lernzeugvalidierung der Montagetrainingsstation innerhalb *der zweiten Phase der Lernzeugmethode* fand an mehreren Oberstufenzentren und Berufsausbildungsmessen in Deutschland sowie auf der langen Nacht der Wissenschaft 2018 statt. Eine vereinfachte Version, in welcher nur die Steckdosenmontage vermittelt wird, konnte im Rahmen einer Sonderausstellung zum Wissenschaftsjahr 2018 beim BMBF präsentiert werden. Die Nutzer werden vollständig von dem auf der HoloLens be-

findlichen Trainingsprogramm durch die Steckdosenmontage geführt. Es wurde zunächst der Montagevorgang durch das Lernzeug *vorge stellt* und die Benutzung der HoloLens erlernt. Anschließend erfolgte in einem *Vormachen-Nachahmen-Zyklus* die Montage. Ziel der Nutzertests war die Überprüfung, ob das entwickelte Lernzeug die erforderlichen psychomotorischen Inhalte vermitteln kann und ob die Nutzer den Umgang mit der HoloLens als lernförderlich empfinden. Mithilfe eines Fragebogens wurde dies bei 25 Anwendern getestet und besprochen. Sie sollten angeben inwieweit sie den gegebenen Aussagen zustimmen. Abbildung B.1 fasst die Ergebnisse der Umfrage zusammen. 96 % der Umfrageteilnehmer fühlten sich durch die Unterstützung der HoloLens eher sicher oder vollständig sicher und fanden es einfach, mithilfe der Anweisung keine Fehler zu begehen oder Arbeitsschritte zu verinnerlichen. Zudem gaben sie an, zu jedem Zeitpunkt zu wissen, was zu tun sei. 92 % gaben an, dass die HoloLens ihnen bei der Lokalisierung von Bauteilen und Werkzeugen geholfen habe. Die Interaktion mit der HoloLens empfanden 76 % der Befragten als natürlich. Lediglich 17 % empfanden das Tragen der HoloLens als unangenehm. Die HoloLens bietet deutliches Potenzial für den Einsatz bei Montagetrainings. Vor allem, da aufgrund der Sprachsteuerung die Hände vollständig für Montagetätigkeiten genutzt werden können.

7.2.2.3 Lernzeuganpassungen für die Montage eines Getriebekompressors

Nachdem für das HoloLens-Lernzeug anhand von Nutzertests mit Messebesuchern die prinzipielle Eignung zur Vermittlung von Montageinhalten verifiziert werden konnte, wird das Lernzeug im Folgenden für das Montagetraining einer Getriebekompressorstufe innerhalb *der ersten Phase der Lernzeugmethode* erweitert. Hiernach werden Nutzertests mit weiteren Messebesuchern und FSEs bei MAN ES nach Ablauf *der zweiten Phase der Lernzeugmethode* durchgeführt. Mithilfe des Lernzeugs kann bei MAN ES die Montage hydrodynamischer Gleitlager trainiert werden. In einer zweiten Anwendung kann mithilfe der HoloLens ein Vergleich zwischen Komponenten des 1994 gebauten Trainingskompressors und virtuellen Repräsentationen aktueller Kompressorvarianten visualisiert werden. Somit können Unterschiede einzelner Varianten simuliert werden, ohne weitere teure physische Bauteile der Varianten zu benötigen. Beide Anwendungen werden im Folgenden beschrieben. Nach dem Aufsetzen der AR-Brille wird ihre Nutzung *der zweiten Phase der Lernzeugmethode* entsprechend schrittweise durch Audioinhalte, Animationen und Videos *vorge stellt* und erlernt und kann durch Anklicken von Schaltflächen und Anwenden von Sprachbefehlen geübt werden. Abbildung 7.20 zeigt einen Lagermontagetrainingsstand sowie die in der HoloLens visualisierte Animation des Lagereinbaus. Der Nutzer wird schrittweise durch *Vormachen und Nachahmen* durch die einzelnen Montageabschnitte geführt. Identifizieren, Handhaben, Ausrichten, Fügen und Justieren von Komponenten und Werkzeugen werden direkt am Bauteil oder Werkzeug mithilfe von AR-Animationen visualisiert. Eine Einblendung weiterführender Informationen oder einer Montagevorgangsbeschreibung sowie das Abspielen auditiver Montageanweisungen ist individuell für jeden Nutzer möglich. Da weder bei der AR geführten Montage von 3D-gedruckten Kompressoren noch bei der AR geführten Steckdosenmontage mithilfe der HoloLens Identifikations- oder Montagefehler auftraten, wurde für die HoloLens-MAN-Anwendung von der IKT gesteuerten Überprüfung der Montagequalität abgesehen. Neben dem Erlernen von Montagevorgängen können mithilfe der HoloLens auch unterschiedliche Kompressor-Designs und -bauformen miteinander verglichen werden, vgl. Abbildung 7.21.

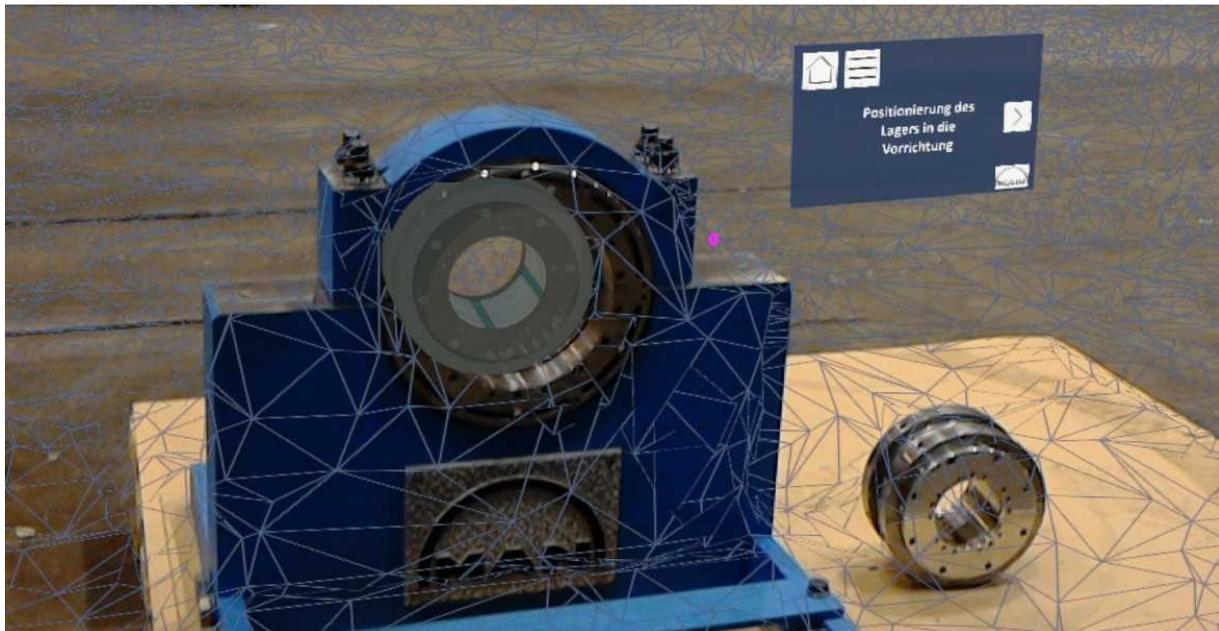


Abbildung 7.20: Lagermontageanimation auf der HoloLens

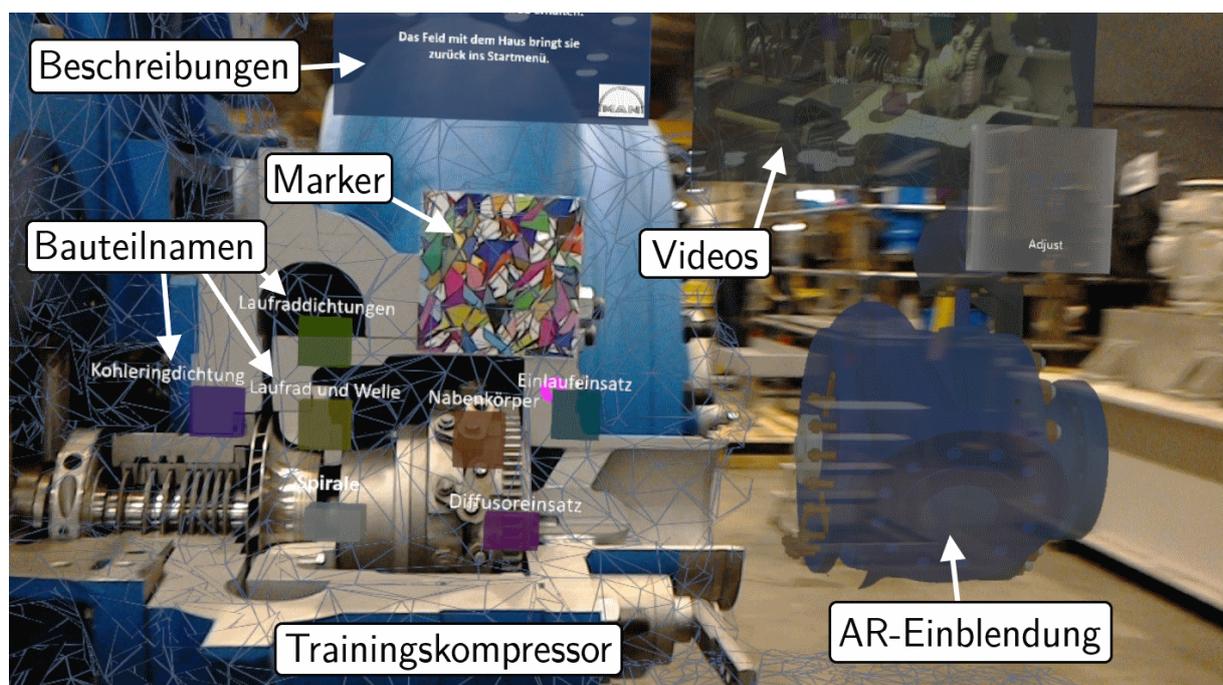


Abbildung 7.21: Visualisierung von Kompressorkomponenten mithilfe der HoloLens

Hierzu werden an den physischen Bauteilen am Trainingskompressor zunächst virtuell Namen der zugehörigen Baugruppen eingeblendet. Ein *Tap* auf eine Baugruppe öffnet ein CAD-Modell einer Kompressorvariante neben dem originalen Kompressor. Dieses virtuelle Bauteil kann vom Anwender in Größe, Orientierung und Lage mithilfe der *Tap*-Geste manipuliert werden. Wenn der Anwender mit der Brille auf das virtuelle Bauteil zuläuft, wird dieses ab einem Abstand von ca. 70 cm zwischen Anwender und Bauteil in einer Ebene orthogonal zur Sichtachse geschnitten. Der Anwender kann somit innenliegende Bauteilkomponenten betrachten und manipulieren. Dies ist auch bei der Nutzung mehrerer AR-Brillen möglich. Tabelle 7.6 zeigt die Einordnung des Lernzeugs in die Morphologie.

Tabelle 7.6: Lernzeugmorphologie HoloLens MAN ES

Entwicklung und Betrieb	
Zielgruppe	Weiterbildung
Anbieter	Industrieunternehmen
Entwicklungsprojekt	extern unterstützt
Finanzierung der Entwicklung	intern
Finanzierung des Betriebs	nutzenorientiert
Zugänglichkeit	eingeschränkt
didaktisches Design	
kognitive Lernziele	Erinnern, Verstehen, Anwenden, Analysieren
affektive Lernziele	Aufnehmen, Reagieren
psychomotorische Lernziele	Imitation, Manipulation, Präzision
Kompetenzen	sozio-kommunikativ, technisch und methodisch, aktivitäts- und handlungsreguliert
individuelle Lerneradaption	Bildungslevel, Kultur, Vorwissen, Lernstil
parallele Lerner	limitiert
Autonomie des Lernenden	selbstreguliert, selbstorganisiert
Immersion	hoch
Lerndauer	einige Minuten
Rückmeldung an den Lerner	indirekt
Verbindung zum Arbeitsplatz	arbeitsgebunden und -verbunden
didaktische Einbindung	integriert in neues Konzept
technisches Design	
Tangibilität	digitales Lernzeug mit physischem Original
Komplexität	kompliziert
Mobilität	teilweise mobil
Abstraktionsgrad	mittel
Komponenten	standard
Sprachabhängigkeit	reduziert und teilweise unabhängig
Umgebung	
Phase des Produktlebenszyklus	Produktion
Prozesstyp	Unikatfertigung
Fabrikebene	Station

7.2.2.4 Validierung der Eignung zur Vermittlung der Montage eines originalen Getriebekompressor

Die Lagermontage umfasst das mehrmalige Anziehen von Schrauben nach Drehmoment, das Einhalten einer 30-minütigen Setzzeit der Schrauben sowie die Überprüfung mehrerer Messwerte. Bei der Bewertung der HoloLens-Anwendung wurde daher lediglich eine qualitative Auswertung auf Basis

von Interviews mit Trainingsteilnehmern durchgeführt. Eine quantitative Bewertung der Montagezeit war aufgrund des hohen Montageumfangs der Lagermontage nicht zeitlich sinnvoll möglich. Das Lernzeug konnte bei zwei Trainings mit 23 FSEs sowie auf der Hannover Messe Industrie 2019 mit über 200 internationalen Teilnehmern getestet werden. Hierbei konnten die beiden zur Verfügung stehenden HoloLens zeitgleich benutzt werden. Eine Einbindung weiterer Brillen ist technisch möglich. Um Teilnehmer ohne Brille in den Prozess mit einzubeziehen, wurde das Bild einer HoloLens auf einen Monitor gespiegelt, was in Abbildung 7.22 zu erkennen ist.



Abbildung 7.22: Durchführung eines Trainings mit mehreren HoloLens bei MAN ES

So war es für den Trainer möglich, weitere Informationen zu geben. Durch die zeitgleiche Nutzung mehrere HoloLens und die Spiegelung ihres Sichtfelds auf den Monitor, war es möglich, eine implizite Wissensweitergabe in Form von Sozialisation zu realisieren. Nach einer kurzen Eingewöhnungszeit konnten alle Benutzern mithilfe der HoloLens innerhalb des Lernzeugs navigieren. Wie auch bei der Steckdosenmontage empfanden einige Nutzer das Tragen der Brille zunächst als unangenehm. Nachdem die Brille neu ausgerichtet wurde, verbesserte sich der Tragekomfort jedoch deutlich. Die FSEs konnten die gezeigten Montagevorgänge gut nachvollziehen und empfanden auch die Bedienung nach kurzer Eingewöhnung als intuitiv.

7.2.3 Animiertes 3D-PDF zum virtuellen Montagetraining

Im Folgenden wird die Entwicklung eines Lernzeugs für die primäre Nutzung in *der dritten Phase der Lernzeugmethode* beschrieben. Die beiden zuvor vorgestellten Lernzeuge eignen sich nur bedingt zum Üben der erlernten Inhalte nach dem Training, da die AR-Darstellungen nur zusammen mit einem physischen Montageobjekt sinnvoll angewendet werden können. Besser eignen sich die Visualisierungstechnologien Print, Video, Animation und VR für das Wiederholen und Üben von Montageinhalten ohne physische Montageobjekte. Um VR-Anwendung für Übungen nach Trainings zu nutzen, müsste jeder Trainingsteilnehmer eine VR-Brille und Controller mitführen. Für die anderen Visualisierungstechnologien reicht der bereits vorhandene PC aus. Daher wurden Print- und Videoanleitung sowie Computeranimation näher betrachtet. Um diese miteinander vergleichen zu können, wurde für jede Technologie eine Trainingsunterlage für die Montage eines Radnabenmotors erstellt und mit Studierenden getestet. Für die Videoanleitung wurde ein Utility-Film und für die Computeranimation ein 3D-PDF erstellt. Der Radnabenmotor wurde als Montageobjekt gewählt, da wie bereits beim HoloLens-Lernzeug erläutert der Test am Getriebekompressor aus Sicherheits-, Zeit- und Geheimhaltungsgründen nicht mit einer großen Anzahl an Testteilnehmern durchgeführt werden konnte. Die Nutzbarkeit des 3D-PDF-Lernzeugs wird anschließend nur mit einer kleineren Testgruppe in einem Montagetraining für den Getriebekompressor validiert.

7.2.3.1 Lernzeugentwicklung und -beschreibung

Im Folgenden wird entsprechend *der ersten Phase der Lernzeugmethode* der Lerninhalt, die Morphologie sowie die Mensch-Maschine-Schnittstelle adressiert. Bei allen Trainingsunterlagen wurden zunächst die verwendeten Bauteile und Werkzeuge in gleicher Form visualisiert, vgl. Abbildung 7.23.

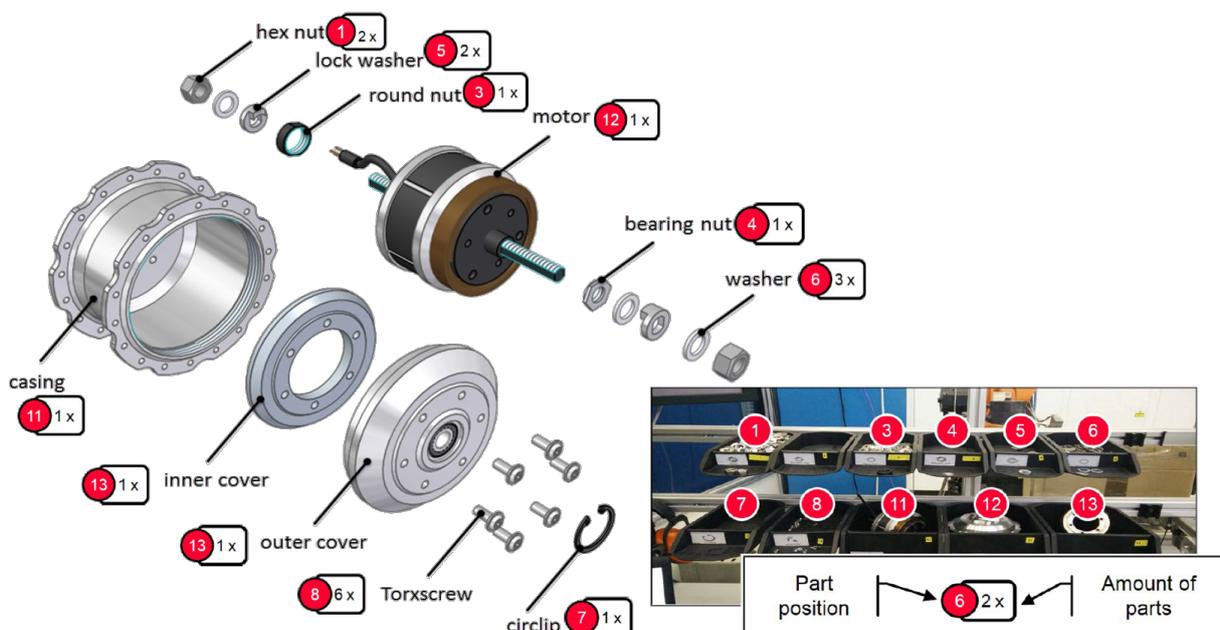


Abbildung 7.23: Bauteilübersicht eines Radnabenmotors [Men-17]

Alle zu montierenden Bauteile werden in einer Explosionsdarstellung gezeigt und benannt. Zusätzlich wird jedes Bauteil eindeutig durch eine Nummer identifiziert und die Anzahl der zu verbauenden Elemente angegeben. Im rechten unteren Teil von Abbildung 7.23 ist zu erkennen, in welcher der Aufbewahrungsboxen am Arbeitsplatz sich die Bauteile befinden. Die Werkzeuge werden in der gleichen Art visualisiert. Zusätzlich wird jedes Werkzeug symbolisch dargestellt, bspw. durch die sternförmige Funktionsfläche eines Torx-Schraubendrehers, vgl. Abbildung 7.24 bis 7.26. Im Folgenden wird der weitere Aufbau der drei Unterlagen Bildanleitung, Utility-Film und 3D-PDF kurz vorgestellt. Abbildung 7.24 zeigt die bildliche Montageanleitung von sechs Schrauben in der äußeren Abdeckung des Nabenmotors. Die Drehrichtung von Bauteilen sowie ihr Montagepfad werden durch Pfeile gekennzeichnet. Nummer und Anzahl der zu montierenden Bauteile und Werkzeuge werden direkt neben ihrer Abbildung aufgeführt. Für jeden Montagevorgang wurde ein Bild vor und nach der Montage gezeigt, um die Unterschiede hervorzuheben.

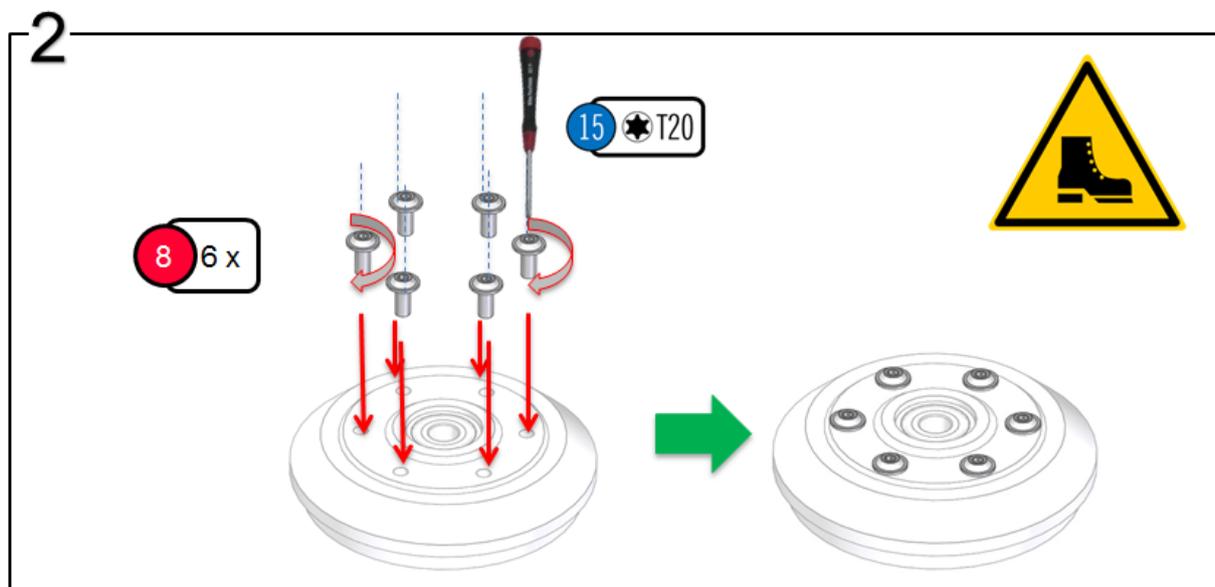


Abbildung 7.24: Bildliche Montageanleitung eines Radnabenmotors [Men-17]

In Abbildung 7.25 ist dieselbe Montagesequenz für den Utility-Film zu sehen. Die Drehrichtung der Schrauben wird vom Monteur im Film gezeigt. Montage und Endposition werden exemplarisch für die erste Schraube dargestellt. Auch hier werden Werkzeuge, Bauteilnummer und Anzahl der zu montierenden Bauteile direkt neben den Bauteilen angezeigt.

Abbildung 7.26 zeigt das Ausrichten, Fügen und Justieren aller Schrauben animiert in einem 3D-PDF. Bauteilnamen können durch Anklicken der einzelnen Bauteile angezeigt werden. Werkzeuge werden wie bei den anderen Trainingsunterlagen mit Werkzeugnummer dargestellt. Wenn Symbole angeklickt werden, erscheint eine schriftliche Erläuterung. Zusätzlich kann mit der 3D-Darstellung interagiert werden. Bauteile können gedreht, vergrößert oder selektiert werden sowie transparent, als Drahtmodell, oder isoliert dargestellt werden. Tabelle 7.7 zeigt die Einordnung des 3D-PDFs in die Lernzeugmorphologie.

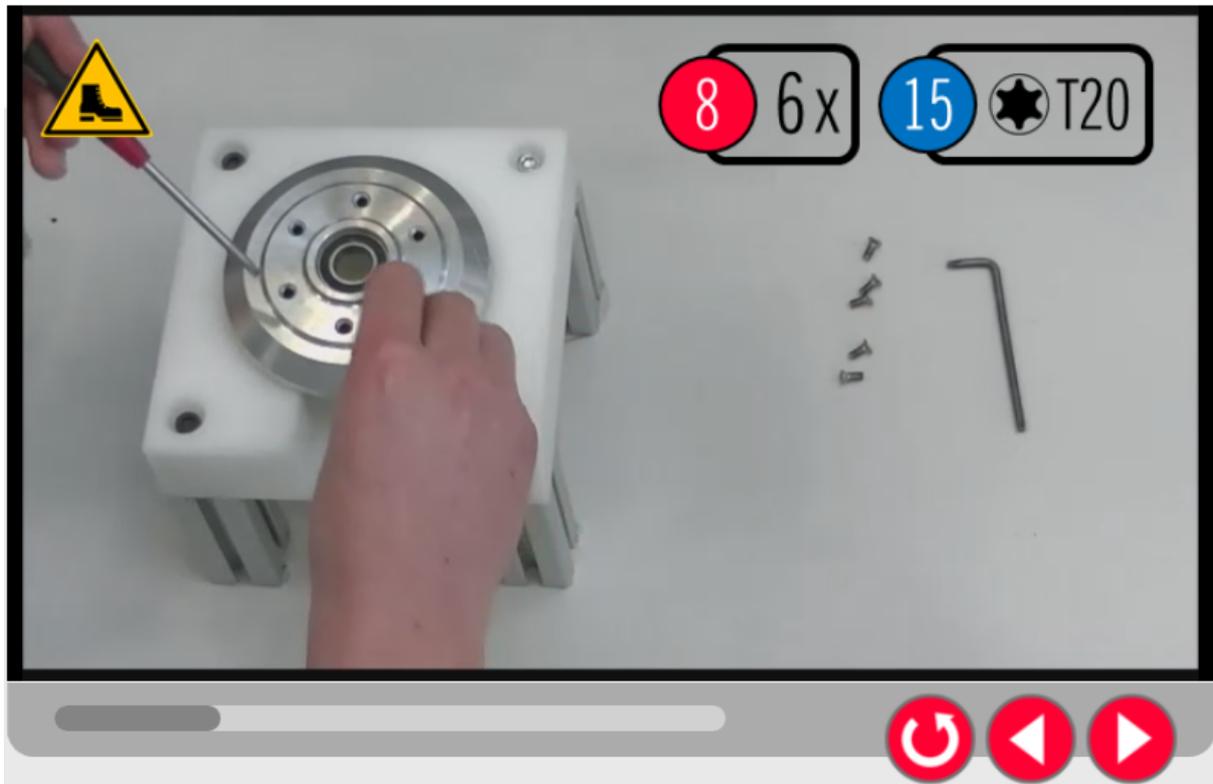


Abbildung 7.25: Utility Film eines Radnabenmotors [Men-17]

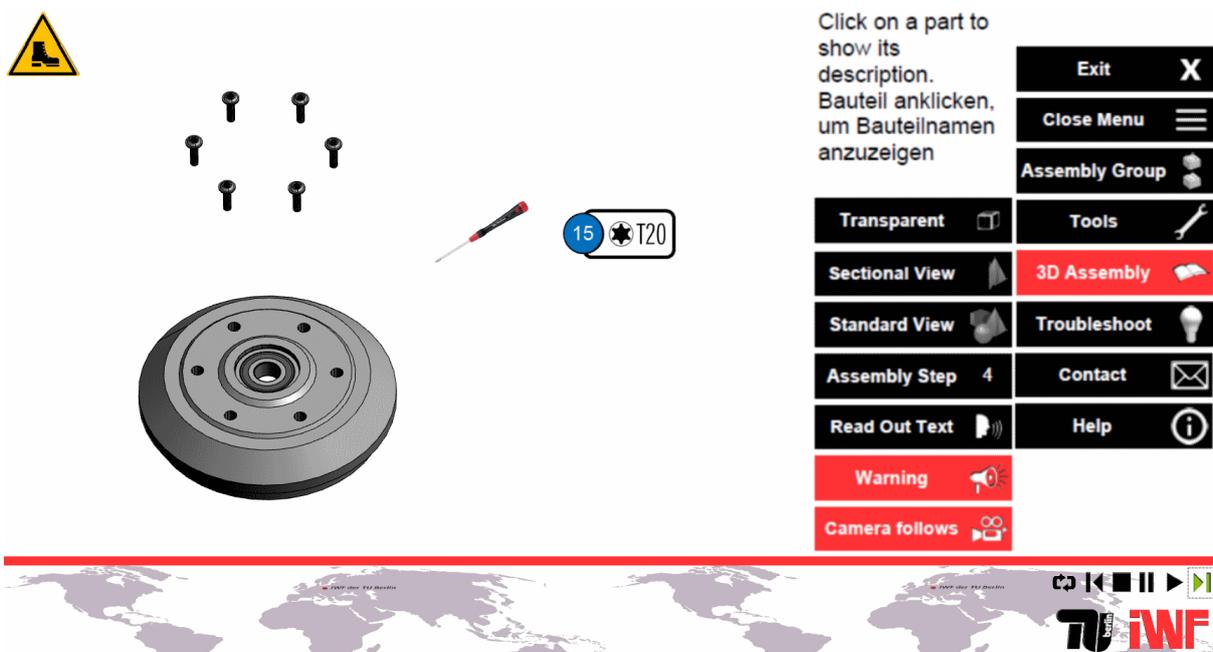


Abbildung 7.26: 3D-PDF eines Radnabenmotors [Men-17]

Tabelle 7.7: Lernzeugmorphologie 3D-PDF *Studierendenversion*

Entwicklung und Betrieb	
Zielgruppe	Hochschulbildung, Weiterbildung
Anbieter	akademische Institution
Entwicklungsprojekt	intern
Finanzierung der Entwicklung	intern
Finanzierung des Betriebs	nutzenorientiert
Zugänglichkeit	eingeschränkt
didaktisches Design	
kognitive Lernziele	Erinnern, Verstehen, Anwenden
affektive Lernziele	Aufnehmen, Reagieren
psychomotorische Lernziele	Imitation, Manipulation, Präzision
Kompetenzen	technisch und methodisch
individuelle Lerneradaption	Lernstil, Vorwissen
parallele Lerner	limitiert
Autonomie des Lernenden	selbstreguliert
Immersion	gering
Lerndauer	einige Minuten
Rückmeldung an den Lerner	indirekt
Verbindung zum Arbeitsplatz	arbeitsgebunden
didaktische Einbindung	eigenständiges Konzept
technisches Design	
Tangibilität	vollständig digital
Komplexität	kompliziert
Mobilität	mobil
Abstraktionsgrad	mittel
Komponenten	angepasst
Sprachabhängigkeit	reduziert
Umgebung	
Phase des Produktlebenszyklus	Produktion
Prozesstyp	Serienproduktion
Fabrikebene	Station

7.2.3.2 Validierung der Eignung zur Vermittlung von Montagetätigkeiten

Dem Ablauf *der dritten Phase der Lernzeugmethode* entsprechend, sollen die Testteilnehmer den Montagevorgang anhand virtueller Montageobjekte nach dem Präsenztraining wiederholen und trainieren. Um verifizieren zu können, ob sie den Montagevorgang erlernt haben, sollen sie in der folgenden Validierung nach dem Training mit dem virtuellen Montageobjekt anschließend das entsprechende physische Montageobjekt montieren. Um die drei Visualisierungsarten Utility-Film, Bildan-

leitung und 3D-PDF vergleichen zu können, wurden Tests mit Studierenden in Ho-Chi-Minh-City an der Vietnamesisch-Deutschen Universität (*Vietnamese German University*) (VGU) und in Berlin an der Technischen Universität (TU)-Berlin durchgeführt [Men-17]. Hierbei montierten 56 Studierende einen elektrischen Radnabenmotor. Jeder der Studierenden erhielt vor der Montage eine Bildanleitung, einen Utility-Film oder ein 3D-PDF. Um die Gegebenheiten im Sondermaschinenbau möglichst realitätsnah darstellen zu können, wurden nur Studierende aus Ingenieurstudiengängen ausgewählt. Jeder Studierende durfte den Motor nur einmal montieren, wie auch im Sondermaschinenbau üblich. Es wurden keine Hilfestellungen zur Bedienung und Nutzung der Trainingsunterlagen gegeben, lediglich der Arbeitsplatz wurde beschrieben. Bei allen Studierenden wurden Montagefehler und Montagezeit ermittelt. Zudem füllten sie nach der Montage einen Fragebogen aus. Im Boxplot der Montagezeiten in Abbildung 7.27 ist zu erkennen, dass die Nutzer des 3D-PDFs im Durchschnitt schneller waren als die Nutzer der beiden anderen Visualisierungsarten.

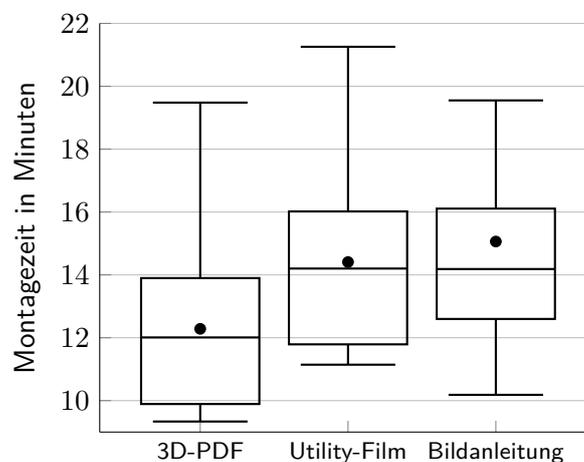


Abbildung 7.27: Montagezeiten aller Studierenden bezogen auf die Visualisierungsart nach [Men-17]

Es konnte eine durchschnittliche Montagezeitverkürzung bei Nutzung des 3D-PDFs gegenüber dem Utility-Film um 15 % und gegenüber der Bildanleitung sogar um 18 % erzielt werden. Bei der Anzahl der begangenen Montagefehler waren die Unterschiede zwischen den Visualisierungsarten nur sehr gering [Men-17]. Alle 3D-PDF-Nutzer waren sich jedoch einig, dass das 3D-PDF sehr intuitiv und sprachreduziert sei, was dabei half Zusammenhänge besser zu erfassen und somit den Montagevorgang schneller durchzuführen. Die Interaktionsmöglichkeiten des 3D-PDFs erlauben eine umfassendere Darstellung als es bei einem Film oder einer bebilderten Anleitung möglich wäre. Daher wird das 3D-PDF im Folgenden für die Verwendung in Montagetrainings im Sondermaschinenbau angepasst.

7.2.3.3 Lernzeuganpassungen für die Montage einer Kohleringdichtung

Um Montageinhalte nach einem Präsenztraining zu üben, wurden mehrere 3D-PDFs für die Montage von RG-Kompressoren entwickelt. Entsprechend *der ersten Phase der Lernzeugmethode* wurden basierend auf dem 3D-PDF für die Montage eines Radnabenmotors Verbesserungen in Design und Struktur des 3D-PDFs vorgenommen. Sie werden im Folgenden zusammen mit den Testergebnissen aus einem Montagetraining mit zwölf FSEs bei MAN ES beschrieben.

Design und Funktionalität des in [Men-17] vorgestellten 3D-PDFs wurden anhand der Rückmeldungen von Studierenden und MAN ES-Mitarbeitern angepasst und verbessert. Beim Öffnen des 3D-PDFs kann auf der ersten Seite per Klick auf die jeweilige Landesflagge entschieden werden, ob Bauteilbezeichnungen und Erklärungstexte im Dokument auf Deutsch oder Englisch dargestellt werden sollen. Auf der zweiten Seite werden die wichtigsten Bedienungsschritte des 3D-PDFs visuell aufbereitet wie Abbildung 7.28 verdeutlicht. Erfahrene Nutzer können dies überspringen. Nach einer kurzen Beschreibung der Lernziele werden auf den folgenden beiden Seiten mithilfe einer Explosionsdarstellung die Bauteile, Werkzeuge und Hilfsmittel identifiziert.

Im Vergleich zum Design des in Abschnitt 7.2.3.1 vorgestellten 3D-PDFs, existieren weniger Schaltflächen. Sie wurden zudem visuell durch die Verwendung von in Abbildung 7.29 und 7.30 dargestellten Piktogrammen aufbereitet. Hierdurch werden vor allem unerfahrene Nutzer schneller und leichter mit den Hauptfunktionen des 3D-PDFs vertraut und können nach einer kurzen Eingewöhnungsphase weitere Funktionalitäten erlernen und nutzen. Sollten trotzdem Probleme beim Verständnis eines Piktogramms entstehen, kann durch einen Klick auf das Piktogramm eine Beschreibung aufgerufen werden.

Mit einem Klick auf die Pfeile unten links und rechts wird durch die einzelnen Animationssequenzen navigiert. Animationen können mit einem Klick auf die Schaltfläche unten in der Mitte wiederholt werden. Hierunter können zusätzliche textuelle Informationen zur Montage eingeblendet werden. Bei den Nutzertests benötigte jedoch keiner der FSEs die schriftlichen Erläuterungen zum Verständnis.

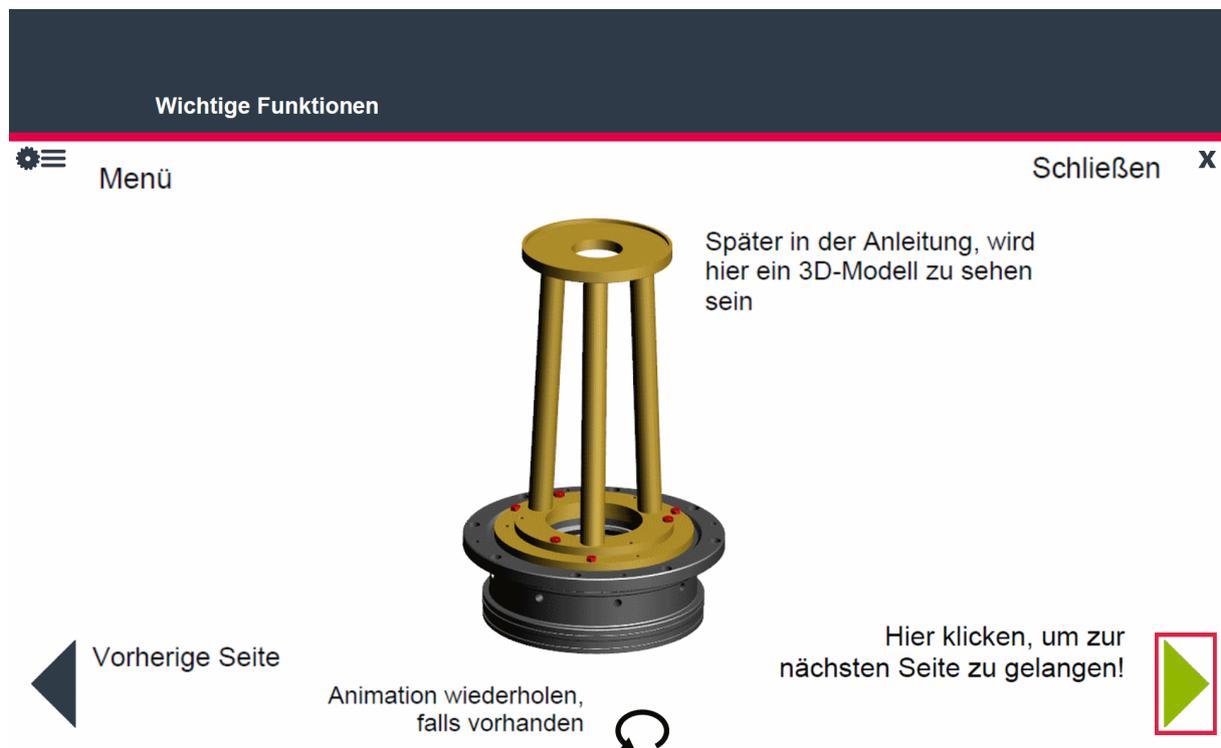


Abbildung 7.28: Erläuterungen zur Funktionsweise eines 3D-PDFs [Men-18a]

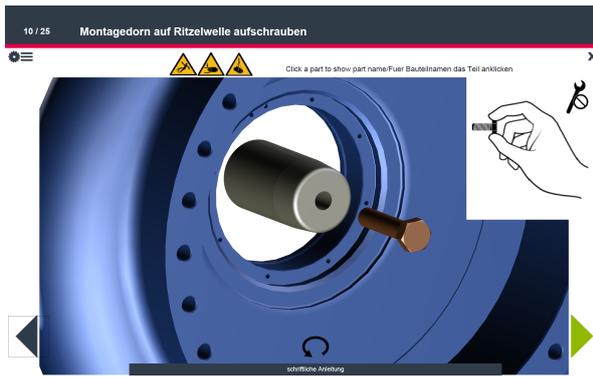


Abbildung 7.29: Beispielhafte Montagesequenz in einem 3D-PDF (1/2) [Men-18a]



Abbildung 7.30: Beispielhafte Montagesequenz in einem 3D-PDF (2/2) [Men-18a]

Oben links werden Nummer und Beschreibung des Montagevorgangs, Gefahren- und Hinweissymbole angezeigt. Wird ein Bauteil angeklickt, erscheint der zugehörige Bauteilname. In der Mitte des Bildschirms werden Animationen der Montagevorgänge angezeigt. Sie können gedreht, vergrößert oder verschoben werden. Falls benötigt werden, Piktogramme zur Werkzeugverwendung oder mit weiteren Informationen eingeblendet. Über das Menü können beliebige Montagevorgänge ausgewählt, Schnitte durch die gezeigte Animation gelegt, Zusatzinformationen angezeigt und eine transparente Darstellung der Bauteile ausgewählt werden. Tabelle 7.8 zeigt die Einordnung in die Morphologie.

Tabelle 7.8: Lernzeugmorphologie 3D-PDF *MAN ES*

Entwicklung und Betrieb	
Zielgruppe	Weiterbildung
Anbieter	Industrieunternehmen
Entwicklungsprojekt	extern unterstützt
Finanzierung der Entwicklung	intern
Finanzierung des Betriebs	produktorientiert, nutzenorientiert
Zugänglichkeit	eingeschränkt
didaktisches Design	
kognitive Lernziele	Erinnern, Verstehen, Anwenden, Analysieren
affektive Lernziele	Aufnehmen, Reagieren
psychomotorische Lernziele	Imitation, Manipulation, Präzision
Kompetenzen	technisch und methodisch, aktivitäts- und handlungsorientiert
individuelle Lerneradaptation	Kultur, Vorwissen, Lernstil
parallele Lerner	unlimitiert
Autonomie des Lernenden	selbstreguliert und -organisiert
Immersion	gering
Lerndauer	einige Minuten bis Stunden
Rückmeldung an den Lerner	indirekt
Verbindung zum Arbeitsplatz	arbeitsgebunden und -verbunden
didaktische Einbindung	integriert in neues Konzept

technisches Design	
Tangibilität	vollständig digital
Komplexität	kompliziert
Mobilität	mobil
Abstraktionsgrad	mittel
Komponenten	angepasst
Sprachabhängigkeit	reduziert und teilweise unabhängig

Umgebung	
Phase des Produktlebenszyklus	Produktion, Nutzung
Prozesstyp	Unikatfertigung
Fabrikebene	Station und außerhalb der Fabrik

7.2.3.4 Validierung der Eignung zur Vermittlung der Montage einer Kohleringdichtung

Das 3D-PDF wurde in einem Training bei MAN ES mit zwölf FSEs getestet [Men-18a]. Da an dem genutzten Trainingskompressor nicht alle Montagevorgänge selbständig von den FSEs durchgeführt werden dürfen, konnte kein vergleichender Test mit einer anderen Trainingsmethode oder zur Montagezeit durchgeführt werden. Es war jedoch möglich, die Akzeptanz der FSEs gegenüber dem 3D-PDF zu prüfen sowie die aus ihm resultierenden Vorteile für die Montage zu ermitteln. Den am Training teilnehmenden FSEs wurden zunächst das Projekt und die damit verbundenen Trainingsziele vorgestellt. Am ersten Trainingstag erhielt jeder FSE ein 3D-PDF für die Kohleringdichtungsmontage mit der Bitte dieses als Vorbereitung der Montage durchzugehen. Es wurde keine weitere Hilfe durch den Trainer zur Verfügung gestellt. Entsprechend *der dritten Phase der Lernzeugmethode* konnten die FSEs die Montage nur mithilfe des digitalen Montageobjekts trainieren. Am folgenden Tag wurden die FSEs gebeten, die in dem 3D-PDF gezeigten Montagetätigkeiten an einem Kompressor durchzuführen. Ein Laptop mit dem 3D-PDF stand während der Montage bereit, um weitere Informationen abzurufen. Nach einer kurzen Sicherheitseinführung führten die FSEs die Montage eigenständig und ohne Fehler durch. Nach der Montage wurden die FSEs gebeten einen Fragebogen auszufüllen. Neben persönlichen Informationen wurde die Bedeutung aller in dem 3D-PDF verwendeten Piktogramme abgefragt. Lediglich bei zwei der fast zehn Piktogramme gab es eine, bzw. zwei falsche Antworten [Men-18a]. Abbildung 7.31 zeigt die Ergebnisse einer Umfrage zur allgemeinen Einschätzung des 3D-PDFs. Die FSEs bewerteten alle Kategorien im Durchschnitt zwischen *sehr gut* und *eher gut*. Alle FSEs waren davon überzeugt, dass die Nutzung des 3D-PDFs zusätzlich zu den bisherigen Dokumenten eine wertvolle Ergänzung darstelle und ihre Arbeit signifikant erleichtere [Men-18a].

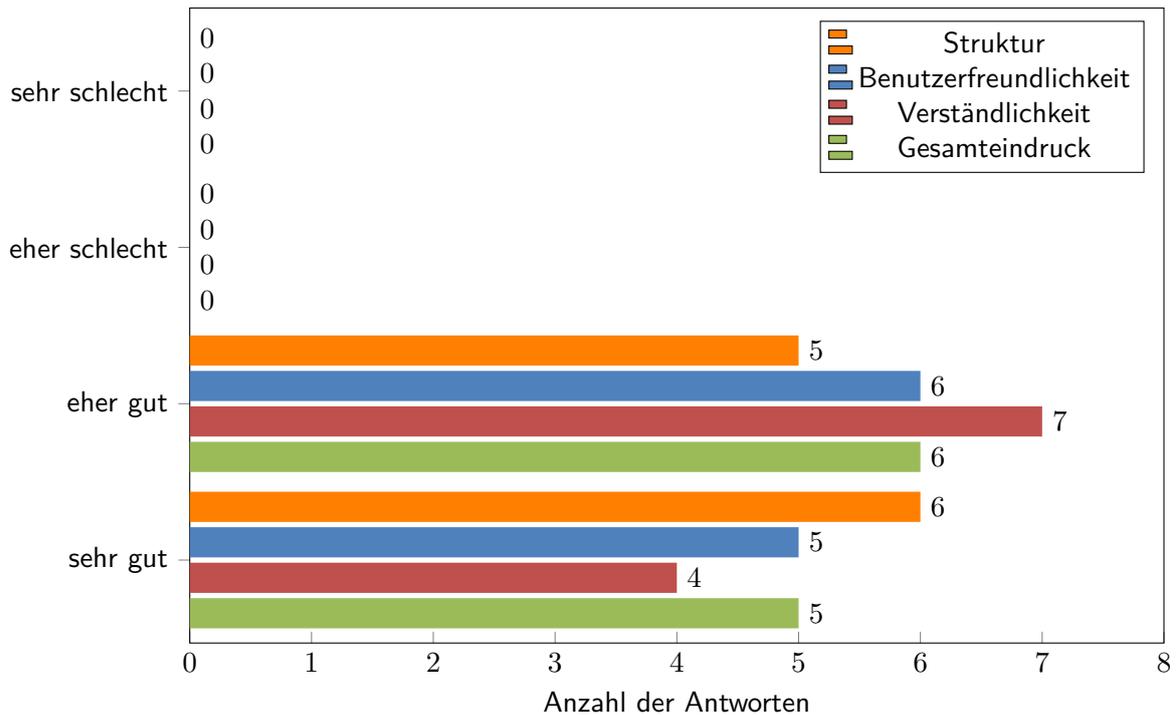


Abbildung 7.31: Umfrageresultate von zwölf Field Service Engineers nach einer Montageschulung mit einem 3D-PDF nach [Men-18a]

7.3 Lernzeugvergleich

Jede der Stufen *Identifizieren*, *Handhaben*, *Ausrichten*, *Verbinden*, *Justieren* und *Überprüfen* in der manuellen Montage hat bestimmte Anforderungen, welche erfüllt werden müssen, um eine erfolgreiche, schnelle und fehlerfreie Montage zu gewährleisten. Aus Tabelle 7.9 wird deutlich, dass die entwickelten Lernzeuge die Anforderungen fast vollständig erfüllen. Lediglich das 3D-PDF zeigt nicht an, wo sich die Bauteile befinden und gibt auch keine Rückmeldung, ob sie richtig montiert wurden. Diese Funktionen werden hier nicht benötigt, da dieses Lernzeug primär für den Einsatz nach einem Training ohne physische Montageobjekte konzipiert wurde. Beim HoloLens-Lernzeug für die Kompressor montage wurde auf die Implementierung eines Rückmeldesystems verzichtet. Dieses kann jedoch basierend auf induktiven oder Photosensoren nachgerüstet werden. Tabelle 7.10 fasst die durchgeführten Lernzeugtests zusammen.

Alle in der vorliegenden Arbeit entwickelten Lernzeuge konnten die komplizierten Zusammenhänge der jeweiligen Montagevorgänge vermitteln. Es traten nur in vereinzelt Fällen Montagefehler auf, jedoch in jedem Fall deutlich weniger als bei den anderen Visualisierungstechnologien Print, Video und Bauteilzeichnung. Die Lernziele wurden zu Beginn der Lernzeugnutzung kommuniziert. Eine Lernzeugnutzung ist sowohl arbeitsverbunden als auch arbeitsorientiert möglich. Das direkte Training an der hochpreisigen Sondermaschine ist nicht nötig, aber möglich. Die entwickelten Lernzeuge konnten sowohl von einem Lerner alleine als auch in der Gruppe genutzt werden. Bei der Benutzung in Gruppen entstand sowohl vor, als auch während und nach der Nutzung ein reger Austausch in Form von Sozialisation zwischen den Teilnehmern, welcher zu einer impliziten Wissensweitergabe führen kann. Gefährliche Abläufe wie der Durchfluss heißer Gase durch einen Kompressor oder Getriebebewegungen

konnten problemlos in der AR-App simuliert werden. Die Lernzeugnutzer empfanden den Umgang mit dem Lernzeug als intuitiv und erlebten das Arbeiten mit dem Lernzeug als interaktives Lernen. Hierbei halfen die Rückmeldungen der Lernzeuge Fehler zu vermeiden. Eine Sprachreduzierung konnte in allen Lernzeugen durch die vermehrte Verwendung von Bildern, Piktogrammen und Animationen erreicht werden. War dies nicht möglich, so wurde eine mehrsprachige textuelle und auditive Ausgabe der Inhalte ermöglicht.

Tabelle 7.9: Vergleich entwickelter Lernzeuge bezogen auf die Montageinhaltsvermittlung

	AR/VR-App	AR/VRApp mit Sensorik	HoloLens Steckdose	HoloLens Kompressor	3D-PDF Radnabenmotor	3D-PDF Kompressor
Identifizieren						
Wo befinden sich die benötigten Bauteile?		X	X	X		
Welche Bauteile werden benötigt und wie sehen sie aus?	X	X	X	X	X	X
Wie viele Bauteile jeder Art werden benötigt?	X	X	X	X	X	X
Handhaben und Ausrichten						
Wo werden sie montiert?	X	X	X	X	X	X
In welcher Reihenfolge werden sie montiert?	X	X	X	X	X	X
Welche Gefahren können bei der Montage für den Monteur, das Bauteil oder die Umwelt entstehen?	X	X	X	X	X	X
Fügen und Justieren						
Welche Werkzeuge werden für die Verbindung benötigt?	X	X	X	X	X	X
Wo befinden sich diese Werkzeuge?	X	X	X	X		
Wie werden die Werkzeuge benutzt?	X	X	X	X	X	X
Überprüfen						
		X	X			X

Tabelle 7.10: Lernzeugvergleich

		AR/VR-App	AR/VR-App mit Sensorik	HoloLens	HoloLens	3D-PDF	3D-PDF
Montageobjekt	Kompressor				X		X
	Kompressormodell	X	X				
	Radnabenmotor					X	
	Steckdose			X			
Phase der Lernzeugmethode		2	2	2	2	(2) 3	(2) 3
Technologie	Animation					X	X
	VR	X	X				
	AR	X	X	X	X		
Sensorik	Spannungsmesser			X			
	Photosensor		X				
	Dehnungsmessstreifen		X				
Testteilnehmer	Auszubildende	10					
	FSEs	10	8		23		12
	Messebesucher			25	200		
	Studierende	31	5			56	
untersuchte Kriterien	Montagezeit	X	X			X	
	Montagefehler	X	X	X	X	X	X
	Verständlichkeit	X	X	X	X	X	X
	Interaktivität	X	X	X	X	X	X
	Tragekomfort			X	X		
	Akzeptanz	X	X	X	X	X	X
	Piktogramverständnis					X	
Vergleich mit	Bildanleitung					X	
	Utility Film					X	
	Bauteilzeichnung	X	X				
Ergebnis	Verringerung der Montagezeit durch Lernzeugnutzung?	Ja	Ja			Ja	Ja
	Verringerung der Fehlerzahl durch Lernzeugnutzung?	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

7.4 Wirtschaftliche Bewertung

Nachfolgend wird anhand beispielhafter Wirtschaftlichkeitsrechnungen eine quantitative Einschätzung des Einsparungspotenzials für den Sondermaschinenbau getroffen. Im Anhang kann zudem Tabelle G.4 bis G.6 eine Abschätzung für das Potenzial in der Serienfertigung entnommen werden, wobei die Zahl der Trainings und der geschulten Mitarbeiter pro Jahr deutlich über der im Sondermaschinenbau liegt und somit ein noch höheres Einsparpotenzial erreicht werden kann. Tabelle G.1 bis G.3 geben im Anhang einen Überblick über die Erstellungs- und Nutzeneffekte für die App, das 3D-PDF und die HoloLens-Anwendungen. Als Vergleichswert wurde für die App die Nutzung einer im Sondermaschinenbau üblichen Bauteilzeichnung mit schriftlicher Montageanleitung angenommen. Zuvor wurde der Aufbau des Kompressors innerhalb einer Stunde durch einen Trainer vermittelt. Dies geschah jedoch meist auch mit anderen Inhalten vermischt, sodass ein direkter Vergleich nicht möglich war.

Zu den Investitionskosten zählen die Anschaffungskosten für die zur Erstellung und zur Nutzung von 15 Trainingsteilnehmern benötigte Hardware sowie die Softwarekosten während der Entwicklungszeit. Es wurden die realen Entwicklungskosten, basierend auf Kostensätzen für wissenschaftliche Mitarbeiter und Studierende der TU Berlin aus 2019 betrachtet. Die Nutzungsdauer des Systems wird mit fünf Jahren bei einem kalkulatorischen Zinssatz von 5 % angenommen. Während der Nutzungszeit fallen keine Softwaregebühren an, es wurden jeweils nur Wartungskosten angenommen, welche den Ersatz zerstörter Geräte sowie kleiner programmiertechnische Anpassungen einschließen. Da es sich bei allen drei Lernzeugen um Prototypen handelt, an deren Realisierung mehrere Gruppen beteiligt waren, bestand jedes Mal ein hoher Einarbeitungsaufwand, welcher bei einer Umsetzung in der Wirtschaft in einem beständigen Team nicht anfallen würde.

Es wird weiter angenommen, dass die FSEs im Montagetraining durch die Lernzeuge im Durchschnitt bei App-Nutzung 30 % bei HoloLens-Nutzung 10 % und bei 3D-PDF-Nutzung 15 % schneller als mit konventionellen Bauteilzeichnungen und schriftlichen Anleitungen üben können. Diese konservativen Annahmen liegen deutlich unter den in Kapitel 7 erreichten Werten. Eine kürzere Amortisation kann somit angenommen werden. Eine Trainingseinheit von einer Stunde kann mithilfe der Lernzeuge somit in nur 0,70 h *App*, 0,90 h *HoloLens* bzw. 0,85 h *3D-PDF* absolviert werden. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass eine Stunde Montagetraining mit einem Lernzeug einem konventionellen Training von 1,43 h *App*, 1,11 h *HoloLens* bzw. 1,18 h *3D-PDF* entsprechen.

Die App wird während der Einführung ca. eine halbe Stunde pro Teilnehmer genutzt. Die HoloLens wird während des Trainings pro Teilnehmer für ca. 3 h genutzt und das 3D-PDF für ca. 1,5 h während des Trainings. Die Nutzung des 3D-PDFs zum Üben nach dem Training wurde nicht betrachtet und führt zu weiteren Kosteneinsparungen. Bei jährlich zwei durchgeführten Montagetrainings mit einer Maximalteilnehmerzahl von 15 Teilnehmern ergibt sich eine jährliche Nutzungsdauer von 30 h *App*, 90 h *HoloLens* bzw. 45 h *3D-PDF*. Bei Lohnkosten von 170 Euro/h pro Teilnehmer und 200 Euro/h pro Trainer ergeben sich jährliche Einsparungen von 17.678,57 Euro *App*, 27.500,00 Euro *HoloLens* bzw. 21.838,24 Euro *3D-PDF*. Diesen jährlichen Einsparungen stehen jährliche Kosten von 8.686,91 Euro *App*, 12.613,65 Euro *HoloLens* bzw. 7.093,06 Euro *3D-PDF* gegenüber, welche sich aus den Wartungskosten und den kalkulatorischen Abschreibungen und Zinsen zusammensetzen. Somit ergeben sich Amortisationszeiten von 2,16 Jahren *App*, 1,56 Jahren *HoloLens* bzw. 1,34 Jahren *3D-PDF*.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund immer kürzerer Produktinnovationszyklen und höherer Vielfalt an Produktvarianten, werden neue Ansätze zur Wissensvermittlung benötigt, damit Mitarbeiter effektiv und effizient die Produktmontage erlernen können. Diese Ansätze sollten nicht mehr der älteren lehrerzentrierten, sondern der neueren lernerzentrierten Sichtweise folgen, um ein individuelles Lernen nicht nur für Einzelpersonen, sondern auch in Gruppen zu ermöglichen. Das Ziel der vorliegenden Dissertation ist die Erhöhung der Lern- und Lehrproduktivität mit Fokus auf der Vermittlung psychomotorischer Montagefertigkeiten in produzierenden Unternehmen. Es werden lernerzentrierte digitale Werkzeuge, sogenannte Lernzeuge sowie eine didaktische Methode für ihre Anwendung in der Montagetrainingsunterstützung entwickelt und anschließend am Beispiel der Sondermaschinenmontage implementiert und validiert. Lernzeuge sind Werkzeuge, die dem Benutzer ihre Funktionalität automatisch vermitteln. Durch sie können Nutzer mit unterschiedlichen Qualifikationsniveaus und Sprachkenntnissen intuitiv und selbstständig den Umgang mit neuartigen Produktionsmaschinen und -prozessen erlernen. Die Psychomotorik umfasst die körperliche Bewegung, Koordination und Nutzung motorischer Fertigkeiten.

Die Produktmontage wird als zentrales Beispiel für zu erlernende psychomotorische Fertigkeiten gewählt. Um die erforderlichen Fertigkeiten für die Durchführung eines Montagevorgangs zu erlangen, müssen die Schritte *Identifizieren, Handhaben, Ausrichten, Fügen, Anpassen* und *Überprüfen* trainiert werden [Nof-97, Boo-10, Rad-15, DIN8593]. Zudem müssen Monteure trainiert werden, bei einfachen Montagesystemen Zusammenhänge in Montagevorgängen zu *erkennen* und diese nach zu erlernenden oder bekannten Regeln zu *kategorisieren*, um regelkonform *reagieren* zu können. Bei komplizierten Montagesystemen, wie sie häufig in der Sondermaschinenmontage existieren, können diese Zusammenhänge nach dem *Erkennen* nicht kategorisiert, sondern müssen *analysiert* werden, bevor dementsprechend *reagiert* werden kann [Sno-07]. Eine Montage kann aufgrund von Anpassarbeiten, welche durch Produktionsfehler ausgelöst wurden, kompliziert werden.

Die erhöhte kognitive Aktivität in der ersten *kognitiven* Lernstufe nach [Fit-67] führt zu einer hohen Montagedurchführungszeit am Beginn des Lernprozesses. Diese kognitive Aktivität kann durch die Wahl einer geeigneten Visualisierungstechnologie sowie durch die Verringerung der kognitiven Distanz gesenkt werden. Die kognitive Distanz beschreibt den Abstand zwischen der Form in welcher Informationen präsentiert werden und dem Kontext in dem sie angewandt werden und bezieht sich hierbei auch auf die Entfernung zwischen Lern- und Ausführungsort [Por-17]. Der Lerninhalt muss vom Lerner am Lernort erst aufgenommen, interpretiert und verstanden werden, um anschließend am Ausführungsort umgesetzt zu werden. Diese Übertragungsleistung wird umso größer, je stärker die Art der Darstellung des Lerninhalts von der Ausführung in der Realität abweicht und je weiter Lern- und Ausführungsort voneinander entfernt sind.

In der vorliegenden Arbeit wird eine lernerzentrierte psychomotorische Trainingsmethode zur Vermittlung von Montagefertigkeiten entwickelt, welche individuelles Lernen basierend auf dem Konzept der Lernzeuge ermöglicht und somit einen wesentlichen Beitrag zur Produktivitätssteigerung leis-

tet. Die entwickelte Methode wird im Folgenden als Lernzeugmethode bezeichnet und besteht aus den drei Phasen *Lernzeugentwicklung*, *Lernzeugnutzung während des Trainings* und *Lernzeugnutzung nach dem Training*.

In der *ersten Phase* der Lernzeugentwicklung wird eine Morphologie entwickelt, welche bestehende Lernzeuge klassifiziert und Lösungsräume neuer Lernzeuge aufzeigt. Zudem werden Gestaltungsgrundsätze identifiziert, welche die von [Dix-04] geforderte *Erlernbarkeit*, *Flexibilität* und *Robustheit* der Anwendung von Lernzeugen sowie die automatische Vermittlung der Lernzeugfunktionalität ermöglichen. Lernzeuge nutzen für die Inhaltsvermittlung verstärkt Visualisierungstechnologien. Daher werden bestehende und neue Visualisierungstechnologien in der vorliegenden Arbeit auf ihre Nutzbarkeit in Lernzeugen untersucht. Hierbei bieten neuere Technologien wie Augmented Reality (AR), Virtual Reality (VR) und animierte Darstellungen ein hohes Interaktions- und Individualisierungspotenzial, um lernerzentriertes Lernen zu ermöglichen. Um den Erstellungsaufwand für Lernzeuge, welche diese Technologien nutzen, zu senken, wird untersucht, ob eine automatisierte Lernzeugerstellung realisierbar ist. Hierzu wird eine Programmiererweiterung, *engl. Plugin*, für die Programmierumgebung Unity erstellt. In ihr wird automatisiert ein CAD-Modell eines montierten Produktes zunächst demontiert und anschließend wieder zusammengesetzt, wobei die im Lernzeug genutzten Montageanimationen generiert werden. Somit kann die Realisierbarkeit einer automatisierten Erstellung von AR-basierten Animationen für Lernzeuge experimentell verifiziert werden. Das Vorgehen ist prinzipiell auch auf VR-Anwendungen und Animationen übertragbar.

In der *zweiten Phase* der Lernzeugmethode erfolgt die Lernzeuganwendung innerhalb von Montagetrainings. Hierbei werden durch das Lernzeug zunächst die zu vermittelnden Lerninhalte vorgestellt. Die Teilnehmer von Montagetrainings können anschließend das weitere Vorgehen basierend auf ihrem Vorwissen selbst planen. Hiernach erfolgt ein interaktives Erlernen der Montage mithilfe des Lernzeugs. Bei der Verwendung von AR als Visualisierungstechnologie werden die erforderlichen Montagevorgänge und Zusatzinformationen wie Bauteilnamen oder Sicherheitshinweise direkt am Montageobjekt eingeblendet und ermöglichen so eine geringe kognitive Distanz. Bei der Verwendung geeigneter Sensorik und Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) erhält der Lerner ein direktes Feedback über die Qualität der von ihm durchgeführten Montagevorgänge. Zudem kann er den Lernprozess selbst strukturieren und individualisieren, indem er einzelne Montagevorgänge überspringt, die Darstellungsform von Zusatzinformationen ändert und sie visuell oder auditiv abrufen oder indem er die Montage nicht alleine, sondern gemeinsam mit anderen Lernern erlernt. Erfolgt das Lernen in Gruppen, können die einzelnen Lerner einen individuellen Schwerpunkt auf die Phasen *konkrete Erfahrung*, *Beobachtung und Reflexion*, *abstrakte Begriffsbildung* sowie *aktives Experimentieren* des Lernzyklus nach [Kol-71] legen, um ein effizienteres Lernen zu ermöglichen. Anschließend wird der Montagevorgang innerhalb der Gruppen oder mit dem Trainer besprochen und mögliche Unterschiede zwischen der vom Lernzeug vermittelten Methode und den bisherigen Montageerfahrungen der Lerner identifiziert. Diese Unterschiede bilden ein hohes Verbesserungspotenzial für die Lernzeugweiterentwicklung. Das Erlernen von Montagevorgängen in der Gruppe sowie die anschließenden Diskussionen fördern zudem die *Sozialisierung* als Form der impliziten Wissensweitergabe nach [Non-92].

Sollte die Durchführung der zu erlernenden Montagevorgänge einen hohen Zeitaufwand erfordern, kann es vorkommen, dass diese in einem Montagetraining nur ein- bis zweimal wiederholt werden können. Somit wäre es nicht möglich, die zweite *assoziative* und dritte *autonome* Lernstu-

fe nach [Fit-67] innerhalb des Trainings zu erreichen. Daher wird eine Begleitung des Lernprozesses durch ein Lernzeug auch nach dem Training innerhalb der *dritten Phase* der Lernzeugmethode untersucht. Da nach dem Training meist keine physischen Produkte für das Lernen mehr zur Verfügung stehen, gelten andere Anforderungen für Lernzeuge sowie für genutzte Visualisierungstechnologien. Die nach dem Training eingesetzten Lernzeuge müssen aufgrund nicht verfügbarer physischer Montageobjekte vollständig digital sein und sollten in ihrem Aufbau und in der Art der Interaktion den innerhalb des Trainings genutzten Lernzeugen entsprechen.

Nach einer Zielgruppenanalyse und einer Lerninhaltsbestimmung wird die Eignung der ausgewählten Visualisierungstechnologien AR, VR und Animationen zur Vermittlung von Montagetätigkeiten mit internationalen Studierenden sowie Mitarbeitern des Sondermaschinenherstellers MAN ES getestet. Basierend auf den Ergebnissen werden die Lernzeuge für die Nutzung in Sondermaschinenbautrainings verbessert und erneut mit Studierenden, MAN ES-Mitarbeitern sowie Messebesuchern der Hannover Messe Industrie 2019 getestet. Hierbei kann gezeigt werden, dass die entwickelten Lernzeuge ihre Funktionalität automatisch vermitteln, eine Erklärung durch den Versuchsleiter ist meist nicht erforderlich. Die ausgewählten Visualisierungstechnologien AR, VR und Animationen sind aufgrund eines geringeren Interpretationsaufwandes den getesteten video-, bild-, text- und zeichnungsbasierten Anleitungen überlegen, da eine kürzere Montagezeit bereits in den ersten Durchläufen sowie eine geringere Fehlerzahl erzielt werden kann. Zudem bieten sie ein hohes Potenzial, um automatisiert Lernzeuge herstellen zu können. Ansätze hierzu werden in der vorliegenden Arbeit aufgezeigt. Des Weiteren wird die wirtschaftliche Eignung der entwickelten Lernzeuge für den Einsatz in der Sondermaschinenmontage beispielhaft anhand einer Wirtschaftlichkeitsrechnung verifiziert. Die entwickelte Lernzeugmethode wird in der vorliegenden Arbeit für die Anwendbarkeit in Montagetrainings hochpreisiger und komplizierter Sondermaschinen, welche in Baustellenmontage produziert werden, validiert. Um die Eignung im Einzelfall zu validieren, sollte aufgrund der Unterschiede in Massen-, Serien-, und Einzelanfertigung, eine erneute Wirtschaftlichkeitsrechnung sowie eine Bewertung der zur Verfügung stehenden Visualisierungstechnologien für den jeweiligen Anwendungsfall durchgeführt werden. Das allgemeine Vorgehen bei der Erstellung und Nutzung von Lernzeugen innerhalb der Methode kann jedoch beibehalten werden. Zukünftige Handlungsfelder liegen in der Ermittlung der Eignung der entwickelten Lernzeugmethode für die Serien- und Massenfertigung sowie in einer Verbesserung der automatisierten Lernzeugerstellung mit den in der Arbeit angesprochenen Visualisierungstechnologien. Durch die automatisierte Erstellung können der Entwicklungsaufwand weiter reduziert sowie eine kostengünstigere Implementierung realisiert werden. Die innerhalb der Lernzeuge gegebenen Rückmeldungen vermitteln dem Nutzer derzeit nur, ob die Montagevorgänge richtig oder falsch durchgeführt wurden. In der Entwicklung künftiger Lernzeuge sollten Rückmeldungen, wie von [Shn-17] gefordert, detaillierter gestaltet werden und dem Nutzer die Konsequenzen falscher und richtiger Durchführung sowie zukünftiges Verbesserungspotenzial aufzeigen. Zudem sollte die Lernzeugmorphologie weiterentwickelt und für neue Anwendungsfelder geöffnet werden. Die vorliegende Arbeit kann als Grundlage zur Entwicklung neuer Lernzeuge auch außerhalb von Industrieländern wie Deutschland genutzt werden. Die Lernzeugentwicklung und -anwendung in sogenannten *Emerging Countries* bietet großes Potenzial, um erste Schritte zur Erhöhung der Lern- und Lehrproduktivität nicht nur in der Vermittlung von Montagevorgängen, sondern auch in der Verbreitung des Nachhaltigkeitsgedankens zu realisieren.

Literaturverzeichnis

- [Abe-17] Abele, E.; Chryssolouris, G.; Sihm, W.; Metternich, J.; ElMaraghy, H.; Seliger, G.; Sivard, G.; ElMaraghy, W.; Hummel, V.; Tisch, M.; Seifermann, S.; *Learning factories for future oriented research and education in manufacturing*; in *CIRP Annals*; 66(2), 2017:803–826.
- [Abe-19] Abele, E.; Metternich, J.; Tisch, M. (Hrsg.); *Learning factories: Concepts, guidelines, best-practice examples*; Springer Nature, Cham, Switzerland, 2019.
- [Abr-17] Abramovici, M.; Wolf, M.; Adwernat, S.; Neges, M.; *Context-aware Maintenance Support for Augmented Reality Assistance and Synchronous Multi-user Collaboration*; in *Procedia CIRP*; 59, 2017:18–22.
- [Ada-08] Adami, W.; Lang, C.; Pfeiffer, S.; Rehberg, F.; *Montage braucht Erfahrung: Erfahrungsbasierte Wissensarbeit in der Montage*; Rainer Hampp Verlag, München; 1. Edn., 2008.
- [Al-18] Al-Ahmari, A.; Ameen, W.; Abidi, M. H.; Mian, S. H.; *Evaluation of 3D printing approach for manual assembly training*; in *International Journal of Industrial Ergonomics*; 66, 2018:57–62.
- [Ale-07] Alexander, K.; *Kompendium der visuellen Information und Kommunikation*; Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg; 2. Edn., 2007.
- [Ama-18a] Amazon; *UMIDIGI 3D VR Headset*; https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/41x7s2AjcKL._SX425_.jpg, 2018, letzter Zugriff am 20.06.2018.
- [Ama-18b] Amazon; *Xbox Wireless Controller*; https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/51DnDsi2DxL._SL1000_.jpg, 2018, letzter Zugriff am 20.06.2018.
- [And-01] Anderson, L. W.; Krathwohl, D. R.; Airasian, P. W.; Cruikshank, K. A.; Mayer, R. E.; Pintrich, P. R.; Raths, J.; Wittrock, M. C.; *A Taxonomy for Learning, Teaching, and Assessing: A revision of Bloom's Taxonomy of Educational Objectives*; Pearson, Allyn & Bacon., New York, USA, 2001.
- [And-09] Anders, C.; *Sensomotorisches System: Physiologisches Detailwissen für Physiotherapeuten*; Physiofachbuch; Thieme, Stuttgart und New York, 2009.
- [Aug-77] Augusta, G.; Flader, H.-D.; Kugler, M.; *Transportieren und Lagern*; Verlag Technik, Berlin, 1977.

- [Azu-97] Azuma, R. T.; *A Survey of Augmented Reality*; in *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*; 6(4), 1997:355–385.
- [Bai-89] Bainbridge, L.; Ruiz Quintanilla, S. A. (Hrsg.); *Developing skills with information technology*; New technologies and work; Wiley, Chichester, 1989.
- [Bal-05] Ballstaedt, S.-P.; *Visualisierung: Bilder in der technischen Kommunikation: Zertifikatslehrgang Technische Dokumentation*; Fachhochschule Gelsenkirchen, Gelsenkirchen, 2005.
- [Bec-15] Becker, O.; Grimm, C.-S.; *Schreibst du noch oder zeichnest du schon: Erfolgreiche Gestaltung einer textlosen Anleitung*; tcworld conference; Stuttgart, 2015.
- [Ben-01] Benkert, S.; *Wissensvermittlung mit neuen Medien: Untersuchungen am Beispiel Niedrigenergie- und Solararchitektur*; Dissertation; Universität Gesamthochschule Siegen; Siegen, 2001.
- [Ben-13] Benesch, T.; *Schlüsselkonzepte zur Statistik*; Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2013.
- [Beu-13] Beudels, W.; Lensing-Conrady, R.; Beins, H. J.; *...das ist für mich ein Kinderspiel: Handbuch zur psychomotorischen Praxis*; Bestseller; Borgmann Media, Dortmund; 11. Edn., 2013.
- [Bey-67] Beyerle, P.; *Das Lehrgespräch: Die Technik des gelenkten Gesprächs mittels der Konferenzmethode: Sonderheft der REFA-Nachrichten*; Berlin, 1967.
- [Big-95] Biggs, J.; *Assessing for learning: Some dimensions underlying new approaches to educational assessment*; in *Alberta Journal of Educational Research*; 41(1), 1995:1–17.
- [Big-14] Biggs, J. B.; Collis, K. F.; Edward, A. J.; *Evaluating the Quality of Learning: The SOLO Taxonomy (Structure of the Observed Learning Outcome)*; Elsevier Science, Saint Louis, 2014.
- [Blo-56] Bloom, B. S.; Engelhart, M. D.; Furst, E. J.; Hill, W. H.; Krathwohl, D. R.; *Taxonomy of Educational Objectives: The Classification of Educational Goals*; Vol. 1; D. McKay, 1956.
- [Bok-06] Bokranz, R.; Landau, K.; *Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen: MTM-Handbuch*; Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2006.
- [Bon-99] Bonz, B.; *Methoden der Berufsbildung: Ein Lehrbuch*; weiter lernen; Hirzel, Stuttgart, 1999.

- [Boo-10] Boothroyd, G.; Dewhurst, P.; Knight, W. A.; *Product Design for Manufacture and Assembly*; Manufacturing Engineering and Materials Processing; CRC Press, Hoboken; 3. Edn., 2010.
- [Bor-13] Bornewasser, M.; Zülch, G. (Hrsg.); *Arbeitszeit - Zeitarbeit: Flexibilisierung der Arbeit als Antwort auf die Globalisierung*; Springer Gabler, Wiesbaden, 2013.
- [Bor-15] Borsci, S.; Lawson, G.; Broome, S.; *Empirical evidence, evaluation criteria and challenges for the effectiveness of virtual and mixed reality tools for training operators of car service maintenance*; in *Computers in Industry*; 67, 2015:17–26.
- [Bra-75] Branson, R. K.; Rayner, G. T.; Cox, J. L.; Furman, J. P.; King, F. J.; Hannum, W. H.; *Interservice Procedures for Instructional Systems Development*; Ft. Monroe, VA: U.S. Army Training and Doctrine Command, 1975.
- [Bre-05] Breuer, K.; *Berufliche Handlungskompetenz: Aspekte einer gültigen Diagnostik in der beruflichen Bildung*; in *Berufs- und Wirtschaftspädagogik (bwpap)*; (8), 2005:1–31.
- [Brü-02] Brünken, R.; Steinbacher, S.; Plass, J. L.; Leutner, D.; *Assessment of Cognitive Load in Multimedia Learning Using Dual-Task Methodology*; in *Experimental Psychology*; 49(2), 2002:109–119.
- [Brü-04] Brünken, R.; Plass, J. L.; Leutner, D.; *Assessment of Cognitive Load in Multimedia Learning with Dual-Task Methodology: Auditory Load and Modality Effects*; in *Instructional Science*; 32(1), 2004:115–132.
- [Bul-95] Bullinger, H.-J.; *Arbeitsgestaltung: Personalorientierte Gestaltung marktgerechter Arbeitssysteme*; Technologiemanagement - Wettbewerbsfähige Technologieentwicklung und Arbeitsgestaltung; Springer, Wiesbaden, 1995.
- [Bun-74] Bunk, G. P.; *Revision der kaufmännischen Berufsausbildung: Ein Beitrag zur didaktisch-methodischen Ausbildung der Ausbilder*; Vol. 5 von *Schriftenreihe moderne Berufsausbildung*; Sauer, Heidelberg, 1974.
- [Cla-11] Clark, R. C.; Lyons, C. C.; *Graphics for learning: Proven guidelines for planning, designing, and evaluating visuals in training materials*; Pfeiffer essential resources for training and HR professionals; Pfeiffer, San Francisco; 2. Edn., 2011.
- [Coc-10] Cocca, P.; Alberti, M.; *A framework to assess performance measurement systems in SMEs*; in *International Journal of Productivity and Performance Management*; 59(2), 2010:186–200.

- [Cru-92] Cruz-Neira, C.; Sandin, D.; A. Defant, T.; Kenyon, R.; Hart, J.; *The cave-audio visual experience virtual environment*; in *Communications of The ACM - CACM*, 1992.
- [Dav-70] Dave, R. H.; *Psychomotor levels*; in Armstrong, R. J. (Hrsg.), *Developing and Writing Behavioral Objectives*; Educational Innovaters Press, Tucson, Arizona, 1970; 20–21.
- [Deh-92] Dehnbostel, P. (Hrsg.); *Lernen für die Zukunft durch verstärktes Lernen am Arbeitsplatz: Dezentrale Aus- und Weiterbildungskonzepte in der Praxis*; Vol. 149 von *Berichte zur beruflichen Bildung*; BiBB, Berlin, 1992.
- [Deh-01] Dehnbostel, P.; *Perspektiven für das Lernen in der Arbeit*; in Angress, A. (Hrsg.), *Tätigsein - Lernen - Innovation*; Kompetenzentwicklung; Waxmann, Münster, 2001; 53–93.
- [Deh-07] Dehnbostel, P.; *Lernen im Prozess der Arbeit*; Vol. 7 von *Studienreihe Bildung und Wissenschaftsmanagement*; Waxmann, Münster, 2007.
- [Deu-70] Deutscher Bildungsrat; *Empfehlungen der Bildungskommission: Strukturplan für das Bildungswesen*; Dt. Bildungsrat, Bad Godesberg, 1970.
- [Die-70] Dietz, W.; Bevens, B. W.; *Learn By Doing: The Story of Training Within Industry 1940 - 1970*; Art Type Inc., Summit, New Jersey, 1970.
- [DIN15930] *DIN EN ISO 15930-1-8:2001-12: Graphic technology – Prepress digital data exchange – Use of PDF*; Beuth, 2001.
- [DIN8593] *DIN 8593-0:2003-09: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*; Beuth, 2003.
- [Dix-04] Dix, A.; *Human-computer interaction*; Pearson Prentice-Hall, Harlow; 3. Edn., 2004.
- [Doo-45] Dooley, C. R.; *The Training within Industry Report 1940-1945*; U.S. War Manpower Commission, Bureau of Training, Training Within Industry Service, Washington, D.C., 1945.
- [Dör-13] Dörner, R.; Broll, W.; Grimm, P. F.; Jung, B.; *Virtual und Augmented Reality (VR/AR): Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*; eXamen.press; Springer Vieweg, Berlin und Heidelberg, 2013.
- [Dub-09] Dubs, R.; *Lehrerverhalten: Ein Beitrag zur Interaktion von Lehrenden und Lernenden im Unterricht*; Pädagogik; Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 2009.

- [Dün-08] Dünser, A.; Grasset, R.; Billinghurst, M.; *A survey of evaluation techniques used in augmented reality studies*; in *ACM SIGGRAPH Asia 2008 courses*; ACM Press, New York, 2008; 1–27.
- [Eic-11] Eickemeyer, S. C.; Doroudian, S.; Schäfer, S.; Nyhuis, P.; *Ein generisches Prozessmodell für die Regeneration komplexer Investitionsgüter*; in *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*; 106(11), 2011:861–865.
- [Eis-74] Eisenführ, F.; Ordelleide, D.; Puck, G.; *Unternehmungsspiele in Ausbildung und Forschung*; Unternehmungsspiele; Gabler Verlag, Wiesbaden, 1974.
- [Eps-18] Epson; *Moverio BT-350*; <https://www.epson.de/products/see-through-mobile-viewer/moverio-bt-350>, 2018, letzter Zugriff: 26.11.2018.
- [ESI-19] ESI; *Harnessing the Power of AR/VR To Tackle Assembly and Maintenance Challenges in Smart Factories*; <https://www.esi-group.com/company/press/news-releases/harnessing-power-ar/vr-tackle-assembly-and-maintenance-challenges-smart-factories>, 2019, letzter Zugriff: 05.09.2019.
- [Eul-04] Euler, D.; Hahn, A.; *Wirtschaftsdidaktik*; Vol. 2525 von *UTB Wirtschaftswissenschaften, Pädagogik/Didaktik*; Haupt, Bern, 2004.
- [Eve-89] Eversheim, W.; *Organisation in der Produktionstechnik*; Studium und Praxis; VDI-Verlag, Düsseldorf; 2. Edn., 1989.
- [Fat-90] Fatzer, G.; *Ganzheitliches Lernen: Humanistische Pädagogik und Organisationsentwicklung; ein Handbuch für Lehrer, Pädagogen, Erwachsenenbildner und Organisationsberater*; Vol. 34 von *Reihe Innovative Psychotherapie und Humanwissenschaften*; Junfermann, Paderborn; 3. Edn., 1990.
- [Fei-93] Feiner, S.; Macintyre, B.; Seligmann, D.; *Knowledge-based augmented reality*; in *Communications of the ACM*; 36(7), 1993:53–62.
- [Fel-13] Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*; Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [Fel-14] Feldmann, K.; Schöppner, V.; Spur, G. (Hrsg.); *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren*; Vol. 5 von *Edition Handbuch der Fertigungstechnik*; Hanser, München; 2. Edn., 2014.
- [Fie-09] Fiege, R.; *Axiomatic Design: Eine Methode zur serviceorientierten Modellierung*; Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler, Wiesbaden; 1. Edn., 2009.

- [Fis-82] Fischer, H. P.; Merkel, H.; Walz, R.; *Projektorientierte Fachbildung im Berufsfeld Metall: Ein Gestaltungsansatz d. Lernorganisation im Werk Gaggenau d. Daimler-Benz AG*; Vol. 9 von *Modellversuche zur beruflichen Bildung*; Bundesinstitut für Berufsbildung, Berlin, 1982.
- [Fit-67] Fitts, P. M.; Posner, M. I.; *Human performance*; Brooks/Cole Publishing Company, Belmont, California, 1967.
- [Fix-89] Fix, W.; *Juniorenfirmen: Ein innovatives Konzept zur Förderung von Schlüsselqualifikationen*; Vol. 29 von *Ausbildung, Fortbildung, Personalentwicklung*; Schmidt, Berlin, 1989.
- [Fle-96] Flechsig, K.-H.; *Kleines Handbuch didaktischer Modelle*; Neuland - Verlag für lebendiges Lernen, Eichenzell, 1996.
- [Fra-15] Frank, G.; *Durchgängiges mechatronisches Engineering für Sondermaschinen*; Dissertation; Universität Stuttgart; Stuttgart, 2015.
- [Fre-12] Frey, K.; Schäfer, U.; *Die Projektmethode: "der Weg zum bildenden Tun"*; Pädagogik; Beltz, Weinheim; 12. Edn., 2012.
- [Fry-60] Fry, E.; *Teaching Machine Dichotomy: Skinner vs. Pressey*; in *Psychological Reports*; 6(1), 1960:11–14.
- [Gar-18] Garten, M.; *Schulung oder Training*; <https://www.smavicon.de/schulung-oder-training-mit-powerpoint-was-ist-eigentlich-der-unterschied/>, 2016, letzter Zugriff: 26.11.2018.
- [Gau-15] Gausemeier, P.; Seidel, J.; Riedelsheimer, T.; Seliger, G.; *Pathways for Sustainable Technology Development – The Case of Bicycle Mobility in Berlin*; in *Procedia CIRP*; 26, 2015:202–207.
- [Ges-08] Gessler, M.; Stübe, B. A.; *Diversity-Management: Berufliche Weiterbildung im demografischen Wandel*; Waxmann, Münster, 2008.
- [Gig-99] Gigerenzer, G.; Todd, P. M.; *Simple heuristics that make us smart*; Evolution and cognition; Oxford University Press, New York, 1999.
- [Goo-18] Google Glass; *Enterprise Edition*; <https://oculavis.de/hardware/google-glass-enterprise-edition/>, 2018, letzter Zugriff: 26.11.2018.

- [Gre-01] de Greiff, M.; *Die Prognose von Lernkurven in der manuellen Montage unter besonderer Berücksichtigung der Lernkurven von Grundbewegungen*; Dissertation; Universität Gesamthochschule Düsseldorf; Düsseldorf, 2001.
- [Gri-12] Grismajer, M.; Seliger, G.; *Information Requirements for Motivated Alignment of Manufacturing Operations to Energy Availability*; in *Procedia CIRP*; 3, 2012:418–423.
- [Gus-16] Gust, D.; *m-ISD: Die Integration des itI- Medienkonzepts in das Informations- Struktur- Design (ISD)*; in *[i]m Fokus Das Fachmagazin von itI*; 2(23), 2016.
- [Hab-11] Habedank, S.; *Didaktik und Methodik: Worin liegt der Unterschied?*; in *Direkt!*; (1), 2011:1.
- [Hac-78] Hacker, W.; *Allgemeine Arbeits- und Ingenieurpsychologie: Psychische Struktur und Regulation von Arbeitstätigkeiten*; Vol. 20 von *Schriften zur Arbeitspsychologie*; Huber, Bern; 2. Edn., 1978.
- [Hac-93] Hacker, W.; Skell, W. (Hrsg.); *Lernen in der Arbeit*; Bundesinstitut für Berufsbildung, Berlin, 1993.
- [Hal-18] Halata, P. S.; *Augmented-Reality-gestützte Informationsbereitstellung für die Unikatproduktion*; Dissertation; Technische Universität Hamburg-Harburg; Hamburg, 2018.
- [Ham-14a] Hampe, J.; Schlegel, C. (Hrsg.); *Auswahl und Steuerung nachhaltiger Weiterbildung im Unternehmen*; Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2014.
- [Ham-14b] Hampe, J.; Schlegel, C.; *Komplexe Themen erfordern andere Methoden*; in Hampe, J.; Schlegel, C. (Hrsg.), *Auswahl und Steuerung nachhaltiger Weiterbildung im Unternehmen*; Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2014; 7–38.
- [Han-15] Han, P.; Zhao, G.; *CAD-based 3D objects recognition in monocular images for mobile augmented reality*; in *Computers & Graphics*; 50, 2015:36–46.
- [Hei-15] Heinig, M.; *Nutzung von Virtuellen Technologien für die Montageplanung von Unikaten*; Dissertation; Technische Universität Hamburg-Harburg; Hamburg, 2015.
- [Her-14] Herzig, B.; *Wie wirksam sind digitale Medien im Unterricht?*; Bertelsmann, Gütersloh, 2014.
- [Heu-13] Heuer, H.; *Fertigkeit*; in Wirtz, M. A. (Hrsg.), *Dorsch Lexikon der Psychologie*; Verlag Hans Huber, 2013; 364.

- [Hey-14] Heyer, S.; Nishino, N.; Muschard, B.; Seliger, G.; *Enabling of local Value Creation via Openness for Emergent Synthesis: Enabling of local value creation via openness for emergent synthesis*; in *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*; Vol. 15, 2014; 1489–1493.
- [Hof-12] Hofmann, E.; Maucher, D.; Hornstein, J.; *Investitionsgütereinkauf: Erfolgreiches Beschaffungsmanagement komplexer Leistungen*; Vol. 2 von *Advanced Purchasing & SCM*; Springer Berlin Heidelberg, Berlin Heidelberg, 2012.
- [Hon-92] Honey, P.; Mumford, A.; *The manual of learning styles*; Ardingly House, Maidenhead, Angleterre, 1992.
- [Hop-73] Hopf, B.; *Bürosimulation im Rahmen der kaufmännischen Grundbildung*; Vol. 9 von *Schriften zur Berufsbildungsforschung*; Jänecke, Hannover, 1973.
- [Höp-83] Höpfner, H.-D.; *Untersuchungen zum Einsatz heuristischer Regeln beim Üben im berufspraktischen Unterricht*; in *Forschung der sozialistischen Berufsbildung*; 17(1), 1983:28–33.
- [Höp-91] Höpfner, H.-D.; *Entwicklung selbständigen Handelns in der beruflichen Aus- und Weiterbildung: Ein auf der Theorie der Handlungsregulation begründetes didaktisches Modell*; in *Berichte zur beruflichen Bildung*; (142), 1991.
- [Hou-13] Hou, L.; Wang, X.; *A study on the benefits of augmented reality in retaining working memory in assembly tasks: A focus on differences in gender*; in *Automation in Construction*; 32, 2013:38–45.
- [Hro-09] Hron, A.; Friedrich, H. F.; *Netzbasierte Kommunikation und Kooperation im Unterricht*; in Arnold, K.-H.; Sandfuchs, U.; Wiechmann, J. (Hrsg.), *Handbuch Unterricht*; utb-studie-book; Klinkhardt, Bad Heilbrunn, 2009; 432–436.
- [IG -15] IG Metall; *Entgelttarifvertrag für Arbeitnehmer in den Elektrohandwerken der Länder Berlin und Brandenburg*; Berlin, Brandenburg, 2015.
- [Int-03] International Learning Technology Center ILTEC; *Der Einsatz von Wissensmanagement im Unternehmen: Ein Leitfaden*; iltec illustrating technology, München, 2003.
- [Int-04] Internationales Arbeitsamt; *Entwicklung und Ausbildung der Humanressourcen*; Vol. 92 von *Internationale Arbeitskonferenz*; Genf; 1. Edn., 2004.
- [ISO10209] *DIN EN ISO 10209:2012-11: Technische Produktdokumentation - Vokabular - Begriffe für technische Zeichnungen, Produktdefinition und verwandte Dokumentation*; Beuth, 2012.

- [Jae-04] Jaeger, B.; *Humankapital und Unternehmenskultur: Ordnungspolitik für Unternehmen*; Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden, 2004.
- [Jam-11] Jamil, C. M.; Rapiah, M.; *Performance Measurement System (PMS) In Small Medium Enterprises (SMES): A Practical Modified Framework*; in *World Journal of Social Sciences*; 1, 2011.
- [Jes-13] Jeske, T.; *Entwicklung einer Methode zur Prognose der Anlernzeit sensumotorischer Tätigkeiten*; Dissertation; RWTH Aachen; Aachen, 2013.
- [Jes-14] Jeske, T.; Meyer, F.; Schlick, C. M.; *Einfluss der Gestaltung von Arbeitsplänen auf die Anlernzeit sensumotorischer Tätigkeiten*; in *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*; 68(1), 2014:1–6.
- [Joh-16] Johnson, L.; Adams Becker, S.; Cummins, M.; Estrada, V.; Freeman, A.; Hall, C.; *NMC Horizon Report: 2016 Higher Education Edition*; The New Media Consortium, Austin, Texas, 2016.
- [Jov-17] Jovane, F.; Seliger, G.; Stock, T.; *Competitive Sustainable Globalization General Considerations and Perspectives*; in *Procedia Manufacturing*; 8, 2017:1–19.
- [Jun-08] Jungbluth, R.; *Die 11 Geheimnisse des IKEA-Erfolgs*; Bastei Lübbe, Bergisch Gladbach; 1. Edn., 2008.
- [Kai-83] Kaiser, F.-J. (Hrsg.); *Die Fallstudie: Theorie und Praxis der Fallstudiendidaktik*; Vol. 6 von *Forschen und Lernen*; Klinkhardt, Bad Heilbrunn, 1983.
- [Kau-16] Kauffeld, S.; *Nachhaltige Personalentwicklung und Weiterbildung: Betriebliche Seminare und Trainings entwickeln, Erfolge messen, Transfer sichern*; Springer, Berlin/Heidelberg; 2. Edn., 2016.
- [Kin-07] Kinkel, S.; Som, O.; *Wie deutsche Maschinenbauer ihren Innovationserfolg sichern*; in *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*; 102(9), 2007:572–578.
- [Kis-15] Kistner, M.; Schneider, S.; *Einsatz von Hypervideos als Produktions- und Serviceunterstützung*; tcworld conference; Stuttgart, 2015.
- [Kli-02] Klippert, H.; *Planspiele: Spielvorlagen zum sozialen, politischen und methodischen Lernen in Gruppen; 10 komplette Planspiele*; Beltz Praxis; Beltz, Weinheim; 4. Edn., 2002.
- [Koc-91] Koch, J.; Selka, R.; *Leittexte - ein Weg zu selbständigem Lernen*; Seminarkonzepte zur Ausbilderförderung; Bundesinstitut für Berufsbildung, Berlin; 2. Edn., 1991.

- [Kol-71] Kolb, D. A.; Rubin, I. M.; McIntyre, J. M.; *Organizational Psychology an experiential approach*; Prentice-Hall, New Jersey, 1971.
- [Kol-81] Kolb, D. A.; *Learning Styles and Disciplinary Differences*; The Jossey-Bass series in higher education; Jossey-Bass, San Fransisco, California; 1. Edn., 1981.
- [Kol-09] Kolwe, D.; *3D-Inhalte in PDF-Dokumenten: Visualisierung und Interaktion*; Diplomarbeit; Fachhochschule Friedberg; Friedberg, 2009.
- [Kra-64] Krathwohl, D. R.; Bloom, B. S.; Masia, B. B.; *Taxonomy of Educational Objectives, the Classification of Educational Goals: Handbook II: Affective Domain*; David McKay Co., Inc., New York, 1964.
- [Kra-02] Krathwohl, D. R.; *A Revision of Bloom's Taxonomy: An Overview*; in *Theory into practice*; 41(4), 2002:213–218.
- [Kre-10] van Krevelen, D. W. F.; Poelman, R.; *A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations*; in *International Journal of Virtual Reality*; 9(2), 2010:1–20.
- [Küh-16] Kühl, E.; *Kein Spielzeug für die Massen*; in *Zeit Online*; Januar, 2016:1–4.
- [Kum-08] Kumar, P.; Ziegler, A.; Ziegler, J.; Uchanska-Ziegler, B.; Ziegler, A.; *Grasping molecular structures through publication-integrated 3D models*; in *Trends in Biochemical Sciences*; Vol. 33, 2008; 408–412.
- [Lan-11] Langer, I.; Schulz von Thun, F.; Tausch, R.; *Sich verständlich ausdrücken*; Reinhardt, München; 9. Edn., 2011.
- [LaV-00] LaViola, J. J.; *A discussion of cybersickness in virtual environments*; in *ACM SIGCHI Bulletin*; 32(1), 2000:47–56.
- [Lee-06] Lee, D. G.; Suh, N. P.; *Axiomatic Design and Fabrication of Composite Structures: Applications in Robots, Machine Tools and Automobiles*; Oxford series on advanced manufacturing; Oxford University Press, New York und Oxford, 2006.
- [Leh-14] Lehner, F.; *Wissensmanagement: Grundlagen, Methoden und technische Unterstützung*; Hanser, München; 5. Edn., 2014.
- [Lew-17] Lewrick, M.; Link, P.; Leifer, L. (Hrsg.); *Das Design Thinking Playbook: Mit traditionellen, aktuellen und zukünftigen Erfolgsfaktoren*; Verlag Franz Vahlen, München, 2017.
- [Löf-08] Löffelholz, M.; *Whitepaper Nr. 1, Wissensvermittlung mit dem Utility Film*; Weilheim, 2008.

- [Lot-94] Lotter, B.; Schilling, W.; *Manuelle Montage: Planung - Rationalisierung - Wirtschaftlichkeit*; VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994.
- [Lot-12] Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.; *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*; VDI-Buch; Springer, Berlin; 2. Edn., 2012.
- [Mak-13] Makris, S.; Pintzos, G.; Rentzos, L.; Chryssolouris, G.; *Assembly support using AR technology based on automatic sequence generation*; in *CIRP Annals*; 62(1), 2013:9–12.
- [MAN-19] MAN Energy Solutions; *Turbomachinery: Product range and product centres*; Oberhausen, 2019.
- [McA-07] McAdam, R.; Mason, B.; McCrory, J.; *Exploring the dichotomies within the tacit knowledge literature: towards a process of tacit knowing in organizations*; in *Journal of Knowledge Management*; 11(2), 2007:43–59.
- [McF-13] McFarland, R.; Reise, C.; Postawa, A.; Seliger, G.; *Learnstruments in value creation and learning centered work place design*; in *11th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, 2013.
- [McF-14] McFarland, R.; *Learnstruments: Lern- und Arbeitsmittel für die Montage*; in *FUTUR*; (1), 2014:22–23.
- [McK-14] McKinsey & Company VDMA (Hrsg.); *The future of German mechanical engineering: Operating successfully in a dynamic environment*; Berlin [u.a.], 2014.
- [Meh-15] Mehl, K.; Fischer, E.; *Informationen visualisieren: Lassen Sie Bilder sprechen!*; tcworld conference; Stuttgart, 2015.
- [Men-15] Menn, J. P.; Müller, B. C.; Seliger, G.; Ulbrich, C.; *Generic model for international assembly instructions for special machinery assembly*; in *Proceedings Annual SEFI Conferences*; Vol. 43, 2015; 1–8.
- [Men-16] Menn, J. P.; Seliger, G.; *Increasing Knowledge and Skills for Assembly Processes through Interactive 3D-PDFs*; in *Procedia CIRP*; 48, 2016:454–459.
- [Men-17] Menn, J. P.; Duc, B. M.; Müller, B. C.; Seliger, G.; *Language independent transfer of assembly knowledge*; in *Procedia Manufacturing*; 8, 2017:495–502.
- [Men-18a] Menn, J. P.; Muschard, B.; Schumacher, B.; Sieckmann, F.; Kohl, H.; Seliger, G.; *Learnstruments: Learning-conducive artefacts to foster learning productivity in production engineering*; in *CIRP Annals*; 67(1), 2018:459–462.

- [Men-18b] Menn, J. P.; Sieckmann, F.; Kohl, H.; Seliger, G.; *Learning process planning for special machinery assembly*; in *Procedia Manufacturing*; 23, 2018:75–80.
- [Men-18c] Menn, J. P.; Ulbrich, C.; Seliger, G.; *First proof of concept for language independent learnstruments in special machinery assembly*; in *Procedia Manufacturing*; 21, 2018:454–461.
- [Men-19] Menn, J. P.; Ulbrich, C.; *MAN Learning Factory at MAN Diesel & Turbo SE in Berlin, Germany*; in Abele, E.; Metternich, J.; Tisch, M. (Hrsg.), *Learning factories*; Springer Nature, Cham, Switzerland, 2019; 416–419.
- [Men-20] Menn, J. P.; Severengiz, M.; Lorenz, A.; Wassermann, J.; Ulbrich, C.; Krüger, J.; Seliger, G.; *Augmented Learning for Industrial Education*; in *International Journal of Sustainable Manufacturing*; (4), 2020.
- [Mey-10] Meyer, H.; *Unterrichtsmethoden*; Cornelsen Scriptor, Berlin; 15. Edn., 2010.
- [Mic-18] Microsoft; *HoloLens*; <https://www.microsoft.com/en-us/hololens>, 2018, letzter Zugriff: 26.11.2018.
- [Mil-94] Milgram, P.; *A taxonomy of mixed reality visual displays*; in *IEICE Transactions on Information Systems*; Vol. 12, 1994; 1–15.
- [Möl-06] Möller, H.; *Die Lernstilanalyse nach Kolb und ihre Konsequenzen für die Hochschul- und Schuldidaktik und die berufliche Aus- und Weiterbildung*; in Heidi Möller (Hrsg.), *Bildung schafft Zukunft*; Vol. 1; Univ. Press, Innsbruck, 2006; 88–94.
- [Mor-11] Morrison, G. R.; *Designing effective instruction*; Wiley, Hoboken, New Jersey; 6. Edn., 2011.
- [Mül-15] Müller, B. C.; Reise, C.; Seliger, G.; *Gamification in Factory Management Education – A Case Study with Lego Mindstorms*; in *Procedia CIRP*; 26, 2015:121–126.
- [Mül-16a] Müller, B. C.; Nguyen, T. D.; Dang, Q.-V.; Duc, B. M.; Seliger, G.; Krüger, J.; Kohl, H.; *Motion Tracking Applied in Assembly for Worker Training in different Locations*; in *Procedia CIRP*; 48, 2016:460–465.
- [Mül-16b] 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, 2016:353–358.
- [Mül-17] Müller, B.; Seliger, G.; Kühn, M.; Schele, M.; *Mobile Lernumgebung zur simulativen Gestaltung von Produktionssystemen*; in *Simulation in Produktion und Logistik*, 2017:345–354.

- [Mus-15] Muschard, B.; Seliger, G.; *Realization of a Learning Environment to Promote Sustainable Value Creation in Areas with Insufficient Infrastructure*; in *Procedia CIRP*; 32, 2015:70–75.
- [Nae-18] Naefe, P.; *Methodisches Konstruieren: Auf den Punkt gebracht*; Springer Vieweg, Wiesbaden; 3. Edn., 2018.
- [Naw-13] Nawatzki, J.; *Mit Selbstcoaching zum Traumjob: Wie Sie in fünf Schritten Ihre wahre Berufung entdecken und umsetzen*; Springer, Dordrecht, 2013.
- [Neg-15] Neges, M.; Wolf, M.; Abramovici, M.; *Secure Access Augmented Reality Solution for Mobile Maintenance Support Utilizing Condition-Oriented Work Instructions*; in *Procedia CIRP*; 38, 2015:58–62.
- [Neg-18] Neges, M.; Adwernat, S.; Abramovici, M.; *Augmented Virtuality for maintenance training simulation under various stress conditions*; in *Procedia Manufacturing*; 19, 2018:171–178.
- [Ngu-15] Nguyen, T. D.; McFarland, R.; Kleinsorge, M.; Krüger, J.; Seliger, G.; *Adaptive Qualification and Assistance Modules for Manual Assembly Workplaces*; in *Procedia CIRP*; 26, 2015:115–120.
- [Nie-08] Niegemann, H. M.; Domagk, S.; Hessel, S.; Hein, A.; Hupfer, M.; Zobel, A.; *Kompendium Multimediales Lernen*; X.media.press; Springer, Berlin, 2008.
- [Nof-97] Nof, S. Y.; Wilhelm, W. E.; Warnecke, H.-J.; *Industrial Assembly*; Springer US, Boston, Massachusetts, 1997.
- [Non-92] Nonaka, I.; *Wie japanische Konzerne Wissen erzeugen*; in *Harvard Business Manager*; Vol. 2, 1992.
- [Non-12] Nonaka, I.; Takeuchi, H.; *Die Organisation des Wissens: Wie japanische Unternehmen eine brachliegende Ressource nutzbar machen*; Campus, Frankfurt am Main [u.a.]; 2. Edn., 2012.
- [Nor-98] North, K.; *Wissensorientierte Unternehmensführung: Wertschöpfung durch Wissen*; Gabler Verlag, Wiesbaden, 1998.
- [Nor-18] North, K.; Maier, R.; *Wissen 4.0 – Wissensmanagement im digitalen Wandel*; in *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*; 55(4), 2018:665–681.
- [ODG-18] ODG; *R7 HL*; <https://oculavis.de/hardware/odg-r7-h1/>, 2018, letzter Zugriff: 26.11.2018.

- [Osm-18] Osmers, N.; Rühmann, L. M.; *Augmentierte und virtuelle Realität im Fokus auf Lernen und Training in deutschsprachigen Unternehmen: Abschlussreport Interviewstudie*; TU Clausthal, Clausthal, 2018.
- [Pal-69] Palme, K.; *Untersuchung von Arbeitsunterweisungsmethoden an produktiven Arbeitsplätzen anhand von Beispielen aus Betrieben der verarbeitenden Industrie*; Vol. 9 von *Schriftenreihe Arbeitswissenschaft und Praxis*; Beuth, Berlin, 1969.
- [Pal-17] Palacios Neffke, J.; *Contribution to the development of technology-enhanced education in manufacturing and energy generation*; Dissertation; TU Berlin; Berlin, 2017.
- [Pal-18] Palmarini, R.; Erkoyuncu, J. A.; Roy, R.; Torabmostaedi, H.; *A systematic review of augmented reality applications in maintenance*; in *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*; 49, 2018:215–228.
- [Pap-18] Pape, H.-C.; Kurtz, A.; Silbernagl, S.; *Physiologie*; Thieme, Stuttgart; 8. Edn., 2018.
- [Pät-93] Pätzold, G.; *Lehrmethoden in der beruflichen Bildung*; Vol. 15 von *Schriftenreihe moderne Berufsbildung*; Sauer, Heidelberg, 1993.
- [Por-17] Porter, M. E.; Heppelmann, J. E.; *Why every organization needs an Augmented Reality strategy*; in *Harvard Business Review*; 2017(6), 2017:47–57.
- [Pos-11] Postawa, A. B.; Kleinsorge, M.; Krüger, J.; Seliger, G.; Seliger, G.; Khraisheh, M. M. K.; Jawahir, I. S.; *Automated Image Based Recognition of Manual Work Steps in the Remanufacturing of Alternators*; Springer, Dordrecht, 2011.
- [Pos-13] Postawa, A. B.; *Werker- Assistenz und- Qualifizierung für manuelle (De-) Montage durch bild- und schriftgestützte Visualisierung am Arbeitsplatz*; Dissertation; Technische Universität Berlin; Berlin, 2013.
- [Pös-16] Pöschl, S.; Helbig T.; Jacobi, H.-F., Bauernhansl, T.; *Aktuelle Forschungsansätze für den Sondermaschinenbau: Gegenstandsbereich, Definition und Forschungsergebnisse*; in *wt Werkstatttechnik online*; 106(11/12), 2016:851–856.
- [Pöt-15] Pötzsch, O.; Rößger, F.; *Bevölkerung Deutschlands bis 2060: 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung*; Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2015.
- [Pso-88] Psotka, J.; Massey, L. D.; Mutter, S. A. (Hrsg.); *Intelligent tutoring systems: Lessons learned*; Lawrence Erlbaum, Hillsdale, N.J., 1988.
- [Rad-14] Radu, I.; *Augmented reality in education: a meta-review and cross-media analysis*; in *Personal and Ubiquitous Computing*; 18(6), 2014:1533–1543.

- [Rad-15] Radkowski, R.; Herrema, J.; Oliver, J.; *Augmented Reality-Based Manual Assembly Support With Visual Features for Different Degrees of Difficulty*; in *International Journal of Human-Computer Interaction*; 31(5), 2015:337–349.
- [Rea-18] Realwear; *Realwear HMT-1*; <https://www.realwear.com/products/hmt-1>, 2018, letzter Zugriff: 26.11.2018.
- [REF-76] REFA - Verband für Arbeitsstudien; *Arbeitsunterweisung*; Vol. 6 von *Methodenlehre des Arbeitsstudiums*; Hanser, München; 2. Edn., 1976.
- [REF-91] REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation; *Methodenlehre der Betriebsorganisation*; Hanser, München und Wien; 3. Edn., 1991.
- [REF-15] REFA - Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung; *Industrial Engineering: Standardmethoden zur Produktivitätssteigerung und Prozessoptimierung*; REFA-Fachbuchreihe Unternehmensentwicklung; Hanser, München; 2. Edn., 2015.
- [Rei-80] Reinisch, H.; *Planspiel und wissenschaftspropädeutisches Lernen: Zugl.: Hamburg, Univ., Fachbereich Erziehungswiss., Diss., 1978 u. d. T.: Das Planspiel als Medium wissenschaftspropädeutischer Lernprozesse*; Vol. 14 von *Hochschuldidaktische Forschungsberichte*; Arbeitsgemeinschaft für Hochschuldidaktik, Hamburg, 1980.
- [Rei-06] Reinmann-Rothmeier, G.; Manl, H.; *Unterrichten und Lernumgebungen gestalten*; in Krapp, A.; Prenzel, M., Weidenmann, B (Hrsg.), *Pädagogische Psychologie: Ein Lehrbuch*; Weinheim: Beltz, 2006; 613–658.
- [Rey-07] Rey, G. D.; *Lernen mit Multimedia. Die Gestaltung interaktiver Animationen: Learning with multimedia. Designing interactive animations*; Dissertation; Universität Trier; Trier, 2007.
- [Rie-11] Riedl, A.; *Didaktik der beruflichen Bildung*; Pädagogik; Steiner, Stuttgart; 2. Edn., 2011.
- [Rie-13] Riedl, A.; Schelten, A.; *Grundbegriffe der Pädagogik und Didaktik beruflicher Bildung*; Pädagogik; Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 2013.
- [Roe-17] Roeder, I.; Wang, W. M.; Muschard, B.; *Inducing Behavioural Change in Society Through Communication and Education in Sustainable Manufacturing*; in Stark, R.; Seliger, G.; Bonvoisin, J. (Hrsg.), *Sustainable Manufacturing*; Vol. 23 von *Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management*; Springer International Publishing, Cham, 2017; 255–276.

- [Roh-74] Rohmert, W.; *Das Anlernen sensumotorischer Fertigkeiten: Erarbeitet im Institut für Arbeitswissenschaft an der TH Darmstadt*; 7; 2. Edn., 1974.
- [Rot-71] Roth, H.; *Pädagogische Anthropologie*; Schroedel, Hannover, 1971.
- [Rot-92] Rottluff, J.; *Selbständig lernen: Arbeiten mit Leittexten*; Beltz Weiterbildung; Beltz, Weinheim, 1992.
- [Ruf-06] Ruf, M.; *Zur Funktion der Übungsfirma im Rahmen der vollzeitschulischen Berufsausbildung am baden-württembergischen Berufskolleg: Integrierte Unternehmenssoftware als didaktische Herausforderung*; Dissertation; Universität Konstanz; Konstanz, 2006.
- [Sat-14] Sato, M.; Fujinami, K.; *Nonoverlapped view management for augmented reality by tabletop projection*; in *Journal of Visual Languages & Computing*; 25(6), 2014:891–902.
- [Sch-77] Schimke, E.; Hoeschen, R.; *Auswahl der geeigneten Organisationsform in der Montage fuer Unternehmen der Einzel- und Serienfertigung*; in *Technisches Zentralblatt für praktische Metallbearbeitung*; (71), 1977:136–142.
- [Sch-87] Scharringhausen, H.; Schelten, A.; *Simulatives Lernen in der Schiffsführung*; in *Zeitschrift für Berufs- und Wirtschaftspädagogik*; 83(8), 1987:712–718.
- [Sch-95] Schelten, A.; *Grundlagen der Arbeitspädagogik*; Steiner, Stuttgart; 3., neubearb. und erw. Aufl. Edn., 1995.
- [Sch-96] Schneider, U. (Hrsg.); *Wissensmanagement: Die Aktivierung des intellektuellen Kapitals*; Edition Blickbuch Wirtschaft; Frankfurter Allg. Zeitung, Frankfurt am Main, 1996.
- [Sch-02] Schulmeister, R.; *Taxonomie der Interaktivität von Multimedia: Ein Beitrag zur aktuellen Metadaten-Diskussion*; in *it + ti*; 4, 2002:193–199.
- [Sch-05] Schelten, A.; *Grundlagen der Arbeitspädagogik*; Pädagogik; Steiner, Stuttgart; 4. Edn., 2005.
- [Sch-08a] Schilling, T.; *Augmented Reality in der Produktentstehung*; Dissertation; Technische Universität Ilmenau; Ilmenau, 2008.
- [Sch-08b] Schröder, T.; *Neue Wege durch die virtuelle Welt*; in Wirsing, B. (Hrsg.), *Max-Planck-Forschung*; Vol. 01; München, 2008; 51–59.
- [Sch-10a] Schilke, M.; *Einsatz von Produktdatenmanagement-Systemen im Sondermaschinenbau für die Automobilindustrie*; Dissertation; Prozessintegration des Target; Saarbrücken, 2010.

- [Sch-10b] Schlick, C. M.; Bruder, Ralph, Luczak, Holger; *Arbeitswissenschaft*; Springer, Heidelberg; 3. Edn., 2010.
- [Sch-11] Schreiber, W.; Zimmermann, P.; *Virtuelle Techniken im industriellen Umfeld: Das AVILUS-Projekt; Technologien und Anwendungen*; Springer-Verlag; 1. Edn., 2011.
- [Sch-15a] Schenk, M. (Hrsg.); *Produktion und Logistik mit Zukunft: Digital Engineering and Operation*; VDI-Buch; Springer Vieweg, Berlin/Heidelberg, 2015.
- [Sch-15b] Schmolz, C.; *So entsteht ein Utility-Film*; tcworld conference; Stuttgart, 2015.
- [Sch-18] Schlick, C.; Bruder, R.; Luczak, H.; Abendroth, B.; Bier, L.; Biermann, H.; *Arbeitswissenschaft*; Springer, Berlin; 4. Edn., 2018.
- [Sel-83] Seliger, G.; *Wirtschaftliche Planung automatisierter Fertigungssysteme*; Dissertation; Technische Universität Berlin; Berlin, 1983.
- [Sel-07] Seliger, G.; *Montage und Demontage*; in Feldhusen, J. (Hrsg.), *Dubbel*; Springer-Verlag, 2007; 88–94.
- [Sel-08] Seliger, G.; *Sustainable value creation nets*; in Mok, H.-S.; Kang, H.-Y.; Seliger, G.; Skerlos, S.; Nasr, N. (Hrsg.), *Proceedings of the Global Conference on Sustainable Product Development and Life Cycle Engineering*, 2008; 2–7.
- [Sel-09] Seliger, G.; Reise, C.; McFarland, R.; *Outcome-oriented Learning Environment for Sustainable Engineering Education*; in Shunmugam, M. S.; Ramesh Babu, N. (Hrsg.), *Proceedings of the 7th Global Conference on Sustainable Manufacturing*; Vol. 7; Indian Institute of Technology, Madras, 2009; 91–98.
- [Sel-12a] Seliger, G. (Hrsg.); *Sustainable Manufacturing*; Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [Sel-12b] Seliger, G.; *Zukunftsfähig produzieren weltweit: Mitteilungen aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin*; in *FUTUR*; 14(02), 2012:20–23.
- [Sen-15] Senderek, R.; Geisler, K.; *Assistenzsysteme zur Lernunterstützung in der Industrie 4.0*; in *Proceedings of DeLFI Workshop 2015 co located with 13th e- Learning Conference of the German Computer Society*, 2015; 36–46.
- [Sev-15] Severengiz, M.; Seidel, J.; Steingrímsson, J. G.; Seliger, G.; *Enhancing Technological Innovation with the Implementation of a Sustainable Manufacturing Community*; in *Procedia CIRP*; 26, 2015:52–57.

- [Sey-60] Seymour, W. D.; *Verkürzung der Anlernzeit*; Vol. 4 von *Fortschrittliche Betriebsführung: Sonderheft*; Beuth, Darmstadt, 1960.
- [Sey-66] Seymour, W. D.; *Industrial skills*; Sir Isaac Pitman and Sons Ltd., London, 1966.
- [Sey-68] Seymour, W. D.; *Skills Analysis Training: a handbook for managers, supervisors and instructors*; Sir Isaac Pitman and Sons Ltd., London, 1968.
- [Shn-17] Shneiderman, B.; Plaisant, C.; Cohen, M.; Jacobs, S. M.; Elmqvist, N.; *Designing the user interface: Strategies for effective human-computer interaction*; Pearson, Boston und Mexiko; 6. Edn., 2017.
- [Sim-72] Simpson, E. J.; *The Classification of Educational Objectives in the Psychomotor Domain*; Gryphon House, Washington DC, 1972.
- [Sno-07] Snowden, D. J.; Boone, M. E.; *A leader's framework for decision making. A leader's framework for decision making*; in *Harvard Business Review*; 85(11), 2007:68–76, 149.
- [Son-93] Sonntag, K.; *Kognitive Trainingsverfahren in der Berufsbildung*; in *Schriftenreihe Moderne Berufsbildung*; 14, 1993:47–68.
- [Spi-94] Spinner, H. F.; *Die Wissensordnung: Ein Leitkonzept für die dritte Grundordnung des Informationszeitalters*; Vol. 1 von *Studien zur Wissensordnung*; VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 1994.
- [Spu-86] Spur, G.; Stöferle, T.; *Fügen, Handhaben und Montieren*; Vol. 5 von *Handbuch der Fertigungstechnik*; Hanser, München, 1986.
- [Sta-17] Statistisches Bundesamt (Destatis); *Berufliche Weiterbildung in Unternehmen - 2015: Fünfte Europäische Erhebung über die berufliche Weiterbildung in Unternehmen (CVTS5)*; Wiesbaden, 2017.
- [Ste-92] Steuer, J.; *Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence*; in *Journal of Communication*; 42(4), 1992:73–93.
- [Sto-16] Stock, T.; Seliger, G.; *Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0*; in *Procedia CIRP*; 40, 2016:536–541.
- [Sto-19] Stork, A.; *Virtual training for new operational procedures in the production plant (Vistra)*; <https://www.igd.fraunhofer.de/projekte/vistra>, 2014, letzter Zugriff: 03.09.2019.
- [Suh-98] Suh, N. P.; *Axiomatic Design Theory for Systems*; in *Research in Engineering Design*; 10, 1998:189–209.

- [Sut-64] Sutherland, I. E.; *Sketch pad a man-machine graphical communication system*; in *Proceedings of the SHARE design automation workshop on - DAC '64*; ACM Press, New York, 1964; 6.329–6.346.
- [Sut-68] Sutherland, I. E.; *A head-mounted three dimensional display*; in *Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I on - AFIPS '68 (Fall, part I)*; ACM Press, New York, 1968; 757.
- [Swe-94] Sweller, J.; Chandler, P.; *Why Some Material Is Difficult to Learn*; in *Cognition and Instruction*; 12(3), 1994:185–233.
- [Swe-98] Sweller, J.; van Merriënboer, J. J. G.; Paas, F. G. W. C.; *Cognitive Architecture and Instructional Design*; in *Educational Psychology Review*; 10(3), 1998:251–296.
- [Swe-05] Sweller, J.; *Implications of Cognitive Load Theory for Multimedia Learning*; in Mayer, R. E. (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning*; University of Cambridge, New York, 2005; 19–30.
- [Syb-15] Syberfeldt, A.; Danielsson, O.; Holm, M.; Wang, L.; *Visual Assembling Guidance Using Augmented Reality*; in *Procedia Manufacturing*; 1, 2015:98–109.
- [Tan-03] Tang, A.; Owen, C.; Bioacca, F.; Mou, W.; *Comparative Effectiveness of Augmented Reality in Object Assembly*; in *CHI 2003: New Horizons*; Vol. New Techniques for Presenting Instructions and Transcripts, 2003; 73–80.
- [Tat-17] Tatić, D.; Tešić, B.; *The application of augmented reality technologies for the improvement of occupational safety in an industrial environment*; in *Computers in Industry*; 85(Supplement C), 2017:1–10.
- [Thi-16] Thiagarajan, S.; van den Bergh, S.; *Interaktive Trainingsmethoden: Thiagis Aktivitäten für berufliches, interkulturelles und politisches Lernen in Gruppen*; Wochenschau-Verlag, Schwalbach; 3. Edn., 2016.
- [Tip-18] Tippelt, R.; von Hippel, A.; *Handbuch Erwachsenenbildung/Weiterbildung*; Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2018.
- [Tis-13] 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, 2013:580–585.
- [Tu-11] Tu, Y.; Dean, P.; *One-of-a-Kind Production*; Springer-Verlag London Limited, London, 2011.

- [Tuk-77] Tukey, J. W.; *Exploratory data analysis*; Addison-Wesley series in behavioral science; Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1977.
- [Tve-84] Tversky, B.; Hemenway, K.; *Objects, parts, and categories*; in *Journal of Experimental Psychology: General*; 113(2), 1984:169–193.
- [Ueb-15] Uebernicketel, F.; Brenner, W.; Pukall, B.; Naef, T.; Schindlholzer, B.; *Design Thinking: Das Handbuch*; Frankfurter Allgemeine Buch, Frankfurt am Main; 1. Edn., 2015.
- [Van-11] VanLehn, K.; *The Relative Effectiveness of Human Tutoring, Intelligent Tutoring Systems, and Other Tutoring Systems*; in *Educational Psychologist*; 46(4), 2011:197–221.
- [VDI2221] VDI 2221: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*; Beuth, 1993.
- [VDI2815] VDI 2815: *Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung - Einführung, Grundlagen*; Beuth, 1978.
- [VDI2860] VDI 2860: *Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*; Beuth, 1990.
- [Vuz-18] Vuzix; *M300*; <https://www.vuzix.com/products/m300-smart-glasses>, 2018, letzter Zugriff: 26.11.2018.
- [Wal-07] Walch, D.; *Der Einsatz moderner Virtual und Augmented Reality Technologie zur Schulung von Mitarbeitern*; München, 2007.
- [Wan-16] Wang, X.; Ong, S. K.; Nee, A. Y. C.; *A comprehensive survey of augmented reality assembly research*; in *Advances in Manufacturing*; 4(1), 2016:1–22.
- [Web-13] Webel, S.; Bockholt, U.; Engelke, T.; Gavish, N.; Olbrich, M.; Preusche, C.; *An augmented reality training platform for assembly and maintenance skills*; in *Robotics and Autonomous Systems*; 61(4), 2013:398–403.
- [Wen-93] Wendt, M.; *Strategien des fremdsprachlichen Handelns: Lerntheoretische Studien zur begrifflichen Systematik*; Giessener Beiträge zur Fremdsprachendidaktik; Narr, Tübingen, 1993.
- [Wie-03] Wiedenmaier, S.; Oehme, O.; Schmidt, L.; Luczak, H.; *Augmented reality (AR) for assembly processes - an experimental evaluation*; in *IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality*; IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, 2003; 185–186.

- [Wie-14a] Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.; *Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*; Hanser, München u.a.; 2. Edn., 2014.
- [Wie-14b] Wiesbeck, M.; *Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung*; Dissertation; Technische Universität München; München, 2014.
- [Wöh-15] Wöhner, M.; Hartmann, P.; *Optimierung der Grafikerstellung für Technische Dokumentation durch Verwendung von CAD-Daten*; tcworld conference; Stuttgart, 2015.
- [Zhu-08] Zhu, X.; Hu, S. J.; Koren, Y.; Marin, S. P.; *Modeling of Manufacturing Complexity in Mixed-Model Assembly Lines*; in *International Journal of Production Research*; 130(5), 2008:1–10.

Studentische Beiträge

Im Zusammenhang mit den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu lernerzentrierten digitalen Werkzeugen zur Trainingsunterstützung entstanden am Fachgebiet Montagetechnik und Fabrikbetrieb, später Fachgebiet Montage- und Handhabungstechnik, des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF)) der Technischen Universität Berlin, studentische Arbeiten, deren Ergebnisse partiell in das vorliegende Dokument eingeflossen sind. Die Arbeiten entstanden unter wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors und werden im Folgenden aufgelistet. Der Dank des Autors gilt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung der vorliegenden Arbeit.

Soehring, P.; *Automatisierte Erstellung von Augmented Reality-Montageanleitungen im Sondermaschinenbau*, Masterarbeit, 2019

Kapusuz, A.; *Weiterentwicklung einer Augmented Reality App zur stufenweisen Montagevisualisierung im Sondermaschinenbau*, Bachelorarbeit, 2019

Fischer, N.; *Entwicklung eines Microsoft HoloLens Demonstrators zur Unterstützung von Montage-tätigkeiten im Handwerk durch Augmented Reality*, Masterarbeit, 2018

Nissen, Y.; *Lernfabriken im Sondermaschinenbau*, Masterarbeit, 2018

Fenske, N.; *Analyse komplexer Montagetätigkeiten zur Bewertung des Potenzials innovativer Montageanleitungen in der Triebwerksinstandhaltung*, Masterarbeit, 2018

Lorenz, A.; *Verkürzung der Anlernzeit von Mitarbeitern mithilfe von Utility-Filmen im Sondermaschinenbau am Beispiel der Highyag Lasertechnologie GmbH*, Bachelorarbeit, 2017

Perez, O.; *Development of a new learner-centered training method for P&G Crailsheim*, Masterarbeit, 2017

Garbe, L.; *Implementierung eines automatischen Erstellungsprozesses für interaktive Kundendokumentation im Sondermaschinenbau*, Masterarbeit, 2016

Habur, F.; Cankurtaran, E.; Sadiku, A.; Schäffer, T.; Slimani, C.; Nguyen, P.; *Schulungskonzepte für den Sondermaschinenbau unter Einbeziehung von AR/VR*, Projektarbeit, 2018

Rolsing, A.; Schulz, E.; Höpfner, K.; *Entwicklung einer AR App zur Visualisierung von Montagevorgängen*, Projektarbeit, 2018

Cortés, M.; Luetje, L.; Liu, L.; Potzelt, E.; *Development of a concept for the creation of film-based work instructions in the optoelectronic industry*, Projektarbeit, 2017

Deprez, J.; Drews, M.; Othmani, M.; Krone, S.; *Weiterentwicklung einer Augmented Reality App zur Montageschulung*, Projektarbeit, 2017

Türkal, B.; Zimmermann, M.; Olesch, M.; Akdemir, O.; Budny, M.; Schlegel, T.; *Konzeption einer Lernfabrik für die Vermittlung von Montageinhalten im Sondermaschinenbau*, Projektarbeit, 2017

Kanisias, J.; Bluhm, J.; Luu, L.; Westphal, P.; Lorenz, A.; Brockmann, L.; Stapel, A.; *Montageschulung mit 3D-gedruckten Miniaturmodellen und Augmented Reality*, Projektarbeit, 2017

Bahadir, Z.; Imekci, M.; Adiman, K.; Lee, C.; Arndt, D.; Nissen, Y.; *Sprachunabhängige Montageanleitungen im Sondermaschinenbau*, Projektarbeit, 2016

Riedinger, L.; Lee, C.; Gennermann, B.; *Sprachunabhängige Montageanleitungen*, Projektarbeit, 2015

Nagy, N.; Kretzer, S.; Gareis, I.; Nissen, Y.; Dreßler, M.; *Wissensvermittlung im Sondermaschinenbau*, Projektarbeit, 2015

Xie, Y.; Deghela, U.; Liu, C.; Simmat, T.; *Montageanalyse bei MAN Diesel & Turbo*, Projektarbeit, 2014

Abkürzungsverzeichnis

ADDIE	Analysis, Design, Development, Implementation and Evaluation
AR	erweiterte Realität (<i>Augmented Reality</i>)
AV	erweiterte Virtualität (<i>Augmented Virtuality</i>)
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CAD	Computer-Aided Design
CAVE	Cave Automatic Virtual Environment
FSE	Servicemonteur (<i>Field Service Engineer</i>)
HMD	Datenbrille (<i>Head-Mounted-Display</i>)
HTML	Hypertext Markup Language
IDMEE	Instructional Design Model for Engineering Education
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
ITS	intelligentes Tutoriensystem (<i>Intelligent Tutoring System</i>)
IWF	Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb
KVP	kontinuierlicher Verbesserungsprozess
MAN	Maschinenfabrik Augsburg Nürnberg
MAN ES	MAN Energy Solutions SE
MR	vermischte Realität (<i>Mixed Reality</i>)
MTM	Methods-Time Measurement
NMC	New Media Consortium
PDF	portables Dokumentenformat (<i>Portable Document Format</i>)
RB	Einwellenkompressor (<i>Radial Barrel Type compressor</i>)
RG	Getriebekompressor (<i>Radial Gear Type compressor</i>)
REFA	Reichsausschuss für Arbeitszeitermittlung
SAW	Smart Assembly Workplace
SE	Europäische Gesellschaft (<i>Societas Europaea</i>)
SOLO	Struktur beobachteter Lernergebnisse (<i>Structure of the Observed Learning Outcome</i>)
TU	Technische Universität
TWI	industrielles Training (<i>Training Within Industry</i>)
VGU	Vietnamesisch-Deutsche Universität (<i>Vietnamese German University</i>)
VR	virtuelle Realität (<i>Virtual Reality</i>)
XML	Extensible Markup Language

Glossar

3D-PDF: Das portable Dokumentenformat (PDF) bildet ein nach [DIN15930] genormtes und frei verfügbares Standardformat für den Austausch unterschiedlicher Datenformate. Neben statischen Daten wie Texten und Bildern, können auch dynamische Inhalte wie Tondateien, Videos und 3D-Daten eingebunden werden. CAD-Dateien können in PDF-Dokumente nach einer Umwandlung in PRC- oder U3D-Dateien direkt implementiert und animiert werden [Kum-08, Kol-09, Men-17].

ADDIE: ADDIE ist eines der am häufigsten genutzten Instructional Design Modelle und besteht aus den Stufen *Analysis, Design, Development, Implementation and Evaluation* [Bra-75, Nie-08, Mor-11].

Augmented Reality (AR): AR bildet nach [Mil-94] eine Erweiterung eines, ansonsten aus realen Inhalten bestehenden, Displays mit virtuellen Objekten. Diese können statisch und fest an einer Position des Displays verankert oder dynamisch an den Inhalt angepasst und kontextsensitiv an einem realen Objekt angehaftet sein. Vgl. Einteilung AR, AV, VR im Glossar zu MR.

Augmented Virtuality (AV): AV bildet nach [Mil-94] das Gegenstück zu AR. Bei AV werden aus virtuellen Inhalten bestehende Displays mit realen Elementen erweitert. Vgl. Einteilung AR, AV, VR im Glossar zu MR.

Boxplot: Box-and-Whiskers-Plots oder kurz Boxplots können zur Veranschaulichung der Merkmalsausprägungen von metrisch skalierten Merkmalen verwendet werden [Ben-13, S. 96]. Der untere Rand der Box wird vom unteren und der obere Rand vom oberen Quartil der Messwerte gebildet, so dass die mittleren 50 % der Kennwerte innerhalb der Box liegen. Mittig innerhalb der Box wird der Median eingezeichnet. Die beiden T-Formen, die vom unteren Rand der Box nach unten und vom oberen Rand der Box nach oben ragen, werden als *Whiskers* bezeichnet [Ben-13, S. 96]. Die Längen der Whiskers sind unterschiedlich definiert. In der vorliegenden Arbeit bilden sie den kleinsten, bzw. größten Datenwert innerhalb der inneren Eingrenzung nach Abbildung Gl.1. Auf die Einzeichnung von Außen- und Fernpunkten wurde aufgrund einer besseren Verständlichkeit in der vorliegenden Arbeit verzichtet. Abbildung Gl.2 verdeutlicht die Berechnung der inneren Eingrenzung. Der Interquartilsabstand (IQR) bildet hierbei die Differenz zwischen dem oberen Quartil Q3 und dem unteren Quartil Q1 [Ben-13, S. 96 ff.].

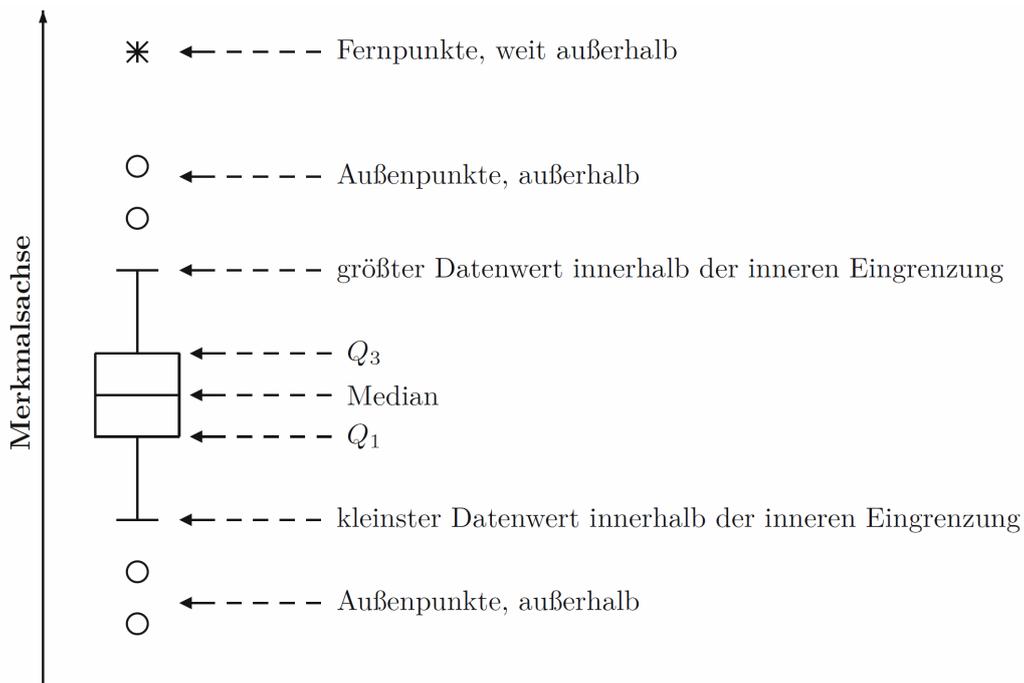


Abbildung Gl.1: Boxplot unter Berücksichtigung von Außen- und Fernpunkten nach [Ben-13, S. 98]

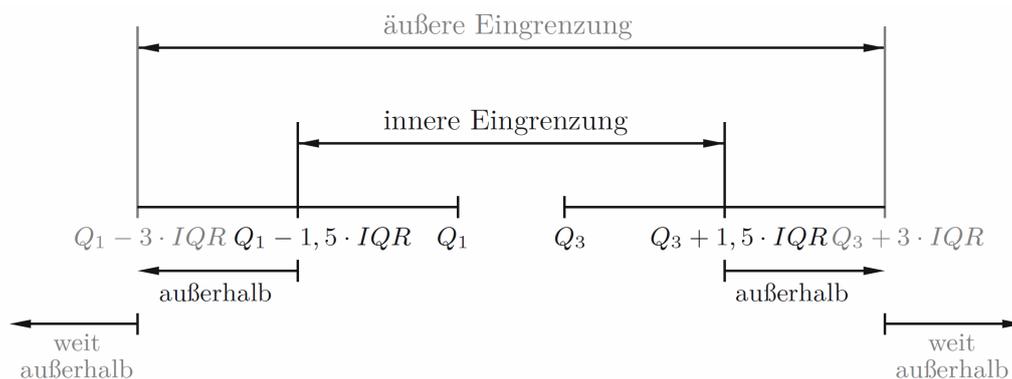


Abbildung Gl.2: Boxplotdefinition nach [Tuk-77]

explizites Wissens: Explizites Wissen wird im Englischen auch als explicit oder embodied knowledge bezeichnet. Explizites Wissen lässt sich verbalisieren und eindeutig sprachlich mitteilen [Non-92, Sch-96].

Fähigkeit: Fähigkeiten bilden die Gesamtheit der zur Ausführung einer bestimmten Arbeit erforderlichen personalen Bedingungen und sind in der Lebensgeschichte entstandene, komplexe Eigenschaften, die als verfestigte Systeme verallgemeinerter psychologischer Prozesse den Tätigkeitsvollzug steuern [Hac-78].

Fertigkeit: Fertigkeiten werden als Leistung bei einer bestimmten Aufgabe gefasst, die sich auf dem Hintergrund aufgabenübergreifender, personenspezifischer Fähigkeiten durch Übung herausbildet. Fertigkeit bezeichnet im Allgemeinen einen erlernten oder erworbenen Anteil des Verhaltens. Der

Begriff der Fertigkeit grenzt sich damit vom Begriff der Fähigkeit ab, die als Voraussetzung für die Realisierung einer Fertigkeit betrachtet wird. Können umfasst hierbei Fähigkeit und Fertigkeit [Heu-13].

Field Service Engineer (FSE): FSEs führen bei MAN Energy Solutions SE Serviceaktivitäten bei Kunden, wie Demontage, Montage, Wartung, Fehlersuche und Instandsetzung von Kompressoren, durch.

Getriebekompressor: Der Getriebekompressor ist ein Mehrwellen-Radialverdichter. Die Anzahl der Verdichterstufen wird durch die Prozessanforderungen und das Verhältnis von Kosten und Effizienz bestimmt. Typische Vorteile der unterschiedlichen Typen von Getriebekompressoren sind hoher Wirkungsgrad, niedrige Betriebskosten, geringer Investitionsaufwand und ein breiter Betriebsbereich. Spezifische Anwendungen sind Industriegase, Öl & Gas, CO₂, Harnstoff, gereinigte Terephthalsäure oder Salpetersäureprozesse. Weitere Anwendungen bilden Brenngasverstärker für Großgasturbinen [Men-19].

Head-Mounted-Display (HMD): Ein HMD ist ein auf dem Kopf getragenes, visuelles Ausgabegerät, welches Inhalte auf einem Bildschirm wiedergibt oder diese direkt in das Auge projiziert. Es besteht die Möglichkeit die Kopfbewegungen zu erfassen und die visuelle Ausgabe daran anzupassen, sodass ein immersiver Eindruck entsteht. Das erste HMD mit 3D-Tracking wurde von Ivan Sutherland 1966 entwickelt und 1968 gebaut [Sut-68].

Heuristik: Als Heuristiken werden einfache Denkstrategien für Problemlösungen bezeichnet, welche meist schneller, aber auch fehleranfälliger als Algorithmen sind. Heuristiken basieren auf Erfahrungen und können auch bei wenig Zeit und begrenztem Wissen zu praktikablen Lösungen führen. Ein Algorithmus bezeichnet im Gegensatz dazu eine systematische, logische Regel oder Vorgehensweise, die zur Lösung eines vorliegenden Problems führt [Gig-99].

HoloLens: Die HoloLens ist ein seit 2016 erhältliches HMD für die Nutzung von AR. Mithilfe mehrerer Kameras, Mikrofone und weiterer Sensorik ist sie in der Lage ihre Umgebung zu erfassen und mit virtuellen Inhalten zu erweitern. Diese Inhalte werden auf ein halbtransparentes Display vor den Augen des Nutzers projiziert. Mithilfe von Gestik, Sprache oder Kopfbewegungen kann die HoloLens intuitiv gesteuert werden.

Immersion: Die Immersion beschreibt das Maß, in dem der Nutzer in eine virtuelle Simulation integriert wird. Je weniger der Nutzer den Unterschied zwischen simulierter und physischer Umgebung erkennen kann, umso höher ist die Immersion [Dör-13].

implizites Wissen: Implizites Wissen wird auch als verborgenes Wissen; tacit, embrained, encoded oder auch silent knowledge bezeichnet. Implizites Wissen bildet den Teil des Wissens, welcher nicht vollständig in Worten ausgedrückt oder erfasst werden kann. Es umfasst persönliche Erfahrungen, das Können einer einzelnen Person oder auch ihre Überzeugungen. Implizites Wissen ist daher auch schwer speicherbar [Non-92, Sch-96].

Instructional Design Model for Engineering Education (IDMEE): Das IDMEE ist ein Instructional Design Modell, welches genutzt wird, um die Zielgruppe eines Trainings oder einer Schulung zu definieren, den Lerninhalt zu bestimmen sowie geeignete Lernmethoden und Lernmittel zu identifizieren. Beim IDMEE wird die Entwicklung von Kursen in die vier Stufen: *Who Zielgruppe*, *What Lerninhalt*, *How Lernmethode*, *By which means Auswahl von Werkzeugen* eingeteilt.

Intelligent Tutoring System (ITS): Ein ITS ist ein Computersystem, das darauf abzielt, den Lernenden unmittelbare und individuelle Anweisungen oder Feedback zu geben [Pso-88]. Ein ITS zielt in der Regel darauf ab, die nachgewiesenen Vorteile des individuellen, personalisierten Unterrichts in Kontexten zu replizieren, in denen die Lehrenden ansonsten mehrere Schüler gleichzeitig unterrichten müsste oder wo gar kein Lehrender existiert [Van-11].

Interaktivität: Interaktivität wird häufig im Zusammenhang mit Lernsystemen im E-Learning verwendet. Interaktivität bezeichnet den aktiven Umgang des Lernenden mit Lernobjekten. Interaktivität kann nach [Sch-02] in die folgenden Stufen eingeteilt werden.

1. Objekte betrachten und rezipieren
2. Multiple Darstellungen betrachten und rezipieren
3. Die Repräsentationsformen variieren
4. Den Inhalt der Komponente modifizieren
5. Das Objekt bzw. den Inhalt der Repräsentation konstruieren
6. Den Gegenstand bzw. Inhalt der Repräsentation konstruieren und durch manipulierende Handlungen intelligente Rückmeldungen vom System erhalten.

kognitive Distanz: Die kognitive Distanz beschreibt den Abstand zwischen der Form in welcher Informationen präsentiert werden und dem Kontext in dem sie angewandt werden und bezieht sich hierbei auch auf die Entfernung zwischen Lern- und Ausführungsort. Der Lerninhalt muss vom Lerner am Lernort erst aufgenommen, interpretiert und verstanden werden, um anschließend am Ausführungsort umgesetzt zu werden. Diese Übertragungsleistung wird umso größer, je stärker die Art der Darstellung der Anweisung von der Ausführung in der Realität abweicht und je weiter Lern- und Ausführungsort voneinander entfernt sind [Por-17].

Lernzeuge: Lernzeuge sind Objekte, die dem Nutzer ihre Funktionalität automatisch vermitteln. Durch sie können Nutzer mit unterschiedlichen Qualifikationsniveaus und Sprachkenntnissen intuitiv und selbstständig den Umgang mit neuartigen Produktionsmaschinen und -prozessen erlernen [Sel-12a] nach [Sel-09, S. 91-98]. Ein Ziel in der Anwendung von Lernzeugen besteht darin, durch den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) die Lern- und Lehrproduktivität zu erhöhen. Lernzeuge können sowohl kognitive als auch psychomotorische Fertigkeiten und Inhalte vermitteln.

Mixed Reality (MR): MR bildet nach [Mil-94] eine Unterkategorie von VR-bezogenen Technologien. Diese Technologien können entlang des Virtualitätskontinuums in AR, AV oder VR nach ihrem Anteil an virtuellem und realem Darstellungsinhalt eingeordnet werden. AR und AV bilden hierbei Unterkategorien von MR.

Sensumotorik und Psychomotorik: Unter Sensumotorik wird die Reaktion auf Wahrgenommenes oder auch das Zusammenwirken der sensorischen und motorischen Nervenbahnen verstanden [Wen-93, And-09]. Unter Psychomotorik dagegen werden muskuläre Aktivitäten verstanden, welche durch innere Anstöße ausgelöst werden [Wen-93, Beu-13, Pap-18]. Psychomotorik kann jedoch nach [Blo-56, Sim-72] auch wie folgt interpretiert werden. Sie umfasst die körperliche Bewegung, Koordination und Nutzung motorischer Fertigkeiten. Für die Entwicklung dieser Fertigkeiten wird Übung erfordert. Diese wird in Bezug auf Geschwindigkeit, Distanz, Techniken in der Ausführung, Verfahren oder Präzision gemessen. Die psychomotorischen Fertigkeiten umfassen somit manuelle Aufgaben, wie das Waschen eines Autos oder das Ausheben eines Grabens sowie schwierigere Aufgaben, wie das Bedienen eines komplizierten Maschinenteils [Sim-72].

Sinne des Menschen:

- Hören, *auditive Wahrnehmung*
- Riechen, *olfaktorische Wahrnehmung*
- Schmecken, *gustatorische Wahrnehmung*
- Erfühlen, *haptische Wahrnehmung*
- als Teile des Erfühlens: das Tasten, *taktile Wahrnehmung*
- Gleichgewichtssinn, *vestibuläre Wahrnehmung*
- Körperempfindung, *Propriozeption*
- Temperaturgefühl, *Thermozeption*
- Schmerzempfindung, *Nozizeption*

tangibel und intangibel: Das Adjektiv tangibel *engl. tangible* bedeutet *berührbar* und beschreibt Dinge, welche anfassbar oder greifbar sind. Nicht greifbare immaterielle Gegenstände werden als intangibel bezeichnet.

Training und Schulung: Beim Training steht das praktische Üben im Vordergrund. Es geht um das Aneignen von *Fertigkeiten* durch aktive Teilnahme wie bspw. beim Trainieren einer Fußballmannschaft von Spielzügen auf dem Feld oder beim Trainieren von Teilnehmern im professionellen Umgang mit PowerPoint. Im Training steht das eigene Tun dabei klar im Vordergrund, der Trainingsleiter gibt Anleitungen und Hilfestellungen zur Umsetzung. Bei einer Schulung werden standardisierte *Kenntnisse* und Fähigkeiten in einem bestimmten Bereich *vermittelt*. Der Schwerpunkt liegt hier im Gegensatz zum Training auf dem Frontalunterricht. Wird bspw. eine Gruppe in der Präsentationsgestaltung geschult, so werden in erster Linie Sachverhalte erklärt, Beispiele gezeigt, Fragen beantwortet, Tipps gegeben und teilweise können Teilnehmer auch zu einem geringen Teil einige Inhalte üben [Gar-18].

Vermittlung: (Wissens-)vermittlung wird als Begriff in der vorliegenden Arbeit für den Transfer von Inhalten in das Bewusstsein des Lerners genutzt.

Virtual Reality (VR): VR beschreibt eine virtuelle Darstellung, deren Maß an Immersion von gering, bspw. bei der Betrachtung eines Bildschirms, bis hoch, bspw. bei einer VR-Brille mit Kopfhörern und Controllern, reichen kann. Ziel ist die Erreichung einer vollständigen Immersion, bei welcher der

Nutzer die virtuelle nicht mehr von der realen Welt unterscheiden kann. Vgl. Einteilung AR, AV, VR im Glossar zu MR.

Anhang A: AR/VR-App

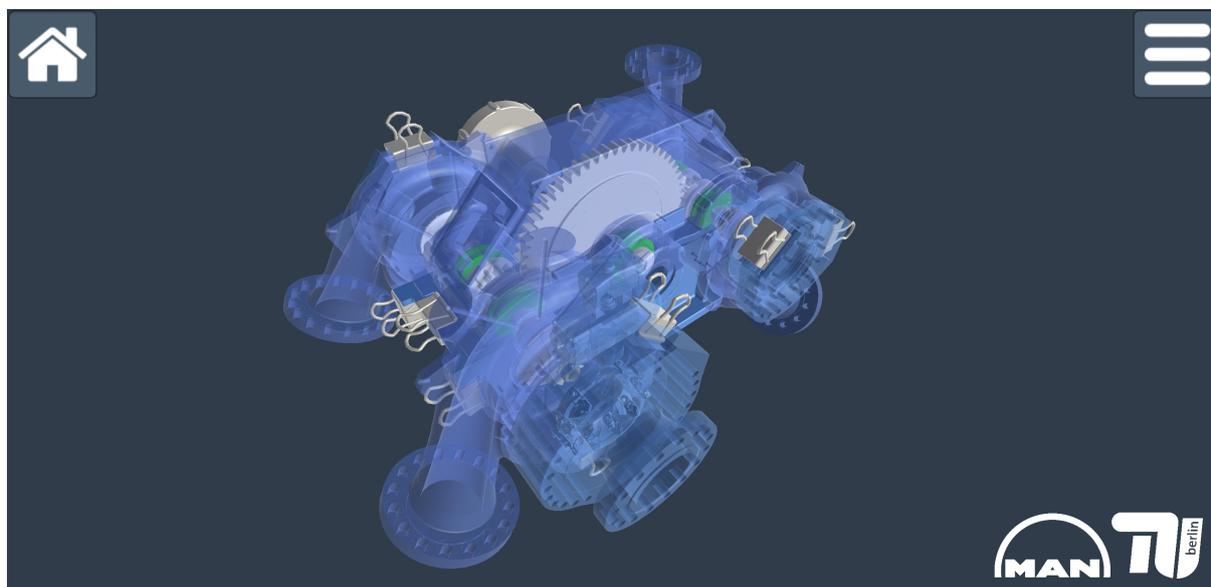


Abbildung A.1: VR-Darstellung der Getriebebewegung



Abbildung A.2: VR-Explosionsdarstellung und Bauteilauswahl



Abbildung A.3: VR-Darstellung von Bauteilinformationen

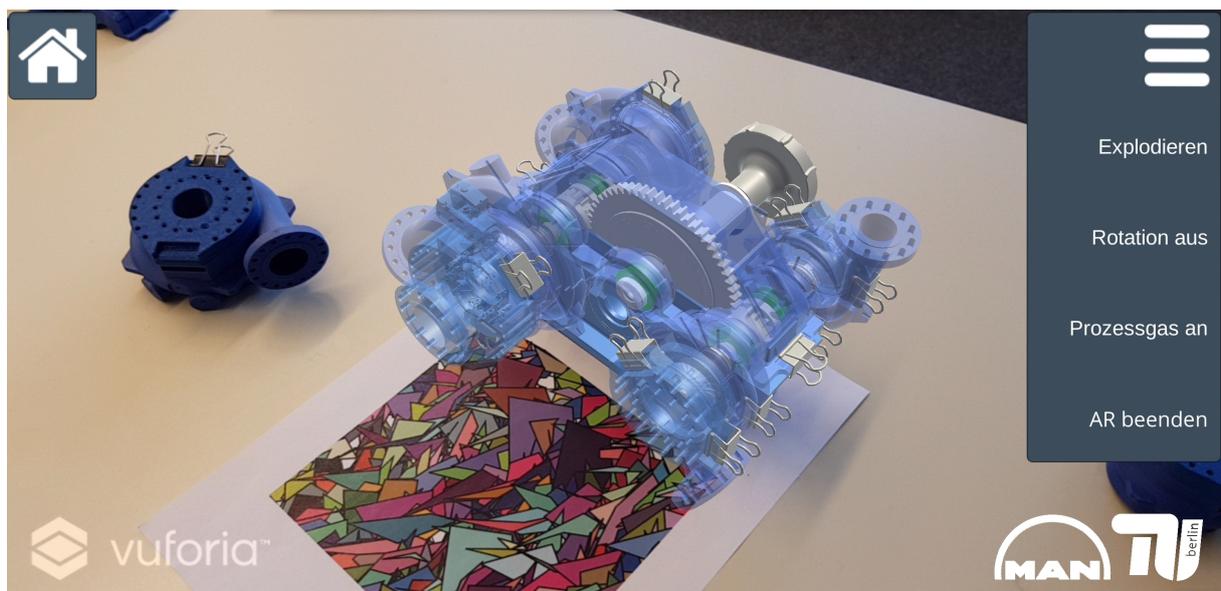


Abbildung A.4: AR-Darstellung der Getriebebewegung

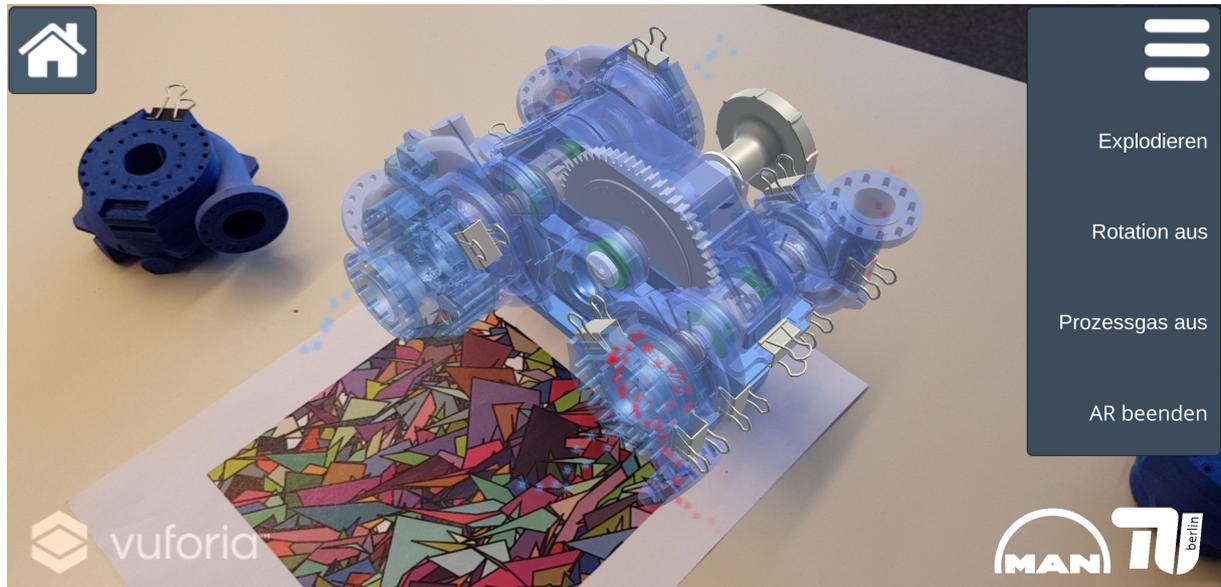


Abbildung A.5: AR-Darstellung des Gasflusses



Abbildung A.6: AR-Darstellung von Bauteilinformationen

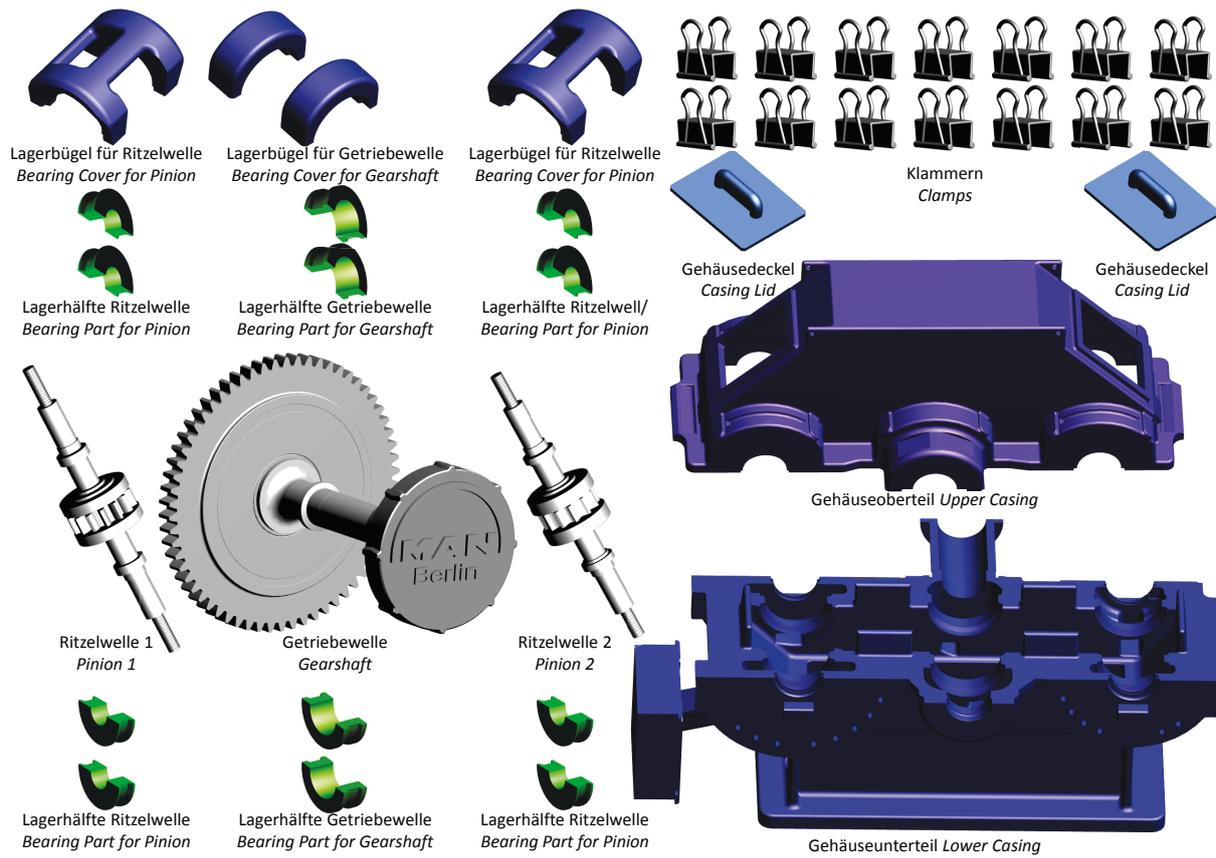


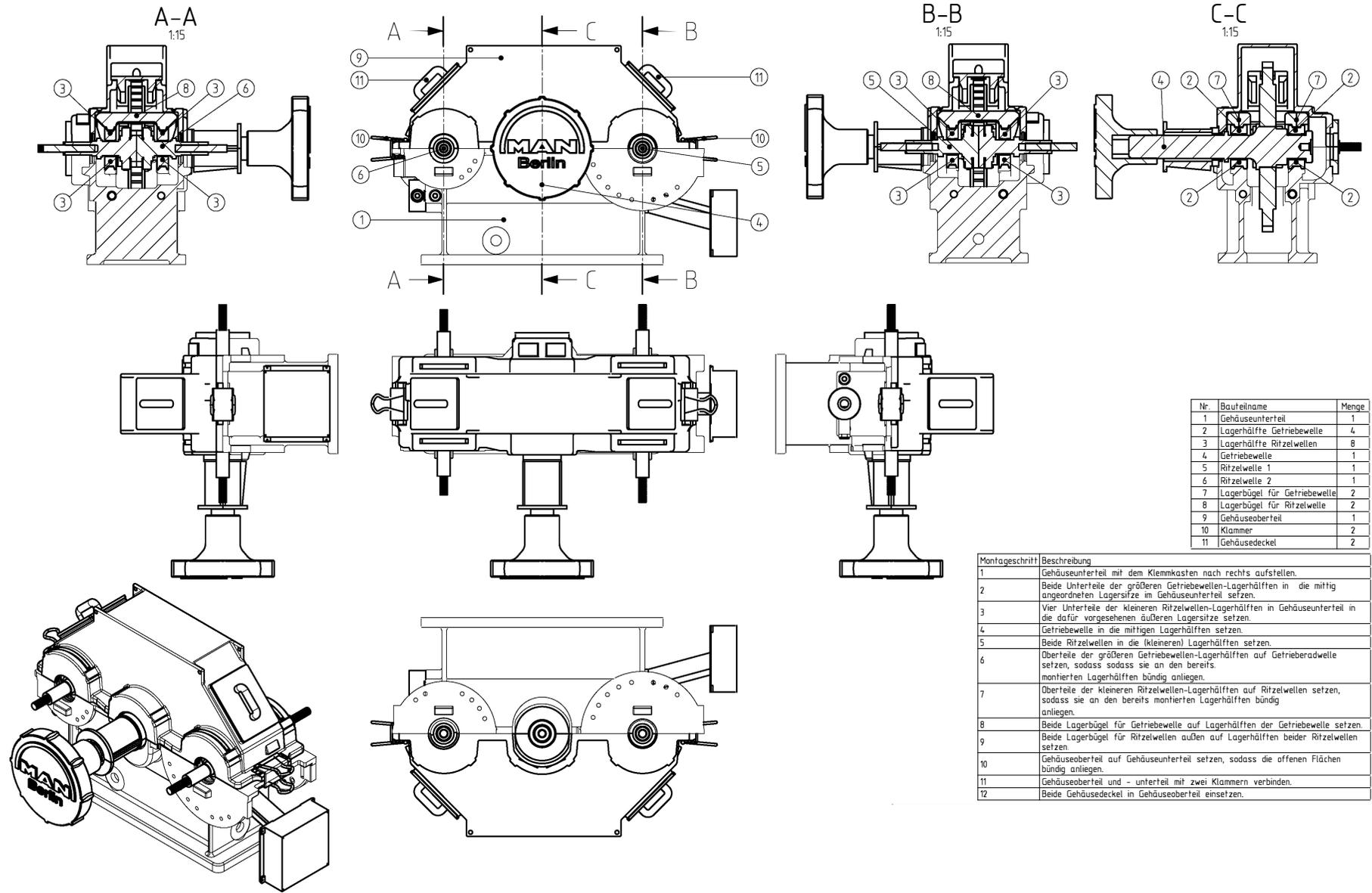
Abbildung A.7: Bauteilanordnung des 3D-Drucks Blatt 1

	Stufe 1 Stage 1	Stufe 2 Stage 2	Stufe 3 Stage 3	Stufe 4 Stage 4
Einlaufinsatz Inlet Diaphragm				
Diffusoreinsatz Diffuser Diaphragm				
Laufrad Impeller Mutter Nut Dichtung Seal				
Spirale Volute				

Abbildung A.8: Bauteilanordnung des 3D-Drucks Blatt 2



Abbildung A.10: Anordnung der entwickelten Lernzeuge für ein Montagetaining bei MAN ES



Nr.	Bauteilname	Menge
1	Gehäuseunterteil	1
2	Lagerhälfte Getriebewelle	4
3	Lagerhälfte Ritzelwellen	8
4	Getriebewelle	1
5	Ritzelwelle 1	1
6	Ritzelwelle 2	1
7	Lagerbügel für Getriebewelle	2
8	Lagerbügel für Ritzelwelle	2
9	Gehäuseoberteil	1
10	Klammer	2
11	Gehäusedeckel	2

Montageschritt	Beschreibung
1	Gehäuseunterteil mit dem Klemmkasten nach rechts aufstellen.
2	Beide Unterteile der größeren Getriebewellen-Lagerhälfen in die mittig angeordneten Lagersitze im Gehäuseunterteil setzen.
3	Vier Unterteile der kleineren Ritzelwellen-Lagerhälfen in Gehäuseunterteil in die dafür vorgesehenen äußeren Lagersitze setzen.
4	Getriebewelle in die mittigen Lagerhälfen setzen.
5	Beide Ritzelwellen in die (kleineren) Lagerhälfen setzen.
6	Oberteile der größeren Getriebewellen-Lagerhälfen auf Getrieberadwelle setzen, sodass sie an den bereits montierten Lagerhälfen bündig anliegen.
7	Oberteile der kleineren Ritzelwellen-Lagerhälfen auf Ritzelwellen setzen, sodass sie an den bereits montierten Lagerhälfen bündig anliegen.
8	Beide Lagerbügel für Getriebewelle auf Lagerhälfen der Getriebewelle setzen.
9	Beide Lagerbügel für Ritzelwellen außen auf Lagerhälfen beider Ritzelwellen setzen.
10	Gehäuseoberteil auf Gehäuseunterteil setzen, sodass die offenen Flächen bündig anliegen.
11	Gehäuseoberteil und - unterteil mit zwei Klammern verbinden.
12	Beide Gehäusedeckel in Gehäuseoberteil einsetzen.

Abbildung A.11: DIN A3 Bauteilzeichnung des 3D-Drucks

Anhang B: HoloLens Umfrageergebnisse

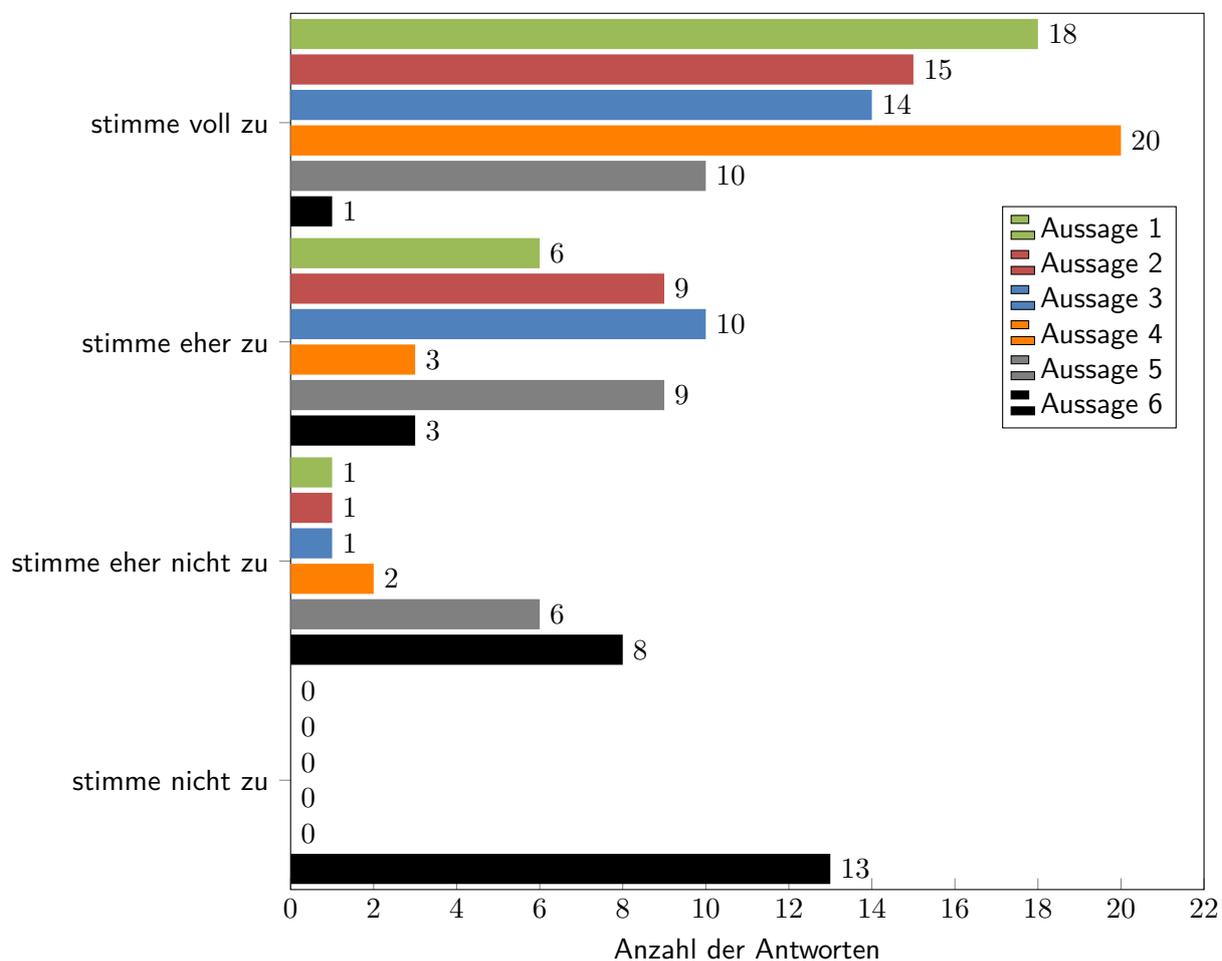


Abbildung B.1: Umfrage zur Steckdosenmontage mithilfe der HoloLens 2018. Hierzu wurden 25 Ausstellungsbesucher befragt, welche die Montage einer Steckdose vollständig mithilfe der HoloLens durchgeführt haben.

Aussage 1: Ich fühlte mich sicherer durch die Unterstützung und Anweisungen der HoloLens.

Aussage 2: Durch die Unterstützung der HoloLens ist es schwieriger Fehler zu machen und Arbeitsschritte zu vergessen.

Aussage 3: Durch die HoloLens, wusste ich zu jedem Zeitpunkt was zu tun ist.

Aussage 4: Die HoloLens hat mir bei der Lokalisierung der richtigen Werkzeuge und Bauteile geholfen.

Aussage 5: Die Form der Interaktion mit der Anwendung (Gesten und Sprachsteuerung) ist natürlich und intuitiv.

Aussage 6: Das Tragen der HoloLens empfand ich als unangenehm oder schmerzhaft.

Anhang C: AR-Unternehmensumfrage

Für die vorliegende Dissertation wurde 2018 eine Umfrage unter 80 deutschen Unternehmen zum Thema Montageschulung und digitale Trainingswerkzeuge durchgeführt. Von den Unternehmen beantworteten 49 die Frage *Werden in Ihrem Unternehmen manuelle Montage- oder Serviceprozesse durchgeführt?* mit *Ja*. Von diesen Unternehmen führten 37 die Umfrage vollständig durch. Im Folgenden werden nur die Antworten dieser 37 Unternehmen ausgewertet.

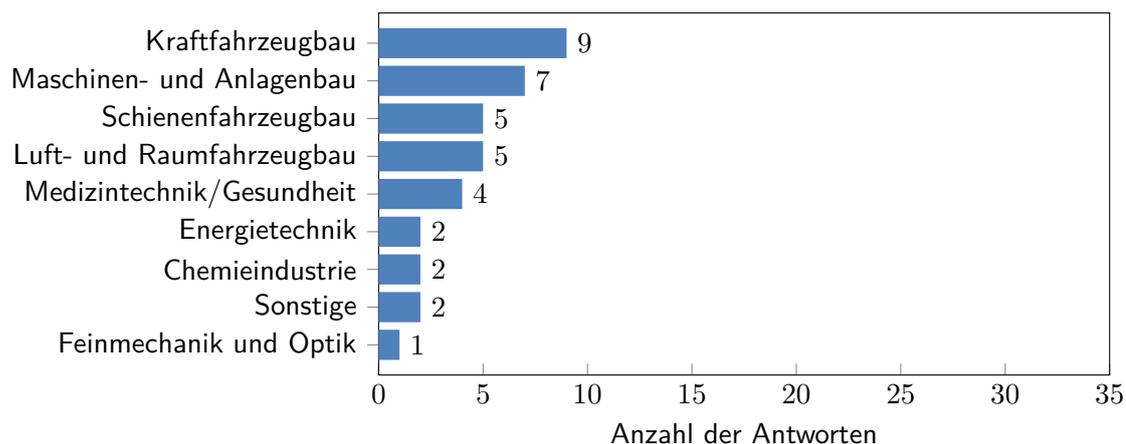


Abbildung C.1: Umfrage AR-Nutzung: Allgemeine Fragen: In welcher Branche ist Ihr Unternehmen tätig? Unter Sonstige wurden genannt: Elektroindustrie, Hausgeräte und Dienstleistung

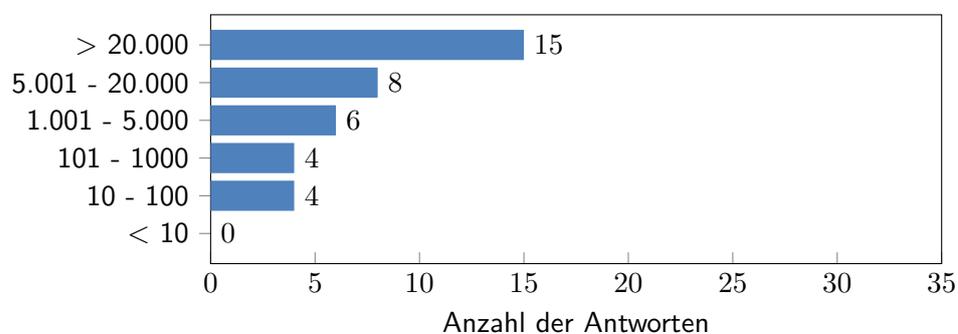


Abbildung C.2: Umfrage AR-Nutzung: Allgemeine Fragen: Wie viele Mitarbeiter sind in Ihrem Unternehmen tätig?

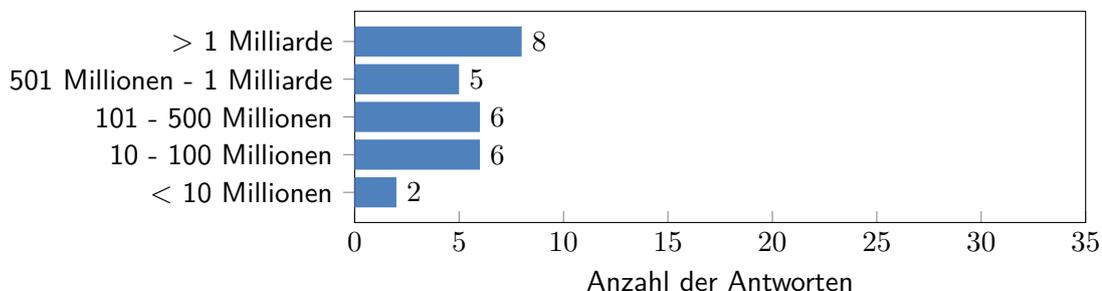


Abbildung C.3: Umfrage AR-Nutzung: Allgemeine Fragen: Wie groß ist der Jahresumsatz (in Euro) Ihres Unternehmens?

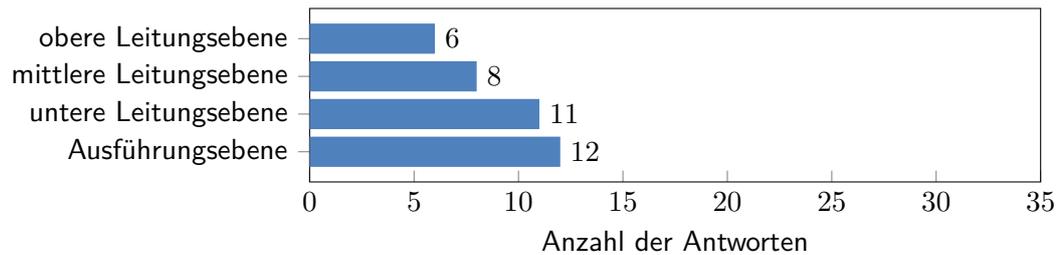


Abbildung C.4: Umfrage AR-Nutzung: Allgemeine Fragen: In welcher Hierarchieebene arbeiten Sie in Ihrem Unternehmen? *Vollständig ausgeschrieben lauteten die Antwortmöglichkeiten: obere Leitungsebene: Vorstand, Bereichsleiter; mittlere Leitungsebene: Filialleiter, Abteilungsleiter; untere Leitungsebene: Gruppenleiter, Zweigstellenleiter; Ausführungsebene: Sachbearbeiter, Monteur*

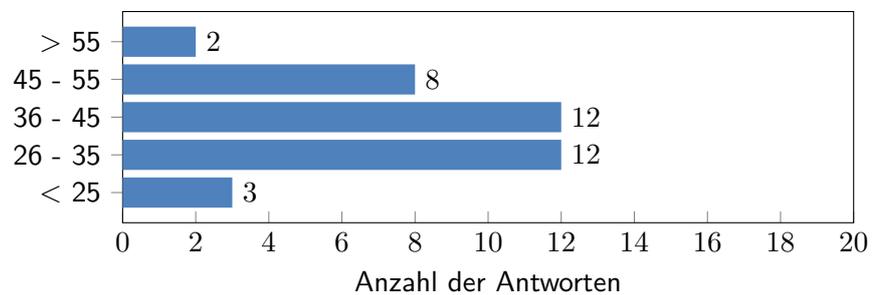


Abbildung C.5: Umfrage AR-Nutzung: Allgemeine Fragen: Wie alt sind Sie?

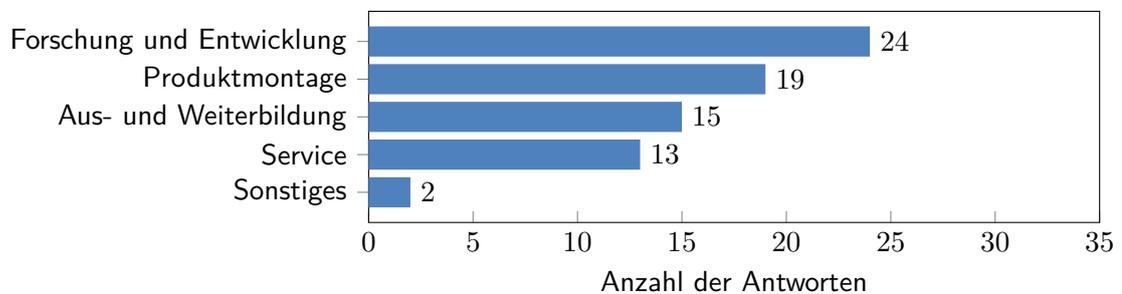


Abbildung C.6: Umfrage AR-Nutzung: Allgemeine Fragen: Beschäftigen Sie sich in Ihrer Arbeit direkt oder indirekt mit einem oder mehreren der folgenden Aspekte? *Mehrfachantworten möglich*. Unter Sonstiges wurde genannt: Projektmanagement, Ersatzinvestition von Produktionsanlagen.

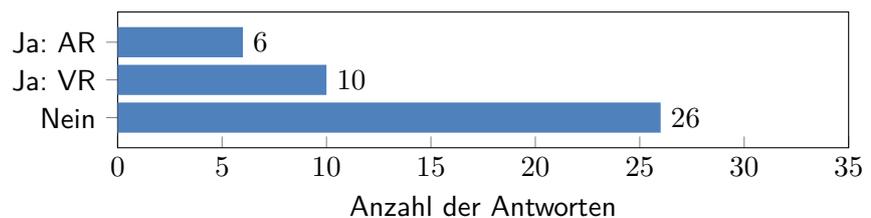


Abbildung C.7: Umfrage AR-Nutzung: AR-bezogene Fragen: Setzen Sie derzeit bereits Augmented oder Virtual Reality außerhalb des Lernumfeldes in Ihrer Organisation ein? *Mehrfachantworten möglich*

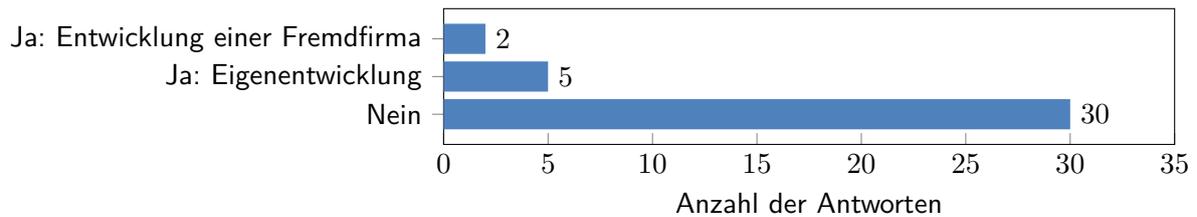


Abbildung C.8: Umfrage AR-Nutzung: AR-bezogene Fragen: Setzen Sie Augmented Reality (AR) derzeit für Montagetrainings oder Einarbeitung von Mitarbeitern ein?

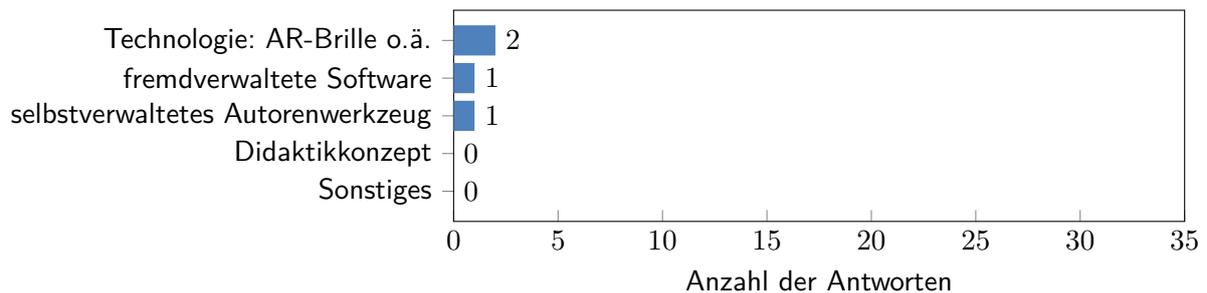


Abbildung C.9: Umfrage AR-Nutzung: AR-bezogene Fragen: Wenn es sich um eine Entwicklung einer Fremdfirma handelt, welche Leistungen wurden Ihnen angeboten? *Mehrfachantworten möglich*



Abbildung C.10: Umfrage AR-Nutzung: AR-bezogene Fragen: Empirische Studien zeigen folgende Vorteile durch AR-Training. Welche wären für Ihr Unternehmen am ehesten kaufentscheidend? *Mehrfachantworten möglich*

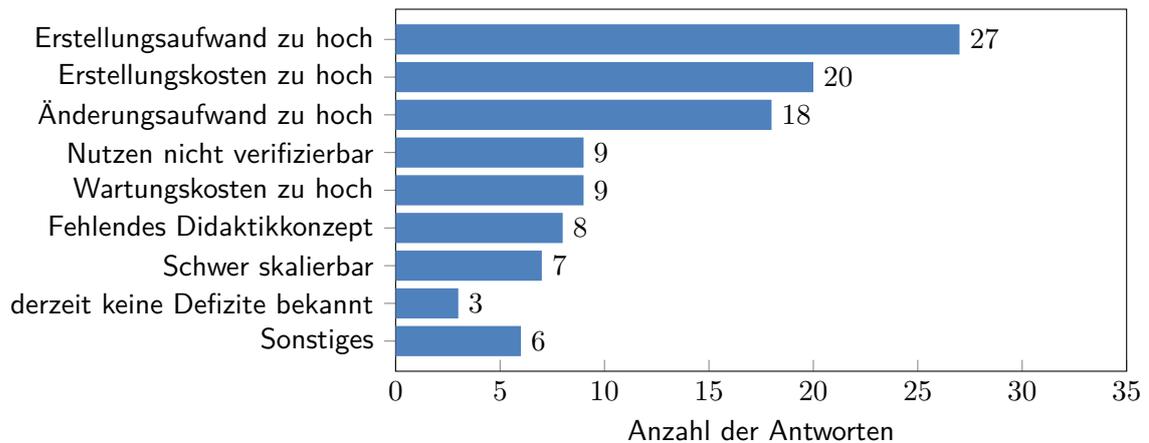


Abbildung C.11: Umfrage AR-Nutzung: AR-bezogene Fragen: Welche Defizite sehen Sie generell bei aktuellen AR-Anwendungen? *Mehrfachantworten möglich. Unter Sonstiges wurde genannt: Anwenderakzeptanz / mangelnde Technologie Affinität (ältere Mitarbeiter); AR und VR Lernprogramme bieten sich am ehesten für wiederkehrende Bewegungsabläufe an; Fehlende Ressourcen in den Unternehmen für die Umsetzung; Wissensverankerung ist weniger gut als bei einer praktischen Übung mit anderen Menschen; keine eigenen Erfahrungswerte; Unhandlich, nur für kurze Zeiten geeignet.*

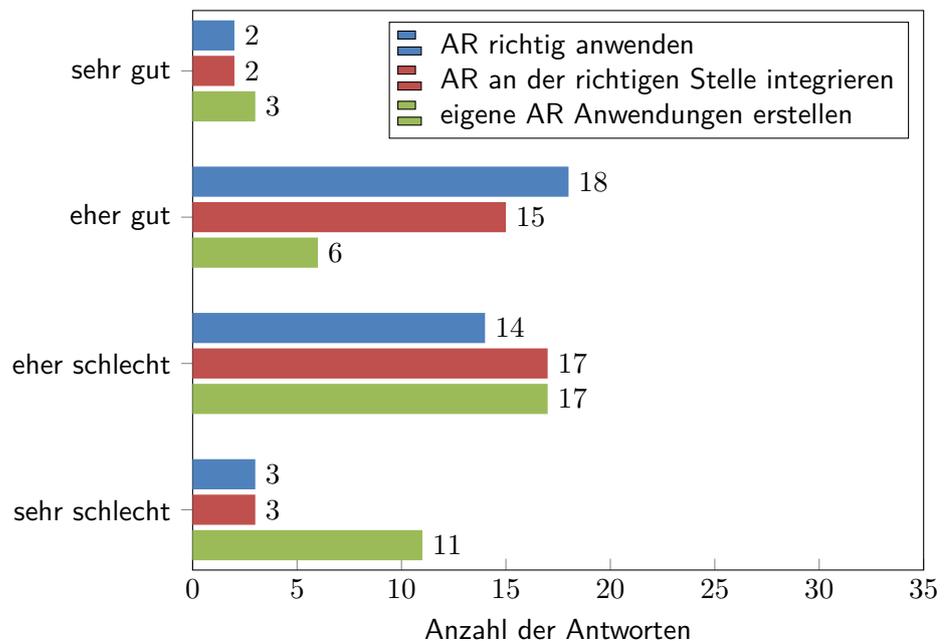


Abbildung C.12: Umfrage AR-Nutzung: AR-bezogene Fragen: Wie schätzen Sie die Kompetenz Ihrer Arbeitskollegen zu AR bei Ihnen im Unternehmen ein?

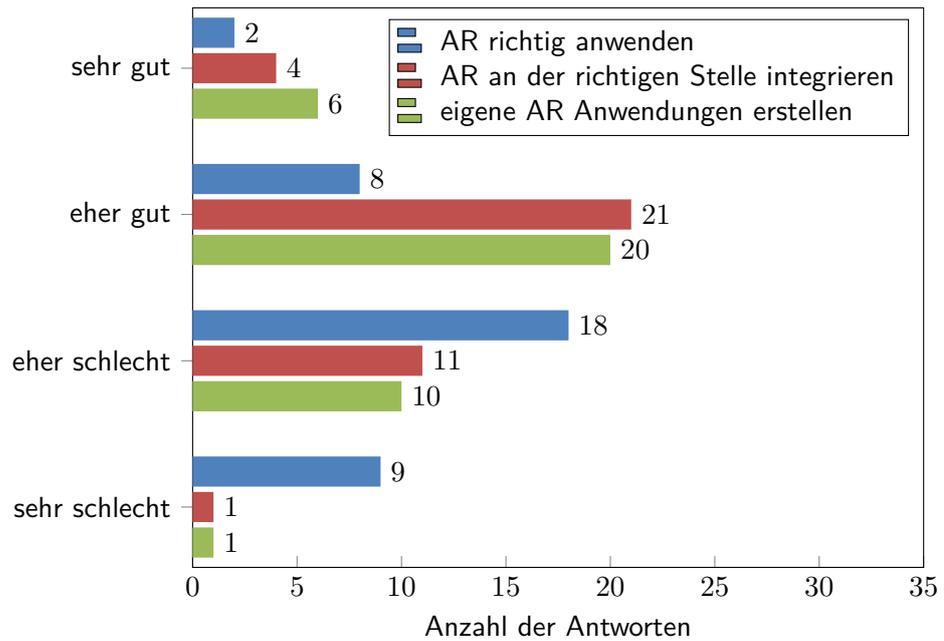


Abbildung C.13: Umfrage AR-Nutzung: AR-bezogene Fragen: Wie schätzen Sie Ihre persönliche Kompetenz zu AR ein?

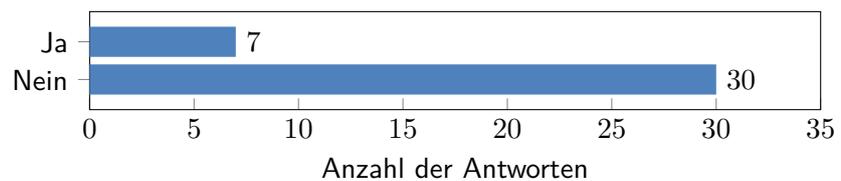


Abbildung C.14: Umfrage AR-Nutzung: AR-bezogene Fragen: Haben Sie schon einmal AR in Training oder Schulung selber eingesetzt? Wenn ja, in welcher Art? Als Kommentare wurden genannt: Wir nutzen es im produktiven Einsatz.; Pilot zum Training Instandhaltung von Komponenten, ging allerdings nicht in Regelbetrieb. Hindernis: Entwicklung der AR Module zu teuer.; Wir integrieren AR in unserem derzeitigen Projekt

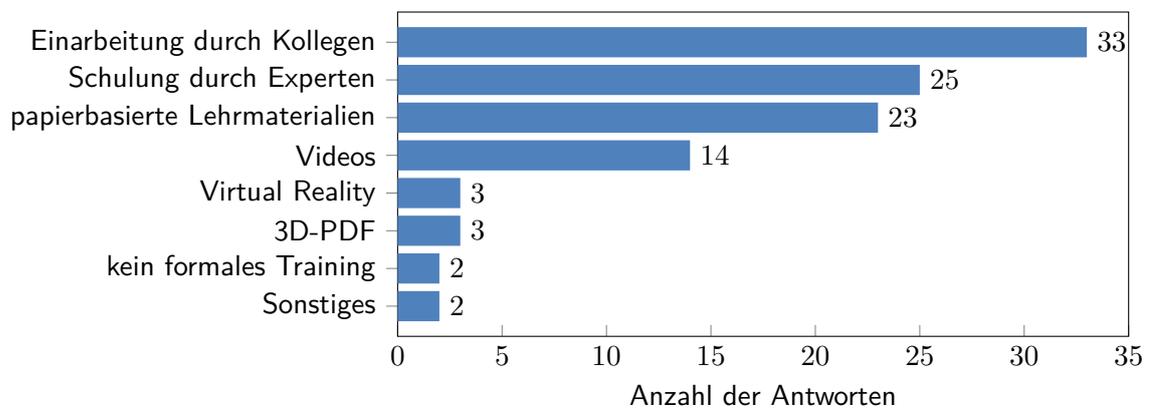


Abbildung C.15: Umfrage AR-Nutzung: Fragen zur Weiterbildung: Welche weiteren Trainingsmethoden nutzt Ihr Unternehmen derzeit für Mitarbeiter in der Montage und im Service? *Mehrfachantworten möglich* Unter Sonstiges wurde genannt: User guidance durch GUI an workstations; Online Training

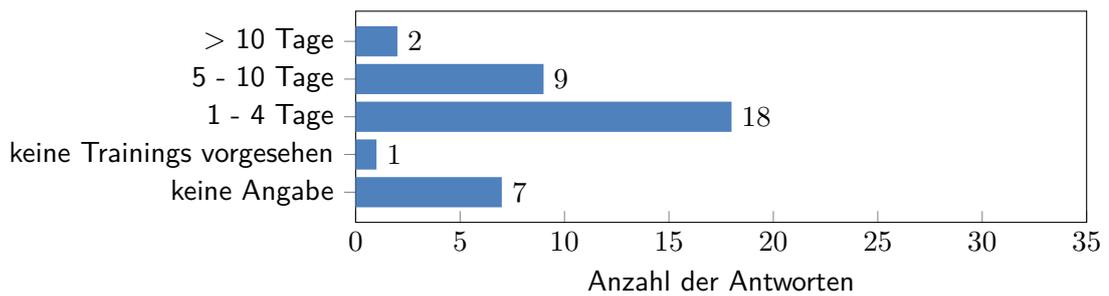


Abbildung C.16: Umfrage AR-Nutzung: Fragen zur Weiterbildung: Wie viel Zeit verbringt jeder Mitarbeiter in Montage/Service in Ihrem Unternehmen derzeit jährlich mit Schulungen und Trainings, die direkt oder indirekt mit dem Thema der Montage zusammenhängen? Kommentare: Schwer zu benennen. Interessant wäre an dieser Stelle auch eine Abschätzung wie viel Einsparung in Training und Execution gefunden werden könnten, indem die *Freiheitsgrade der Interpretation* von Anweisungen eingeschränkt werden; Wir arbeiten bereits produktiv mit VR / AR. Schulungen werden nicht gemacht, da sehr gut durchdachte UX der Anwendungen; Training on the job, schwer zu quantifizieren; Betrifft nur Mitarbeiter in bestimmten Unternehmensbereichen

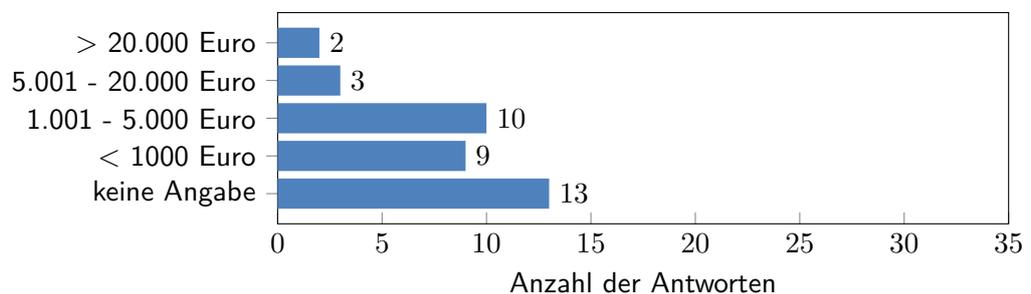


Abbildung C.17: Umfrage AR-Nutzung: Fragen zur Weiterbildung: Welche Kosten entstehen Ihnen derzeit jährlich ca. pro Mitarbeiter durch diese Trainings?

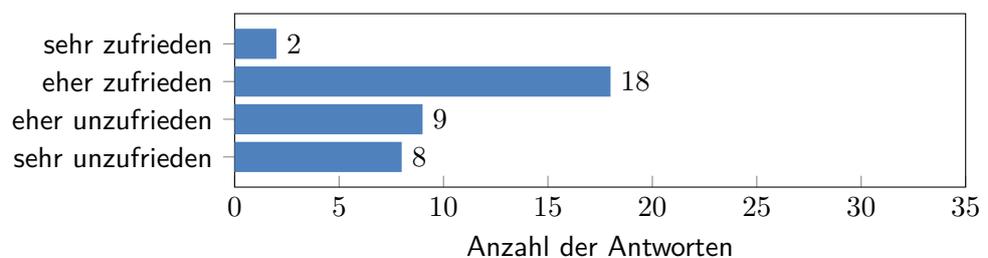


Abbildung C.18: Umfrage AR-Nutzung: Fragen zur Weiterbildung: Wie zufrieden sind Sie mit Ihrem aktuellen Training für Montagetätigkeiten?

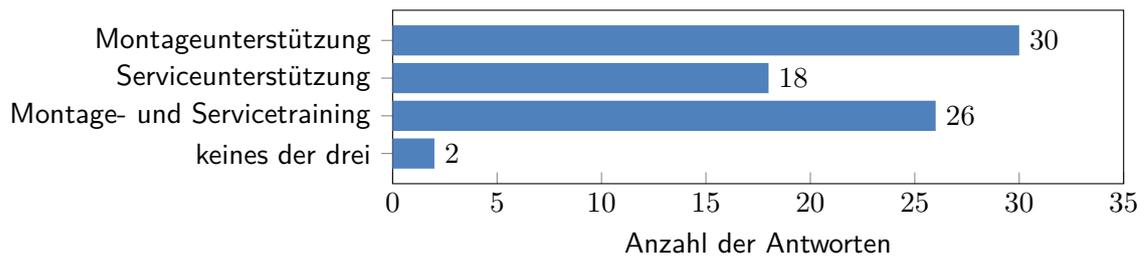


Abbildung C.19: Umfrage AR-Nutzung: Zukunft: Können Sie sich vorstellen AR (weiterhin) in naher Zukunft (1-2 Jahre) für Montage- und Servicetrainings (zur Vorbereitung auf Montagearbeiten), zur Unterstützung von Montagearbeiten (intern im eigenen Werk) oder für Servicearbeiten (zur Vorbereitung auf Montagearbeiten) zu nutzen?

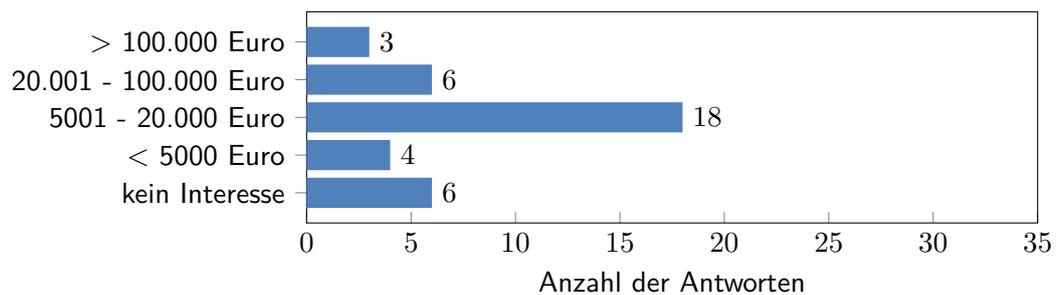


Abbildung C.20: Umfrage AR-Nutzung: Zukunft: Welche Summe wären Sie bereit für einen AR-Trainingsstand zu investieren? (Hardware und Software ohne zusätzliche Betreuung)

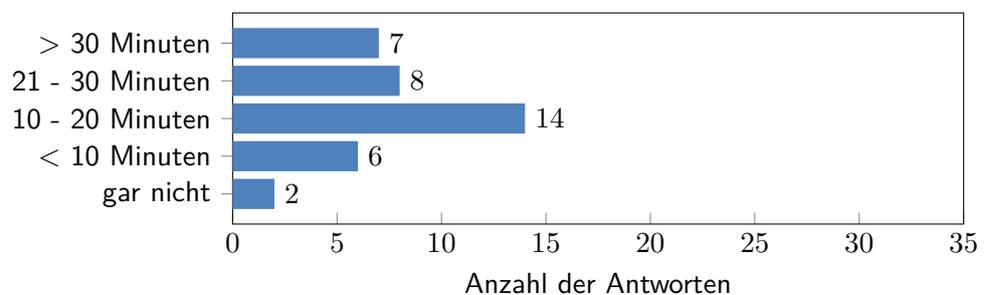


Abbildung C.21: Umfrage AR-Nutzung: Zukunft: Wie lange würden Sie AR-Lernszenarien am Stück bearbeiten/anwenden wollen?

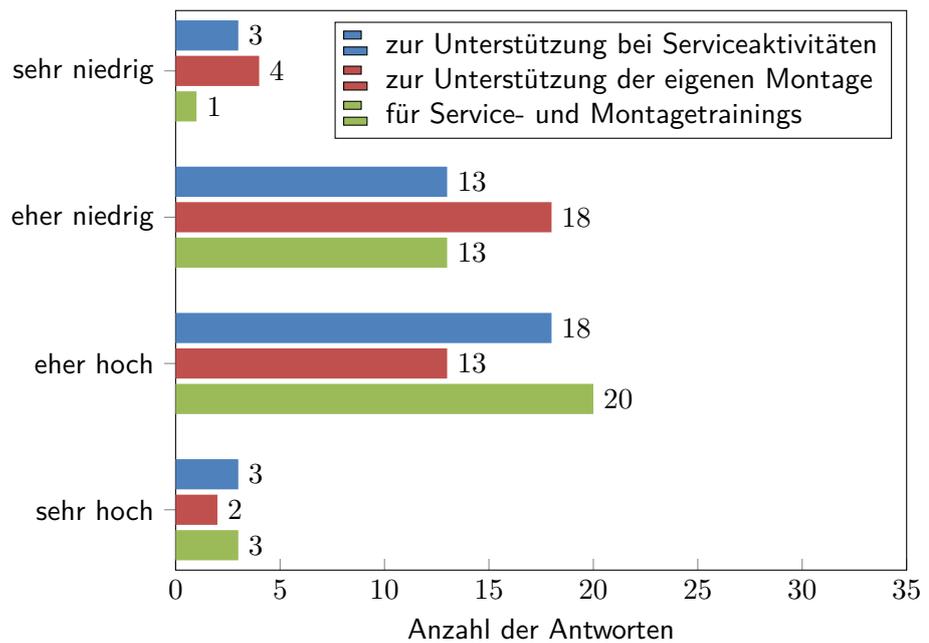


Abbildung C.22: Umfrage AR-Nutzung: Zukunft: Wie schätzen sie die Akzeptanz Ihrer Mitarbeiter gegenüber AR-Trainings und dem Tragen von Datenbrillen ein?

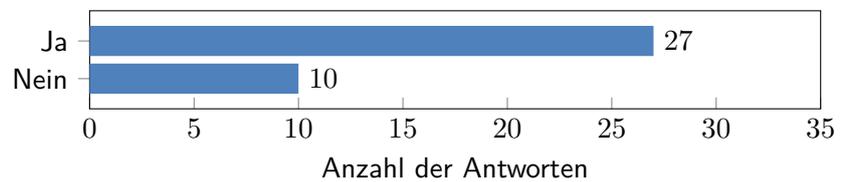


Abbildung C.23: Umfrage AR-Nutzung: Zukunft: Könnten Sie sich vorstellen mit einem jungen Startup ein Pilotprojekt zu AR-gestütztem Montagetraining zu beginnen? Kommentare: Letztlich kommt es hierbei natürlich auf den zu Grunde liegenden Business-Case an; Haben wir bereits umgesetzt; Das nächste Mal bei einem Kunden mit Herausforderungen zur Qualifizierung oder zum Distance-Service/Wartung, würde ich gern mit einem Start-Up kooperieren

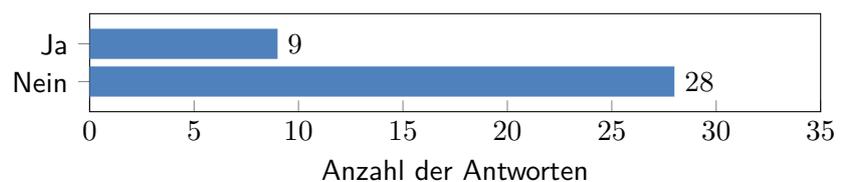


Abbildung C.24: Umfrage AR-Nutzung: Zukunft: Kennen Sie AR Lösungsanbieter? Wenn ja, welche? Kommentare: attenio; Metaio; Diotasoft; MS HoloLens

Anhang D: Didaktische Methoden

Tabelle D.1: Vier-Stufen-Methode *ausführlich* nach [Sch-05] aus [Bey-67, Pal-69, Bun-74, REF-76, REF-91]

Allgemeine Vorgehensweise	Erläuterungen
<i>1. Stufe: Vorbereitung (Lehrerbetont)</i>	
<i>1.1 Voraussetzungen schaffen</i>	
1.1.1 Unterweisungsgliederung erstellen	
1.1.2 erforderliche Betriebsmittel und Arbeitsgegenstände bereitstellen	
<i>1.2 Einstimmung des Lernenden</i>	
1.2.1 Befangenheit nehmen	Begrüßung des Lernenden, eigene Vorstellung; Anlass und Zweck der Unterweisung herausstellen
1.2.2 Lernziel nennen und Interesse wecken	Arbeitsaufgabe genau bezeichnen; Arbeitsgegenstände, Teil- und Fertigungsstücke zeigen; Verwendung und Funktion des zu fertigenden Werkstückes bzw. die Bedeutung der zu erlernenden Arbeitstätigkeit erläutern; auf Vorteile durch die richtige Arbeitsausführung hinweisen; gekonnte Arbeitsausführung beobachten lassen
1.2.3 Vorkenntnisse feststellen	bei vorhandenen Vorkenntnissen die Arbeit durch den Lernenden vormachen lassen und danach die Unterweisung ausrichten
1.2.4 richtig aufstellen	den Lernenden so aufstellen, dass er bei der Vorführung durch den Unterweise dessen Hände so sieht, wie er seine eigenen Hände beim Nachvollzug später selbst sieht (den Lernenden nicht dem Lehrenden gegenüber aufstellen!)
<i>2. Stufe: Vorführung (Lehrerbetont)</i>	
<i>2.2 erste Vorführungsart: Überblick geben / erste Vorstellung bilden</i>	die Arbeit vollständig (im Ganzen) vorführen und erklären <i>was</i> geschieht, dabei schrittweise von Lernabschnitt zu Lernabschnitt vorgehen, vgl. in der Unterweisungsgliederung die Spalte Lernabschnitte; nicht auf Einzelheiten (<i>wie, warum so</i>) eingehen; komplizierte Arbeiten öfter im Ganzen vorführen; bei wiederholtem Vorführen: Vor dem jeweils nächsten Lernabschnitt, diesen vom Lernenden benennen lassen.

Allgemeine Vorgehensweise	Erläuterungen
<i>zweite Vorführungsart: in das Detail gehen</i>	Vorführen der Arbeit in Lernabschnitten und genau erklären und begründen: <i>was, wie</i> und <i>warum so</i> , vgl. in der Unterweisungsgliederung die Spalten: Lernabschnitte, Arbeitsablauf und Arbeitshinweise: Kernpunkte, Begründungen; schwierige Lernabschnitte wiederholt vorführen; bei wiederholten Erklärungen und Begründungen die gleichen Worte verwenden.
<i>dritte Vorführungsart: zügig vorführen / Zusammenfassen</i>	flüssiges Vorführen der Arbeit im Ganzen und dabei im Kurztext erklären (<i>was</i> und <i>wie</i> , vgl. in der Unterweisungsgliederung die Spalten Lernabschnitte, Arbeitsablauf und Arbeitshinweise: Kernpunkte; jeden Lernabschnitt vor seiner Vorführung benennen oder vom Lernenden benennen lassen; soweit möglich, den Lernenden veranlassen, den Arbeitsablauf selbst zu beschreiben und Arbeitshinweise selbst zu geben
3. Stufe: Nachvollzug (Lernender betont)	
<i>3.1. erste Nachvollzugsart: Überblick gewinnen / erste Vorstellung</i>	Mitsprechen freistellen; erfolgreiche erste Versuche anerkennen; wenig korrigierend eingreifen: allein auf Fehler eingehen, die sich im Zuge des Lernverlaufs nicht von allein aufbauen u. ein Gelingen der Arbeit auch im späteren Lernverlauf verhindern; bei Misslingen der ersten Versuche, wiederholtes Vorführen der gesamten Arbeit durch den Lehrenden unter Betonung der Lernabschnitte, die dem Lernenden missglückt sind. Den Lernenden bei diesen Abschnitten über ein Gespräch verstärkt einbeziehen
<i>3.2 zweite Nachvollzugsart: in das Detail gehen</i>	den Lernenden die Arbeit nach Lernabschnitten ausführen und mitsprechen lassen, d. h. die Arbeit genau erklären und begründen lassen – <i>was, wie</i> und <i>warum so</i> , vgl. 2. Stufe 2.2; auf den Zusammenhang von Erklärung und Hantierung achten
<i>3.3 dritte Nachvollzugsart. zügig ausführen / zusammenfassen</i>	den Lernenden flüssig die Arbeit im Ganzen ausführen und im Kurztext mitsprechen lassen, d. h. erklären lassen <i>was</i> geschieht und <i>wie</i> es geschieht, vgl. 2. Stufe 2.3; jeden Lernabschnitt benennen lassen; nach besonders wichtigen Arbeitsabläufen und Arbeitshinweisen fragen, insbesondere nach jenen, die dem Lernenden bisher die größten Schwierigkeiten bereiteten
4. Stufe: Abschluss / Übung (Lernender / Lehrender betont)	
<i>4.1 selbständig üben lassen</i>	voraussichtliche Dauer der Übungsarbeit mitteilen; den Lernenden auf sich selbst stellen und für längere Zeit alleine lassen;
<i>4.2 Helfer benennen</i>	Befähigter oder darauf vorbereiteter Arbeitskollege übernimmt Patenschaft für den Lernenden und steht für Fragen des Lernenden beim Üben zur Verfügung
<i>4.3 anfangs öfter nachsehen und unter Umständen helfen</i>	vgl. aber 4.1

Allgemeine Vorgehensweise	Erläuterungen
<i>4.4 Übungsfortschritt ermitteln</i>	Übungsfortschritt beobachten und vom Lernenden verfolgen lassen: Leistungskurve zusammen mit dem Lernenden aufstellen; mögliche Leistungsstillstände („Lernplateaus“) oder Leistungsrückgänge im Übungsverlauf nach anfänglich beschleunigtem Fortschritt erklären, d. h. z. B. auf die innere Verarbeitung aller aufgenommenen Eindrücke und Informationen hinweisen, vgl. Theorie des Arbeitens und Lernens, Kap. B.3.2 in [Sch-05]; massiertes Üben vermeiden: für Abwechslung und Unterbrechung bei der Übungsarbeit sorgen, d. .h. die bei der Übung beanspruchten Muskeln, Wahrnehmungs- und Denktätigkeiten entlasten
<i>4.5 Übungsarbeit anerkennen</i>	Lernfortschritte in persönlicher Ansprache herausstellen; Korrekturen an der Übungsarbeit anbringen und persönliche Kritik am Lernenden unterlassen
<i>4.6 Unterweisung förmlich beenden</i>	Lernerfolgserlebnis stiften

Tabelle D.2: Beispiele, Schlüsselbegriffe und Lerntechnologien der kognitiven Domäne nach [Blo-56, And-01, Kra-02]

Kategorie	Beispiele	Schlüsselbegriffe	Techniken
Erinnern: Aufrufen zuvor erlernter Informationen	Rezitieren Sie eine Richtlinie. Zitieren Sie Preise aus dem Gedächtnis an einen Kunden. Nenne die Sicherheitsregeln.	definiert, beschreibt, identifiziert, weiß, beschriftet, listet, gleicht ab, benennt, umreißt, erinnert, erkennt, reproduziert, wählt aus, gibt an.	Buchmarkierungen, Lernkarten, Auswendiglernen durch Wiederholung, Lesen
Verstehen: Nachvollziehen der Bedeutung, Übersetzung, Interpolation und Interpretation von Anleitungen und Problemen. Die Fähigkeit ein Problem mit eigenen Worten beschreiben zu können.	Schreibe Sie die Prinzipien des Testschreibens neu. Erklären Sie in eigenen Worten die Schritte zur Durchführung einer komplexen Aufgabe. Übersetzen Sie eine Gleichung in eine Computertabelle.	versteht, konvertiert, verteidigt, unterscheidet, schätzt, erklärt, erweitert, verallgemeinert, gibt ein Beispiel, deutet, interpretiert, paraphrasiert, sagt voraus, schreibt um, fasst zusammen, übersetzt	eine Analogie schaffen, am kooperativen Lernen teilnehmen, Notizen machen, Geschichten erzählen, Internetsuche
Anwenden: Ein Konzept in einer neuen Situation anwenden können oder abstrahieren. Der theoretisch erworbene Inhalt wird in einer neuen Situation am Arbeitsplatz angewandt.	Verwenden Sie ein Handbuch, um die Urlaubszeit eines Mitarbeiters zu berechnen. Wenden Sie die Gesetze der Statistik an, um die Zuverlässigkeit einer schriftlichen Prüfung zu bewerten.	gilt, ändert, berechnet, konstruiert, demonstriert, entdeckt, manipuliert, modifiziert, betreibt, prognostiziert, bereitet vor, produziert, bezieht sich, zeigt, löst, verwendet	kollaboratives Lernen, Prozess gestalten, Blog, Praxis
Analysieren: Zerlegen eines Konzepts oder Inhalts in seine Bestandteile, um die organisatorische Struktur zu durchdringen. Unterscheidung zwischen Fakten und Schlussfolgerungen.	Beheben Sie Fehler an einem Equipment durch logische Ableitung. Erkennen Sie logische Irrtümer in der Argumentation. Sammelt Informationen aus einer Abteilung und wählt die erforderlichen Aufgaben für die Schulung aus.	analysiert, zerlegt, vergleicht, kontrastiert, zeichnet, dekonstruiert, unterscheidet, diskriminiert, unterscheidet, identifiziert, veranschaulicht, schlussfolgert, umreißt, bezieht, selektiert, trennt, trennt	Fishbowls, debattieren, in Frage stellen, was passiert ist, einen Test durchführen

Kategorie	Beispiele	Schlüsselbegriffe	Techniken
<p>Evaluieren: Beurteilung des Werts einer Idee oder eines Konzepts.</p>	<p>Wählen Sie die effektivste Lösung. Stellen Sie den am besten qualifizierten Kandidaten ein. Erklären und begründen Sie ein neues Budget.</p>	<p>bewertet, vergleicht, schließt, kontrastiert, beanstandet, kritisiert, verteidigt, beschreibt, diskriminiert, bewertet, erklärt, interpretiert, rechtfertigt, bezieht, fasst zusammen, unterstützt</p>	<p>Umfrage, Blogging</p>
<p>Erschaffen: Kreieren einer Struktur oder eines Musters aus unterschiedlichen Elementen. Zusammenetzen von Komponenten, um ein Ganzes zu schaffen, mit Fokus auf die Erschaffung eines neuen Sinnzusammenhangs oder einer neuen Struktur.</p>	<p>Schreiben Sie ein Betriebs- oder Prozesshandbuch. Entwickeln Sie eine Maschine, die eine bestimmte Aufgabe erfüllt. Integriert Schulungen aus unterschiedlichen Quellen, um ein Problem zu lösen. Überarbeitet und verarbeitet, um das Ergebnis zu verbessern.</p>	<p>kategorisiert, kombiniert, kompiliert, komponiert, erstellt, entwirft, entwirft, erklärt, erzeugt, modifiziert, organisiert, plant, arrangiert, rekonstruiert, bezieht, reorganisiert, überarbeitet, schreibt um, fasst zusammen, erzählt, schreibt</p>	<p>ein neues Modell erstellen, einen Aufsatz schreiben, mit anderen vernetzen</p>

Tabelle D.3: Beispiele und Schlüsselbegriffe der psychomotorischen Domäne nach [Blo-56, Dav-70, And-01, Kra-02]

Kategorie	Beispiele	Schlüsselbegriffe
<p>Imitation: Beobachten und Strukturieren des Verhaltens nach jemand anderem. Die Leistung kann von geringer Qualität sein.</p>	Kopieren eines Kunstwerks. Durchführung einer Fertigkeit unter Beobachtung eines Vorführers.	kopieren, folgen, imitieren, wiederholen, replizieren, replizieren, reproduzieren, verfolgen
<p>Manipulation: In der Lage sein, bestimmte Aktionen durch Erinnern oder Befolgen von Anweisungen auszuführen.</p>	In der Lage sein, eine Fertigkeit selbstständig auszuführen, nachdem man Unterricht genommen oder darüber gelesen hat. Befolgt die Anweisungen zum Erstellen eines Modells.	handeln, bauen, ausführen, leisten
<p>Präzision: Verfeinern, genauer werden. Durchführung einer Fertigkeit mit einem hohen Maß an Präzision.</p>	Etwas bearbeiten und überarbeiten, damit es „genau richtig“ ist. Ausführen einer Fertigkeit oder Aufgabe ohne Hilfe. Demonstration einer Aufgabe für einen Anfänger.	kalibrieren, demonstrieren, meistern, perfektionistisch sein
<p>Handlungsgliederung: Koordination und Anpassung einer Reihe von Maßnahmen zur Erreichung von Harmonie und interner Konsistenz.</p>	Kombination einer Reihe von Fertigkeiten, um ein Video zu produzieren, das Musik, Theater, Farbe, Ton usw. beinhaltet. Kombination einer Reihe von Fertigkeiten oder Aktivitäten, um eine neue Anforderung zu erfüllen.	anpassen, konstruieren, kombinieren, erstellen, personalisieren, modifizieren, gestalten, formulieren
<p>Naturalisierung: Eine hohe Leistung meistern, bis sie zweitrangig oder natürlich wird, ohne viel darüber nachdenken zu müssen.</p>	Manövriert ein Auto auf einen engen, parallelen Parkplatz. Bedient einen Computer schnell und präzise. Zeigt Kompetenz beim Klavierspielen. Michael Jordan spielt Basketball oder Nancy Lopez trifft einen Golfball.	erstellen, entwerfen, entwickeln, erfinden, verwalten, natürlich

Tabelle D.4: Beispiele und Schlüsselbegriffe der affektiven Domäne nach [Blo-56, Kra-64]

Kategorie	Beispiele	Schlüsselbegriffe
<p>Aufnehmen: Bewusstsein, Hörbereitschaft, ausgewählte Aufmerksamkeit.</p>	<p>Anderen respektvoll zuhören. Auf den Namen einer unbekannt Person achten und sich daran erinnern.</p>	<p>anerkennen, fragen, aufmerksam, höflich, pflichtbewusst, folgt, gibt, hört zu, versteht</p>
<p>Reagieren: Aktive Beteiligung der Lernenden. Teilnahme und Reaktion auf ein bestimmtes Phänomen. Lernergebnisse können die Konformität bei der Reaktion, die Bereitschaft zur Reaktion oder die Zufriedenheit bei der Reaktion (Motivation) hervorheben.</p>	<p>Nimmt an Diskussionen im Unterricht teil. Gibt eine Präsentation. Stellt neue Ideale, Konzepte, Modelle usw. in Frage, um sie vollständig zu verstehen. Kennt die Sicherheitsvorschriften und praktiziert sie.</p>	<p>antwortet, unterstützt, hilft, entspricht, diskutiert, begrüßt, benennt, führt durch, präsentiert, erzählt</p>
<p>Werten: Der Wert oder Mehrwert, den eine Person einem bestimmten Objekt, Phänomen oder Verhalten beimisst. Dies reicht von der einfachen Akzeptanz bis hin zum komplexeren Zustand des Engagements. Die Bewertung basiert auf der Internalisierung einer Reihe von vorgegebenen Werten, während Hinweise auf diese Werte im offensichtlichen Verhalten des Lernenden zum Ausdruck kommen und oft identifizierbar sind.</p>	<p>Zeigt den Glauben an den demokratischen Prozess. Ist sensibel für individuelle und kulturelle Unterschiede (Wertevielfalt). Zeigt die Fähigkeit, Probleme zu lösen. Schlägt einen Plan zur sozialen Verbesserung vor und setzt ihn mit Engagement um. Informiert die Geschäftsleitung über Themen, die einem am Herzen liegen.</p>	<p>würdigt, wertschätzt, schätzt, demonstriert, initiiert, einlädt, verbindet, rechtfertigt, schlägt vor, respektiert, teilt</p>

Kategorie	Beispiele	Schlüsselbegriffe
<p>Wertordnung: Organisiert Werte in Prioritäten, indem er unterschiedliche Werte gegenüberstellt, Konflikte zwischen ihnen löst und ein einzigartiges Wertesystem schafft. Der Schwerpunkt liegt auf dem Vergleich, der Beziehung und der Synthese von Werten.</p>	<p>Erkennt die Notwendigkeit eines Gleichgewichts zwischen Freiheit und verantwortungsvollem Verhalten. Erklärt die Rolle der systematischen Planung bei der Problemlösung. Akzeptiert professionelle ethische Standards. Erstellt einen Lebensplan in Harmonie mit Fähigkeiten, Interessen und Überzeugungen. Priorisiert Zeit effektiv, um die Bedürfnisse von Unternehmen, Familie und Selbst zu erfüllen.</p>	<p>vergleicht, bezieht, synthetisiert</p>
<p>Bestimmtsein durch Werte: (Charakterisierung): Hat ein Wertesystem, das ihr Verhalten steuert. Das Verhalten ist allgegenwärtig, konsistent, vorhersehbar und das wichtigste Merkmal des Lernenden. Die Unterrichtsziele befassen sich mit den allgemeinen Anpassungsmustern des Schülers (persönlich, sozial, emotional).</p>	<p>Zeigt Eigenständigkeit bei selbständigem Arbeiten. Arbeitet in Gruppenaktivitäten zusammen (zeigt Teamarbeit). Verwendet einen objektiven Ansatz zur Problemlösung. Zeigt ein professionelles Engagement für ethisches Handeln auf täglicher Basis. Überarbeitet Urteile und ändert das Verhalten im Hinblick auf neue Erkenntnisse. Schätzt Menschen als das, was sie sind, nicht als das, was sie aussehen.</p>	<p>handelt, unterscheidet, zeigt, beeinflusst, modifiziert, führt durch, qualifiziert, hinterfragt, überarbeitet, dient, löst, prüft, überprüft</p>

Anhang E: Übersicht AR-Brillen

Tabelle E.1: Übersicht aktueller AR-Brillen für industrielle Anwendungen

Eigenschaften	Realwear HMT-1	Epson BT 350	ODG R7 HL	Vuzix M300	Google Glass	HoloLens
Verfügbar seit	2017	2017	2017	2016	2015	2016
Preis	1800 EUR	892 EUR	3450 EUR	1699 EUR	1600 EUR	3299 EUR
Typ	monokular	binokular	binokular	monokular	monokular	binokular
Holografisch	nein	nein	nein	nein	nein	ja
Betriebssystem	Android 6	Android 5	Android 6	Android 6	Android 4	Windows 10
Prozessor	2.0 GHz, 8-core	1.44 GHz, 4- core	4-core	2-core Intel Atom	Intel Atom	x5-Z8100 1,04 GHz
Auflösung (Foto)	16 MP	5 MP	4 MP	10 MP	5 MP	2 MP
Auflösung (Video)	1080p	1080p	1080p	1080p	720p	720p
Autofokus (Kamera)	1080p	1080p	1080p	1080p	720p	720p
Gewicht	380 g	198 g	225 g	140 g	43 g	579 g
Batterie	3250 mAh	2950 mAh	1300 mAh	1020 mAh	780 mAh	16500 mAh
Wechselbare Batterie	ja	nein	nein	nein	nein	nein
IP Klasse	66	0	0	0	0	0
ATEX zertifiziert	nein	nein	ja	nein	nein	nein
Display Größe	854 × 480	1280 × 720	1280 × 720	640 × 360	640 × 360	1268 × 720
Freiheitsgrade Display	3	keine	keine	3	1	keine
Sichtfeld	20°	23°	30°	17°	0°	30°
Anzahl Kameras	1	1	1	1	1	4
Anzahl Mikrofone	4	1	2	1	2	1
Anzahl Lautsprecher	2	2	2	1	1	4
Gyroskop	ja	ja	ja	ja	nein	ja
Beschleunigungssensor	ja	ja	ja	ja	nein	ja
GPS	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Taschenlampe	ja	nein	ja	nein	nein	nein
SD Karte	nein	ja	nein	nein	nein	nein
SIM Karte	nein	nein	nein	nein	nein	nein
USB Anschluss	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Bluetooth	ja	ja	ja	ja	ja	ja
NFC Sensor	nein	nein	nein	nein	nein	nein
WLAN	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Sprachsteuerung	ja	nein	nein	nein	ja	ja
Gestensteuerung	nein	nein	nein	nein	nein	ja
Tiefensensor	nein	nein	nein	nein	nein	ja
Quelle	[Rea-18]	[Eps-18]	[ODG-18]	[Vuz-18]	[Goo-18]	[Mic-18]

Anhang F: Lernzeugveröffentlichungen

Tabelle F.1: Bisherige Veröffentlichungen zu Lernzeugen

Jahr	Erstautor	Titel
2009	Seliger, G.	Outcome-oriented Learning Environment for Sustainable Engineering Education [Sel-09]
2011	Postawa, A.B.	Training on the Job in Remanufacturing supported by Information Technology Systems [Pos-11]
2012	Grismaijer, M	Information Requirement for Motivated Alignment of Manufacturing Operations to Energy Availability [Gri-12]
2012	Seliger, G.	Zukunftsfähig produzieren weltweit [Sel-12b]
2013	McFarland, R.	Learnstruments in value creation and learning centeres work place design [McF-13]
2013	Postawa, A.B.	Werker- Assistenz und Qualifizierung für manuelle (De-) Montage durch bild- und schriftgestützte Visualisierung am Arbeitsplatz [Pos-13]
2014	Heyer, S.	Enabling of local Value Creation via Openness for Emergent Synthesis [Hey-14]
2014	McFarland, R.	Learnstruments, Lern- und Arbeitsmittel für die Montage [McF-14]
2015	Gausemeier, P.	Pathways for sustainable technology development - The case of bicycle mobility in Berlin [Gau-15]
2015	Menn, J.P.	Generic model for international assembly instructions for special machinery assembly [Men-15]
2015	Müller, B.C.	Gamification in factory management education: a case study with Lego Mindstorms [Mül-15]
2015	Muschar, B.	Realization of a learning environment to promote sustainable value creation in areas with insufficient infrastructure [Mus-15]
2015	Nguyen, T.D.	Adaptive qualification and assistance modules for manual assembly workplaces [Ngu-15]
2015	Severengiz, M.	Enhancing Technological Innovation with the Implementation of a Sustainable Manufacturing Community [Sev-15]
2016	Menn, J.P.	Increasing knowledge and skills for assembly processes through interactive 3D-PDFs [Men-16]
2016	Müller, B.C.	Motion tracking applied in assembly for worker training in different locations [Mül-16a]
2016	Müller, B.C.	Simulation-games for learning conducive workplaces: a case study for manual assembly [Mül-16b]
2016	Stock, T.	Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0 [Sto-16]
2017	Jovane, F.	Competitive Sustainable Globalization General Considerations and Perspectives [Jov-17]
2017	Müller, B.C.	Mobile Lernumgebung zur simulativen Gestaltung von Produktionssystemen [Mül-17]
2017	Palacios, J.	Contribution to the development of technology-enhanced education in manufacturing and energy generation [Pal-17]
2017	Menn, J.P.	Language independent transfer of assembly knowledge [Men-17]
2018	Menn, J.P.	Learnstruments: learning-conducive artefacts to foster learning productivity in production engineering [Men-18c]
2018	Menn, J.P.	First proof of concept for language independant learnstruments in special machinery [Men-18a]
2018	Menn, J.P.	Learning process planning for special machinery assembly [Men-18b]
2019	Menn, J.P.	MAN Learning Factory at MAN Diesel & Turbo SE in Berlin, Germany [Men-19]
2020	Menn, J.P.	Augmented Learning for Industrial Education [Men-20]

Anhang G: Wirtschaftliche Bewertungen

Tabelle G.1: Wirtschaftliche Bewertung der AR-App im Sondermaschinenbau

Investitionskosten				
Posten	Formel(zeichen)	Anzahl	Einzelkosten	Gesamtkosten
3D-Druck Filament				2.000,00 Euro
Koffer und Sensorik				500,00 Euro
Bluetooth Controller		15	37,00 Euro	555,00 Euro
VR Brille		15	20,00 Euro	300,00 Euro
PC und Monitor		3	1.500,00 Euro	4.500,00 Euro
Unity		3	1.000,00 Euro	3.000,00 Euro
Vuforia		1	500,00 Euro	500,00 Euro
Softwareentwicklung Konzept		60 h	34,40 Euro/h	2.064,02 Euro
Softwareentwicklung Programmierung		1500 h	13,83 Euro/h	20.745,00 Euro
Gesamtinvestment	I			34.164,02 Euro
Jährliche Kosten				
Nutzungsdauer	T			5,00 a
Kalkulatorische Abschreibung	$A=I/T$			6.832,80 Euro/a
Kalkulatorischer Zinssatz	i			5,00 %
Kalkulatorische Zinsen	$Z=i*I/2$			854,10 Euro/a
Instandhaltungskosten	W			1.000,00 Euro/a
Gesamtkosten pro Jahr	$F=A+Z+W$			8.686,91 Euro/a
Jährliche Nutzeneffekte				
Anzahl jährlicher Trainings	Z	2		
Personalkosten Trainingsteilnehmer pro Stunde	P1	15	170 Euro/h	2.550,00 Euro/h
Personalkosten Trainer pro Stunde	P2	1	200 Euro/h	200,00 Euro/h
Personalkosten pro Stunde	$P=P1+P2$			2.750,00 Euro/h
Anteilige Zeiteinsparung	e			30,00 %
Zeiteinsparungsfaktor bei Einsatz der App	$E=1/(1-e)$			1,43 h/h
Nutzungsdauer pro Teilnehmer und Training	N1			1,00 h/Teilnehmer
Nutzungsdauer des Systems pro Jahr	$N=Z*P1*N1$			30,00 h/a
Gesamtnutzen des Systems	$S=P*(E-1)*N$			35.357,14 Euro/a
Amortisationszeit <i>static</i>	$D=I/(S-F+A)$			2,16 a

Tabelle G.2: Wirtschaftliche Bewertung der HoloLens im Sondermaschinenbau

Investitionskosten					
	Posten	Formel(zeichen)	Anzahl	Einzelkosten	Gesamtkosten
	MS HoloLens		5	3.299,00 Euro	16.495,00 Euro
	PC und Monitor		2	1.500,00 Euro	3.000,00 Euro
	Unity		2	1.000,00 Euro	2.000,00 Euro
	Vuforia		1	500,00 Euro	500,00 Euro
	Softwareentwicklung Konzept		130 h	34,40 Euro/h	4.472,05 Euro
	Softwareentwicklung Programmierung		533 h	13,83 Euro/h	7.371.39,00 Euro
	Gesamtinvestment	I			33.838,44 Euro
Jährliche Kosten					
	Nutzungsdauer	T			5,00 a
	Kalkulatorische Abschreibung	$A=I/T$			6.767,69 Euro/a
	Kalkulatorischer Zinssatz	i			5,00 %
	Kalkulatorische Zinsen	$Z=i*I/2$			845,96 Euro/a
	Instandhaltungskosten	W			5.000,00 Euro/a
	Gesamtkosten pro Jahr	$F=A+Z+W$			12.613,65 Euro/a
Jährliche Nutzeneffekte					
	Anzahl jährlicher Trainings	Z	2		
	Personalkosten Trainingsteilnehmer pro Stunde	P1	15	170,00 Euro/h	2.550,00 Euro/h
	Personalkosten Trainer pro Stunde	P2	1	200,00 Euro/h	200,00 Euro/h
	Personalkosten pro Stunde	$P=P1+P2$			2.750,00 Euro/h
	Anteilige Zeiteinsparung	e			10,00 %
	Zeiteinsparungsfaktor bei Einsatz der HoloLens	$E=1/(1-e)$			1,11 h/h
	Nutzungsdauer pro Teilnehmer und Training	N1			3,00 h/Teilnehmer
	Nutzungsdauer des Systems pro Jahr	$N=Z*P1*N1$			90,00 h/a
	Gesamtnutzen des Systems	$S=P*(E-1)*N$			27.500,00 Euro/a
	Amortisationszeit <i>statisch</i>	$D=I/(S-F+A)$			1,56 a

Tabelle G.3: Wirtschaftliche Bewertung des 3D-PDFs im Sondermaschinenbau

Investitionskosten					
	Posten	Formel(zeichen)	Anzahl	Einzelkosten	Gesamtkosten
	Software Tetra4D		3 Jahre	500 Euro	1.500,00 Euro
	PC und Monitor		1	1.500,00Euro Euro	1.500,00Euro
	Softwareentwicklung Konzept		100 h	34,40 Euro/h	3.440,04 Euro
	Softwareentwicklung Programmierung		60 h	34,40 Euro/h	20.640,24 Euro
	Gesamtinvestment	I			27.080,28 Euro
Jährliche Kosten					
	Nutzungsdauer	T			5,00 a
	Kalkulatorische Abschreibung	$A=I/T$			5.416,06 Euro/a
	Kalkulatorischer Zinssatz	i			5,00 %
	Kalkulatorische Zinsen	$Z=i*I/2$			677,01 Euro/a
	Instandhaltungskosten	W			1.000,00 Euro/a
	Gesamtkosten pro Jahr	$F=A+Z+W$			7.093,06 Euro/a
Jährliche Nutzeneffekte					
	Anzahl jährlicher Trainings	Z	2		
	Personalkosten Trainingsteilnehmer pro Stunde	P1	15	170,00 Euro/h	2.550,00 Euro/h
	Personalkosten Trainer pro Stunde	P2	1	200 Euro/h	200,00 Euro/h
	Personalkosten pro Stunde	$P=P1+P2$			2.550,00 Euro/h
	Anteilige Zeiteinsparung	e			15,00 %
	Zeiteinsparungsfaktor bei Einsatz des 3D-PDFs	$E=1/(1-e)$			1,18 h/h
	Nutzungsdauer pro Teilnehmer und Training	N1			1,50 h/Teilnehmer
	Nutzungsdauer des Systems pro Jahr	$N=Z*P1*N1$			45,00 h/a
	Gesamtnutzen des Systems	$S=P*(E-1)*N$			21.838,24 Euro/a
	Amortisationszeit <i>statisch</i>	$D=I/(S-F+A)$			1,34 a

Tabelle G.4: Wirtschaftliche Bewertung der AR-App in der Serienproduktion

Investitionskosten					
	Posten	Formel(zeichen)	Anzahl	Einzelkosten	Gesamtkosten
	3D-Druck Filament				2.000,00 Euro
	Koffer und Sensorik				500,00 Euro
	Bluetooth Controller		10	37,00 Euro	370,00 Euro
	VR Brille		10	20,00 Euro	200,00 Euro
	PC und Monitor		3	1.500,00 Euro	4.500,00 Euro
	Unity		3	1.000,00 Euro	3.000,00 Euro
	Vuforia		1	500,00 Euro	500,00 Euro
	Softwareentwicklung Konzept		60 h	34,40 Euro/h	2.064,02 Euro
	Softwareentwicklung Programmierung		1500 h	13,83 Euro/h	20.745,00 Euro
	Gesamtinvestment	I			33.879,02 Euro
Jährliche Kosten					
	Nutzungsdauer	T			5,00 a
	Kalkulatorische Abschreibung	$A=I/T$			6.775,80 Euro/a
	Kalkulatorischer Zinssatz	i			5,00 %
	Kalkulatorische Zinsen	$Z=i*I/2$			846,98 Euro/a
	Instandhaltungskosten	W			1.000,00 Euro/a
	Gesamtkosten pro Jahr	$F=A+Z+W$			8.622,78 Euro/a
Jährliche Nutzeneffekte					
	Anzahl jährlicher Trainings	Z	10		
Personalkosten	Trainingsteilnehmer pro Stunde	P1	15	30 Euro/h	300,00 Euro/h
Personalkosten	Trainer pro Stunde	P2	1	80 Euro/h	80,00 Euro/h
Personalkosten	pro Stunde	$P=P1+P2$			380,00 Euro/h
	Anteilige Zeiteinsparung	e			30,00 %
	Zeiteinsparungsfaktor bei Einsatz der App	$E=1/(1-e)$			1,43 h/h
	Nutzungsdauer pro Teilnehmer und Training	N1			1,00 h/Teilnehmer
	Nutzungsdauer des Systems pro Jahr	$N=Z*P1*N1$			100,00 h/a
	Gesamtnutzen des Systems	$S=P*(E-1)*N$			16.285,71 Euro/a
	Amortisationszeit <i>statisch</i>	$D=I/(S-F+A)$			2,35 a

Der Gesamtnutzen des Systems fällt bei der AR-App aufgrund der niedrigeren Gehaltskosten deutlich geringer aus als im Sondermaschinenbau. Die Amortisationszeit konnte jedoch aufgrund der höheren Teilnehmerzahlen und der geringeren Investitionskosten annähernd konstant gehalten werden. Die geringeren Investitionskosten ergeben sich durch kleinere Gruppengrößen. Nicht mit einbezogen wurden hierbei die Nutzeneffekte aufgrund geringerer Fehlerzahlen in den Montagevorgängen.

Tabelle G.5: Wirtschaftliche Bewertung der HoloLens in der Serienproduktion

Investitionskosten					
	Posten	Formel(zeichen)	Anzahl	Einzelkosten	Gesamtkosten
	MS HoloLens		3	3.299,00 Euro	9.897,00 Euro
	PC und Monitor		2	1.500,00 Euro	3.000,00 Euro
	Unity		2	1.000,00 Euro	2.000,00 Euro
	Vuforia		1	500,00 Euro	500,00 Euro
	Softwareentwicklung Konzept		130 h	34,40 Euro/h	4.472,05 Euro
	Softwareentwicklung Programmierung		533 h	13,83 Euro/h	7.371.39,00 Euro
	Gesamtinvestment	I			27.240,44 Euro
Jährliche Kosten					
	Nutzungsdauer	T			5,00 a
	Kalkulatorische Abschreibung	$A=I/T$			5.448,09 Euro/a
	Kalkulatorischer Zinssatz	i			5,00 %
	Kalkulatorische Zinsen	$Z=i*I/2$			681,01 Euro/a
	Instandhaltungskosten	W			5.000,00 Euro/a
	Gesamtkosten pro Jahr	$F=A+Z+W$			11.129,10 Euro/a
Jährliche Nutzeneffekte					
	Anzahl jährlicher Trainings	Z	10		
	Personalkosten Trainingsteilnehmer pro Stunde	P1	10	30,00 Euro/h	300,00 Euro/h
	Personalkosten Trainer pro Stunde	P2	1	80,00 Euro/h	80,00 Euro/h
	Personalkosten pro Stunde	$P=P1+P2$			380,00 Euro/h
	Anteilige Zeiteinsparung	e			10,00 %
	Zeiteinsparungsfaktor bei Einsatz der HoloLens	$E=1/(1-e)$			1,11 h/h
	Nutzungsdauer pro Teilnehmer und Training	N1			3,00 h/Teilnehmer
	Nutzungsdauer des Systems pro Jahr	$N=Z*P1*N1$			300,00 h/a
	Gesamtnutzen des Systems	$S=P*(E-1)*N$			12.666,67 Euro/a
	Amortisationszeit <i>statisch</i>	$D=I/(S-F+A)$			3,90 a

Der Gesamtnutzen des Systems fällt auch bei der HoloLens aufgrund der geringeren Gehaltskosten in der Serienfertigung deutlich geringer aus als im Sondermaschinenbau. Die Investitionskosten sind aufgrund der hohen Entwicklungskosten jedoch kaum geringer, obwohl hier nur 60 % der Hardwarekosten anfallen. Die Entwicklungskosten können zwar auf höhere Stückzahlen umgelegt werden, das Einsparungspotenzial aufgrund schnellerer Anlernprozesse fällt jedoch geringer aus. Auch hier wurden die Nutzeneffekte aufgrund geringerer Fehlerzahlen in den Montagevorgängen nicht mit einbezogen.

Tabelle G.6: Wirtschaftliche Bewertung des 3D-PDFs in der Serienproduktion

Investitionskosten					
	Posten	Formel(zeichen)	Anzahl	Einzelkosten	Gesamtkosten
	Software Tetra4D		3 Jahre	500 Euro	1.500,00 Euro
	PC und Monitor		1	1.500,00Euro Euro	1.500,00Euro
	Softwareentwicklung Konzept		100 h	34,40 Euro/h	3.440,04 Euro
	Softwareentwicklung Programmierung		60 h	34,40 Euro/h	20.640,24 Euro
	Gesamtinvestment	I			27.080,28 Euro
Jährliche Kosten					
	Nutzungsdauer	T			5,00 a
	Kalkulatorische Abschreibung	$A=I/T$			5.416,06 Euro/a
	Kalkulatorischer Zinssatz	i			5,00 %
	Kalkulatorische Zinsen	$Z=i*I/2$			677,01 Euro/a
	Instandhaltungskosten	W			1.000,00 Euro/a
	Gesamtkosten pro Jahr	$F=A+Z+W$			7.093,06 Euro/a
Jährliche Nutzeneffekte					
	Anzahl jährlicher Trainings	Z	2		
	Personalkosten Trainingsteilnehmer pro Stunde	P1	10	30,00 Euro/h	2.550,00 Euro/h
	Personalkosten Trainer pro Stunde	P2	1	80 Euro/h	80,00 Euro/h
	Personalkosten pro Stunde	$P=P1+P2$			380,00 Euro/h
	Anteilige Zeiteinsparung	e			15,00 %
	Zeiteinsparungsfaktor bei Einsatz des 3D-PDFs	$E=1/(1-e)$			1,18 h/h
	Nutzungsdauer pro Teilnehmer und Training	N1			1,50 h/Teilnehmer
	Nutzungsdauer des Systems pro Jahr	$N=Z*P1*N1$			150,00 h/a
	Gesamtnutzen des Systems	$S=P*(E-1)*N$			10.058,82 Euro/a
	Amortisationszeit <i>statisch</i>	$D=I/(S-F+A)$			3,23 a

Da für die Nutzung des 3D-PDFs weiterhin die bereits vorhandenen Darstellungsgeräte genutzt werden können, ändern sich Investitions- und jährliche Kosten gegenüber dem Sondermaschinenbau nicht. Trotz einer höheren Zahl an Trainingsteilnehmern, ist es auch bei dem 3D-PDF aufgrund der geringeren Personalkosten nicht möglich, einen vergleichbar hohen jährlichen Gesamtnutzen zu erreichen. Hierdurch bedingt steigt die Amortisationszeit fast um das Dreifache im Vergleich zum Sondermaschinenbau.