

Etablierung der Autorenrolle als Merkmal beruflicher Bildung im Umgang mit Augmented Reality

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades Dr. phil.

vorgelegt von

Alexander Reineking, M.Sc.

eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät der

Universität Siegen

Siegen 2023

Betreuer und erster Gutachter

Univ.-Prof. Dr. phil. Ralph Dreher

Universität Siegen

Zweiter Gutachter

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Burggräf

Universität Siegen

Tag der mündlichen Prüfung

22.05.2024

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Technikdidaktik am Berufskolleg der Universität Siegen. Über den Zeitraum der Entstehung dieser Arbeit haben mich zahlreiche Menschen begleitet, denen ich an dieser Stelle aufrichtig danken möchte.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Ralph Dreher, der durch seine umfangreiche Betreuung und wertvollen Anregungen zum Gelingen dieser Arbeit beitrug. Ihm und Frau Prof. Dr. Ulrike Buchmann danke ich herzlich für die dreieinhalb Jahre, in denen ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter für das BMBF geförderte Projekt FAKTUR arbeiten durfte, was die Erstellung dieser Dissertation erst ermöglicht hat. Herrn Prof. Dr. Peter Burggräf danke ich vielmals für die Übernahme und Erstellung des Zweitgutachtens.

Bei meinen ehemaligen Kollegen möchte ich mich für die großartige Zeit am TVD bedanken. Ich hatte das Glück, in einem sehr harmonischen und hilfsbereiten Team zu arbeiten - die Zeit mit euch werde ich nie vergessen. Besonders möchte ich mich bei Jens Jüngst, Simon Schneider und Tiana Hoogstraten bedanken, die mir während meiner Forschungsaktivitäten sowie im Privaten mit Rat und Tat zur Seite gestanden haben.

Darüber hinaus danke ich der Firma Achenbach Buschhütten, ohne die meine Forschung keine derartige Praxisnähe hätte erreichen können. Insbesondere bedanke ich mich bei Frank Schuchardt, Nico Schäfer, Richard Brenner und Marc Schäl für die konstruktive Zusammenarbeit bei meinen Projektaktivitäten. Mein Dank gilt auch allen Probanden, die an den Versuchsreihen dieser Arbeit teilgenommen haben.

Mein persönlicher Dank gilt Hannah Engelhardt, die sich ohne zu zögern bereit erklärt hat, die gesamte Dissertation Korrektur zu lesen.

Zuletzt gebührt mein innigster Dank meiner Ehefrau Tabea, die mich durch den Promotionsprozess begleitet und uneingeschränkt unterstützt, motiviert und gestärkt hat. Dir widme ich diese Arbeit.

Siegen, Oktober 2023

Zusammenfassung

Die vierte industrielle Revolution beeinflusst zunehmend die Ingenieur- und Facharbeiterausbildung. „Industrie 4.0“-Technologien, welche einen massentauglichen Reifegrad erreichen, müssen stärker in betrieblichen Ausbildungsstätten integriert werden, um die Wettbewerbsposition kleiner und mittelständischer Unternehmen zu sichern. In diesem Forschungsbeitrag wird eine praxisorientierte Möglichkeit vorgestellt, um Fachkräfte, Auszubildende und Studierende des gewerblich-technischen Sektors auf zukünftige Herausforderungen in der digitalisierten Arbeitswelt vorzubereiten. Dies wird durch die Verwendung eines AR-gestützten Autorensystems erreicht, welches den Anwendern erlaubt, eigene Wissensinhalte in das System einzubringen und somit aktiv an Veränderungen ihres betrieblichen Arbeitsplatzes mitzuwirken. Das Hauptziel dieses Forschungsbeitrags liegt auf der Untersuchung, ob der Einsatz eines AR-Systems einen Beitrag zur Offenlegung und Weitergabe von impliziten Wissensinhalten der Nutzer bei Montageaufgaben leisten kann.

Um dieses Ziel zu erreichen, ist der Forschungsrahmen nach dem Prinzip des Design-Based Research gestaltet, das auf praxisnaher und gestaltungsorientierter Forschung basiert. Dies umfasst mehrere Entwicklungs-, Erprobungs-, Analyse- und Überarbeitungszyklen unter Anwendung berufswissenschaftlicher Methoden, welche in insgesamt drei Praxisszenarien zum Einsatz kommen. Dabei verfolgt jedes Praxisszenario ein spezifisches Teilziel: Erstens die Bewertung verschiedener AR-Systeme und deren Funktionalität für das Forschungsvorhaben. Zweitens die Wirksamkeit des Wissenstransfers anhand eines selbstkonstruierten Montage-Prototyps. Und drittens die Überprüfung des Wissenstransfers bei einem realen Montageszenario, welches in Kooperation mit einem Industriepartner erfolgte. In allen Montageszenarien kann ein positiver Nutzen des AR-Systems für den Wissenstransfer festgestellt werden. Basierend auf den Erkenntnissen und Erfahrungen dieser Forschungsarbeit werden abschließend Empfehlungen für die zukünftige Nutzung von AR-Autorensystemen gegeben.

Abstract

The fourth industrial revolution is increasingly influencing the training of engineers and skilled workers. „Industry 4.0“ technologies, which are reaching a level of mainstream maturity, need to be integrated more strongly into vocational training facilities in order to secure the competitive position of small and medium-sized enterprises. This thesis introduces a practice-oriented approach to prepare skilled workers, apprentices and students from the industrial-technical sector for future challenges in the digitalized working environment. This is achieved by using an AR-supported authoring system that allows users to contribute their own knowledge content to the system and thus actively participate in changing their operational workplace. The main objective is to investigate whether the use of an AR-system can contribute to the disclosure and transfer of tacit knowledge of users during assembly tasks.

To achieve this goal, the research framework is designed according to the Design-Based Research principle, which is based on practical and design-oriented research. This includes several cycles of development, testing, analysis and revision using vocational science methods, which are utilized in a total of three practical scenarios. Each scenario pursues a specific sub-goal: First, the evaluation of different AR-systems and their functionality for the research project. Second, the effectiveness of knowledge transfer using a self-constructed assembly prototype. And third, the testing of the knowledge transfer in a real assembly scenario, carried out in cooperation with an industrial partner. In all assembly scenarios, a positive benefit of the AR-system for knowledge transfer was observed. Based on the findings and experiences of this research, recommendations for the future use of AR authoring systems are presented in conclusion.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Zusammenfassung	II
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Aufbau der Arbeit.....	2
2 Augmented Reality in der beruflichen Bildung	5
2.1 AR als Teil von Industrie 4.0 im gewerblich- technischen Sektor	5
2.2 Industrie 4.0 - Qualifizierung von Facharbeit bei wachsender Digitalisierung	9
2.3 Grundlagen und Forschungsstand zu AR.....	11
2.3.1 Augmented Reality - Stand der Technologie	13
2.3.2 AR-Systeme in Forschung und Praxis	16
2.3.3 Problemaufriss	18
2.4 Arbeitsprozesswissen als Teil beruflicher Kompetenz.....	19
2.5 Autorensysteme im Berufsbildungsbereich	23
3 Bewertung sowie Forschungs- und Handlungsbedarf	25
4 Methodisches Vorgehen	29
4.1 Wissenspsychologische Grundlage.....	29
4.1.1 Theoretischer Ansatz zum Erwerb von Arbeitsprozesswissen	31
4.1.2 Wissensrekonstruktion und -darbietung durch Chunks.....	34
4.1.3 Kommunikation von Wissen.....	36

4.2	AR-Autorensystem.....	39
4.2.1	Interaktionsdesign.....	40
4.2.2	Multimediasdesign.....	41
4.2.3	Implementierung.....	42
4.3	Methoden zur Offenlegung von Arbeitsprozesswissen.....	43
4.3.1	Rolle des Forschers.....	44
4.3.2	Berufswissenschaftliche Arbeitsbeobachtung.....	45
4.3.3	Handlungsorientiertes Fachinterview.....	46
4.3.4	Experten-Facharbeiter-Workshop und Masterlösung.....	48
4.3.5	Didaktische Nutzung von Fehlern.....	49
4.3.6	Zusammenfassung.....	49
4.4	Methoden zur Evaluation.....	51
4.4.1	Leitfadeninterviews.....	51
4.4.2	Fragebogenerhebung zur Evaluation.....	52
4.4.3	Kompetenzmessung mit COMET.....	52
5	Einsatz des Design-Based Research Verfahrens.....	59
5.1	Forschungsdesign.....	59
5.1.1	Grundlegende Merkmale und Prinzipien von DBR.....	59
5.1.2	DBR-Konzept für diese Forschungsarbeit.....	61
5.2	DBR-Zyklus 1: Sickenvorrichtung (SVR).....	64
5.2.1	Forschungssetting und Rahmenbedingungen.....	64
5.2.2	Phase 1: Entwicklung des Montageszenarios SVR.....	67
5.2.3	Phase 1: Erprobung des ersten Montageszenarios.....	71
5.2.4	Phase 1: Analyse des ersten Montageszenarios.....	74
5.2.5	Phase 2: Entwicklung (Schwerpunkt Tablet-Nutzung).....	77
5.2.6	Phase 2: Erprobung (Schwerpunkt Tablet-Nutzung).....	81
5.2.7	Phase 2: Analyse (Schwerpunkt Tablet-Nutzung).....	82
5.2.8	Zusammenfassung und Teilergebnisse des ersten DBR-Zyklus.....	83
5.3	DBR-Zyklus 2: Radialwellendichtring (RWD).....	86
5.3.1	Didaktischer Rahmen.....	87
5.3.2	Phase 1: Entwicklung des Montageszenarios RWD.....	90
5.3.3	Phase 1: Erprobung des zweiten Montageszenarios.....	95

5.3.4	Phase 1: Analyse des zweiten Montageszenarios.....	99
5.3.5	Phase 2: Entwicklung (optimierte Montageanleitung).....	100
5.3.6	Phase 2: Erprobung (optimierte Montageanleitung).....	102
5.3.7	Phase 2: Analyse (optimierte Montageanleitung).....	104
5.3.8	Zusammenfassung und Teilergebnisse des zweiten DBR-Zyklus.....	105
5.4	DBR-Zyklus 3: Doppelmembranzylinder (DMZ).....	108
5.4.1	Arbeitssetting und didaktischer Rahmen.....	109
5.4.2	Phase 1: Entwicklung des Montageszenarios DMZ.....	110
5.4.3	Phase 1: Erprobung des dritten Montageszenarios.....	115
5.4.4	Phase 1: Analyse des dritten Montageszenarios.....	121
5.4.5	Phase 2: Entwicklung (optimierte Montageanleitung).....	122
5.4.6	Phase 2: Erprobung (optimierte Montageanleitung).....	123
5.4.7	Phase 2: Analyse (optimierte Montageanleitung).....	126
5.4.8	Kompetenzmessung mit COMET.....	129
5.4.9	Zusammenfassung und Teilergebnisse des dritten DBR-Zyklus.....	133
5.5	Zusammenfassung des Kapitels.....	135
6	Bewertung der Forschungsfrage und Ergebnisdarstellung	139
6.1	Beantwortung der Forschungsfrage.....	139
6.2	Theoriebestätigung.....	140
6.3	Analyse der offengelegten Chunks.....	144
6.4	Handlungsempfehlungen.....	147
7	Fazit und Ausblick	151
7.1	Fazit.....	151
7.2	Ausblick.....	151
	Literaturverzeichnis	154
	Anhang	169
A1	Fragebogen zur Montage des Doppelmembranzylinders.....	170
A2	Bewertungsbogen COMET (gewerblich-technische Berufe).....	172
A3	Montageanleitung Sickenvorrichtung (Hololens 2).....	174
A4	RWD Einbauvorrichtung: Technische Zeichnung.....	179

A5	Montageschritte Radialwellendichtring (iPad Pro)	180
A6	DMZ Halterung: Technische Zeichnung	183
A7	Auswertung der Fragebögen zum DMZ.....	184
A8	Versuchsaufbau und offengelegte Chunks des Doppelmembranzylinders im Autorensystem	185
A9	Lösungsraum: COMET-Aufgabe DMZ.....	187
A10	COMET Einzelratings	188
	Eidesstattliche Erklärung	190

Abkürzungsverzeichnis

ACT	Adaptive Control of Thought
AV	Augmented Virtuality
AR	Augmented Reality
bzw.	Beziehungsweise
CAD	Computer-Aided Design
CLT	Cognitive Load Theory
DBR	Design-Based Research
DMZ	Doppelmembranzylinder
EFW	Experten-Facharbeiter-Workshop
IoT	Internet of Things
IT	Informationstechnik
KFZ	Kraftfahrzeug
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen
KI	Künstliche Intelligenz
LiDAR	Light Detection and Ranging
MR	Mixed Reality
RWD	Radialwellendichtring
SVR	Sickenvorrichtung
syn.	synonymisch
TVD	Technical Vocational Didactics (Technikdidaktik am Berufskolleg)
vgl.	vergleiche
VR	Virtual Reality

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Verlaufskurve dieser Arbeit	3
Abbildung 2.1: Die vier Stufen der industriellen Revolution.....	5
Abbildung 2.2: Gartner Hype Cycle für AR: Jahrgänge 2004-2018.....	7
Abbildung 2.3: Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum	12
Abbildung 2.4: Komponenten eines AR-Systems.....	14
Abbildung 2.5: Dimensionen des Gesamtarbeitsprozesses	20
Abbildung 2.6: Einordnung des Arbeitsprozesswissens	22
Abbildung 3.1: Arbeitsprozess und Automatisierung von Prozentscheidungen	25
Abbildung 4.1: Drei Phasen der ACT-Theorie nach <i>Anderson</i>	33
Abbildung 4.2: Negatives Tuning als Phase der ACT-Theorie	34
Abbildung 4.3: Elemente der Kommunikation nach <i>Shannon</i> und <i>Weaver</i>	37
Abbildung 4.4: Sender-Empfänger-Modell mit Berücksichtigung von Chunks ..	39
Abbildung 4.5: Kommunikation im AR-Autorensystem.....	40
Abbildung 4.6: Kriterien der vollständigen Handlung beruflicher Aufgaben	56
Abbildung 5.1: Forschungsdesign der vorliegenden Studie	63
Abbildung 5.2: Werkstatt und CAD-Labor des TVD	65
Abbildung 5.3: Campus Buschhütten	66
Abbildung 5.4: Baugruppe Sickenvorrichtung	67
Abbildung 5.5: Walzen einer Sicke in Papier.....	68
Abbildung 5.6: Sickenvorrichtung (demontiert).....	69
Abbildung 5.7: Wichtige Elemente des Autorentools (Vuforia Studio).....	71
Abbildung 5.8: Virtuelle Umgebung vs. Digitale Umgebung (Vuforia Studio)....	73
Abbildung 5.9: Aufbau der Bedienelemente beim Tablet	74
Abbildung 5.10: Wichtige Elemente des Autorentools (3DQR)	78
Abbildung 5.11: 3DQR – AR-Ansicht und 3D-Ansicht	79
Abbildung 5.12: Wichtige Elemente des Autorentools (JigSpace)	80
Abbildung 5.13: JigSpace – AR-Ansicht und 3D-Ansicht	80
Abbildung 5.14: Kreis der vollständigen Handlung für AR-Montageaufgaben ..	88
Abbildung 5.15: Einbauvorrichtung und RWD (montiert).....	91
Abbildung 5.16: Einbauvorrichtung des RWD (demontiert).....	92

Abbildung 5.17: Montage RWD: Ansicht in der Autorenumgebung.....	94
Abbildung 5.18: Proband während der Montage des RWD.....	96
Abbildung 5.19: Chunks im Autorensystem (beschriftet).....	101
Abbildung 5.20: Baugruppe DMZ (montiert).....	111
Abbildung 5.21: Einleitungsschritt zur Platzierung der 3D-Elemente (beschriftet)	114
Abbildung 5.22: Montagearbeitsplatz DMZ	116
Abbildung 5.23: Betrachtung des Montageszenarios in der AR-Ansicht.....	118
Abbildung 5.24: Proband während der Montage des DMZ	119
Abbildung 5.25: Übersicht der COMET-Testergebnisse	131
Abbildung 6.1: Arten der Chunks im Autorensystem.....	142

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Qualifizierung von Facharbeit seit dem 18. Jh.....	10
Tabelle 2.2: Projektionsmethoden von AR-Systemen	15
Tabelle 2.3: Verwandte Projekte	17
Tabelle 4.1: Elemente des Interaktionsdesigns.....	41
Tabelle 4.2: Elemente des Multimediadesigns	42
Tabelle 4.3: Elemente der Implementierung.....	43
Tabelle 4.4: Konzeptbausteine zur Erhebung von Arbeitsprozesswissen	50
Tabelle 4.5: Kurzbeschreibung der Kriterien beruflicher Kompetenz nach Rauner (COMET).....	53
Tabelle 4.6: Leitlinien zur Entwicklung von Testaufgaben.....	57
Tabelle 5.1: Einordnung der Montageszenarien.....	61
Tabelle 5.2: Gegenüberstellung der erprobten Autorensysteme.....	84
Tabelle 5.3: Arbeitsschritte innerhalb der AR-Anleitung.....	93
Tabelle 5.4: Probanden RWD-Montage Phase 1	95
Tabelle 5.5: Ermittelte Chunks der RDW-Montage	97
Tabelle 5.6: Probanden RWD-Montage Phase 2	102
Tabelle 5.7: Angepasster Chunk der RDW-Montage	103
Tabelle 5.8: Montageschritte der DMZ-Anleitung (gruppiert)	113
Tabelle 5.9: Probanden DMZ-Montage Phase 1	116
Tabelle 5.10: Ermittelte Chunks der ersten Probandengruppe (DMZ)	120
Tabelle 5.11: Probanden DMZ-Montage Phase 2.....	124
Tabelle 5.12: Ermittelte und angepasste Chunks der zweiten Probandengruppe (DMZ).....	125
Tabelle 5.13: Bewertungsspielraum für die COMET-Items	131
Tabelle 6.1: Metaebene der identifizierten Chunks	145

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die fortschreitende Digitalisierung hat in den letzten Jahrzehnten eine tiefgreifende Transformation sämtlicher Lebens- und Arbeitsbereiche bewirkt. Insbesondere mit dem technologischen Fortschritt im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologie entstehen neue Möglichkeiten und Herausforderungen für die Industrie. In Deutschland sind es vor allem die kleinen und mittelständischen Unternehmen¹ (KMU), welche im Zentrum dieser Transformation stehen. Innerhalb dieses Sektors erweist sich der deutsche Maschinenbau als stärkste Branche, da hier die mit Abstand meisten Weltmarktführer der deutschen Industrie vertreten sind (vgl. Krauß, 2022). Dieser Sektor, bekannt für seine Ingenieurkunst und seine Beiträge zur globalen Wettbewerbsfähigkeit, befindet sich aktuell an einem Wendepunkt: Die Notwendigkeit der Integration digitaler Technologien und Systeme in Betriebsabläufe. Digitale Assistenzsysteme, insbesondere Technologien wie Augmented Reality (AR), sind ein Teil dieser Transformation.

Diese Technologien haben das Potenzial, nicht nur die Art und Weise zu verändern, wie Produktions- und Betriebsabläufe ablaufen, sondern auch, wie Wissen übertragen und genutzt wird. In dieser Hinsicht entsteht für die berufliche Bildung eine zentrale Rolle für die praktische Umsetzung in den Betrieben.

In diesem Zusammenhang steht die berufliche Bildung vor einer doppelten Herausforderung: Zum einen muss sie die nächste Generation von Fachkräften mit den erforderlichen Fähigkeiten ausstatten, um effektiv in einer digitalisierten Arbeitsumgebung agieren und diese mitgestalten zu können. Zum anderen muss sie sicherstellen, dass bereits im Beruf stehende Mitarbeiter² regelmäßig weitergebildet werden, um mit den ständigen technologischen Entwicklungen Schritt zu

¹ Stand 2021 gehören über 99% der Unternehmen in Deutschland dem KMU Sektor an (vgl. Destatis, 2023).

² Um die Lesbarkeit zu verbessern, wird auf eine die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Ausdruckweisen verzichtet. Zudem folgt diese Arbeit dem Beschluss des Rats für deutsche Rechtschreibung vom 14.07.2023, welcher die Nutzung von Gendersonderzeichen nicht in das amtliche Regelwerk der deutschen Orthographie aufgenommen hat (vgl. Rat für deutsche Rechtschreibung, 2023).

halten. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich speziell auf den Bereich der Baugruppenmontage. Hier können digitale Assistenzsysteme als Mittler agieren, die nicht nur die Produktivität der Montagevorgänge steigern (vgl. Friedewald et al., 2016; Pfeifroth et al., 2021; Rosenberger et al., 2020), sondern auch den Prozess des Wissenstransfers reformieren und damit die berufliche Aus- und Weiterbildung aufwerten (vgl. Biene et al., 2021; Pfeifroth et al., 2021; Sachse & Graeb, 2019).

1.2 Zielsetzung

Das Hauptanliegen dieser Studie besteht darin, die Anwendung eines AR-Auto-rensystems in verschiedenen Montageszenarien zu erproben, um zu untersuchen, inwieweit dieses System den Wissenstransfer in beruflichen Bildungsstätten fördern kann. Statt die Fachkräfte lediglich als passive Nutzer dieser Systeme zu betrachten, wird in der vorliegenden Arbeit angestrebt, dass diese für die Implementierung des eigenen Arbeitsprozesswissens die Autorenrolle übernehmen. Das bedeutet, dass sie das AR-System nicht nur nutzen, sondern auch selbst anpassen und gestalten sollen. Um diese Ziele realisieren zu können, orientieren sich die in dieser Arbeit durchgeführten Versuchsreihen an den Prinzipien einer gestaltungsorientierten Berufsbildung (Rauner, 2017a, S. 133ff.). Dieses Bildungskonzept legt den Fokus auf eine praxisnahe und handlungsorientierte Qualifizierung von Fachkräften. Im Rahmen dieser gestaltungsorientierten Berufsbildung sollen die Fachkräfte nicht nur die Fähigkeiten erwerben, in einer digitalisierten Arbeitsumgebung zu arbeiten, sondern sie auch befähigen, die digitale Umgebung nach ihren individuellen Anforderungen zu gestalten und zu optimieren.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel, deren Anordnung in Form der in Abbildung 1 dargestellten Verlaufskurve beschrieben werden kann.

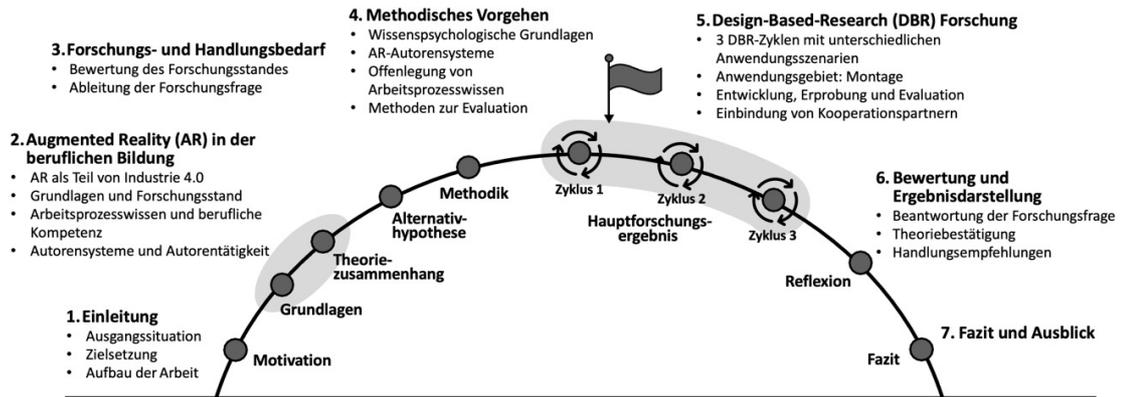


Abbildung 1.1: Verlaufskurve dieser Arbeit

Quelle: eigene Darstellung

Im einleitenden Kapitel wird die Motivation für die Untersuchung von AR-Autorensystemen in der beruflichen Bildung sowie die Zielsetzung und die Struktur dieser Studie vorgestellt.

Die Grundlagen dieser Thematik werden im zweiten Kapitel dargelegt. Diese umfassen die technischen Hintergründe und die charakteristischen Eigenschaften der AR-Technologie. Weiterhin wird die Technologie in den aktuellen Stand der Forschung eingeordnet. Im Anschluss daran erfolgt eine Betrachtung der für diese Arbeit relevanten Grundlagen aus dem Bereich der beruflichen Bildung, einschließlich der Konzepte von Arbeitsprozesswissen, beruflicher Kompetenz und Autorensystemen. In diesem Kapitel wird der theoretische Rahmen zum Verständnis der zu erforschenden Thematik vermittelt.

Im dritten Kapitel wird der bestehende Forschungsstand bewertet, um daraus den Forschungsbedarf für diese Studie abzuleiten. In diesem Zusammenhang werden auch die Nullhypothese und die Alternativhypothese formuliert.

Kapitel vier legt den methodischen Ansatz der Studie dar. Es beschreibt den methodischen Rahmen, der zur Umsetzung der Versuchsreihen angewendet wird, einschließlich der wissenspsychologischen Grundlagen, Anforderungen an ein AR-Autorensystem, berufswissenschaftlicher Methoden zur Offenlegung von Arbeitsprozesswissen und der angewendeten Evaluationsmethoden.

Die Hauptforschungsergebnisse werden im fünften Kapitel durch das angewandte Forschungsdesign erzielt. Dieses gliedert sich in insgesamt drei Zyklen -

jeweils bestehend aus Entwicklung, Erprobung, Analyse und Überarbeitung - in denen verschiedene Montageszenarien behandelt werden. Dabei erfolgt eine Evaluierung verschiedener AR-Autorensysteme, welche anschließend in der Praxis eingesetzt werden. Die Versuchsreihen münden in einer abschließenden Kompetenzmessung einer Gruppe von Probanden, die in einem realen Anwendungsszenario bei einem Industriepartner durchgeführt wird.

Im sechsten Kapitel erfolgt eine kritische Reflexion der gewonnenen Ergebnisse, um die Forschungsfrage zu beantworten. Auf Grundlage der Erkenntnisse aus dieser Studie werden zudem Handlungsempfehlungen für potenzielle Nutzer abgeleitet.

Schließlich wird diese Arbeit im siebten Kapitel mit einem Fazit und einem Ausblick abgeschlossen.

2 Augmented Reality in der beruflichen Bildung

2.1 AR als Teil von Industrie 4.0 im gewerblich-technischen Sektor

Industrie 4.0, auch bekannt als die vierte industrielle Revolution, beeinflusst die betriebliche Arbeitswelt auf allen Ebenen. Im Kern handelt es sich um ein Konzept, welches die Verbindung von Produktionsprozessen und IT-Systemen in Echtzeit vorsieht, um ein hohes Maß an Automatisierung, Effizienz und Flexibilität zu erreichen (vgl. Hirsch-Kreinsen & Weyer, 2014). Abbildung 2.1 veranschaulicht den Werdegang der vier industriellen Revolutionsstufen in den entsprechenden Zeitintervallen und führt die jeweiligen Kernelemente auf.



Abbildung 2.1: Die vier Stufen der industriellen Revolution

Quelle: eigene Darstellung (in Anlehnung an Barthelmäs et al., 2017; Dombrowski et al., 2014; Röben, 2017)

Generell wird angenommen, dass die vierte industrielle Revolution in den 2010er Jahren begann und aktuell fortgesetzt wird. Der genaue Startzeitpunkt ist jedoch schwer zu benennen, da die Entwicklung und Implementierung von Technologien wie künstlicher Intelligenz (KI) oder dem Internet der Dinge (IoT), welche unzählige Bereiche von Industrie 4.0 beeinflussen, über einen längeren Zeitraum stattfinden und sich laufend weiterentwickeln (vgl. Franz & Wehnert, 2020; Hirsch-Kreinsen & ten Hompel, 2017).

Auch Augmented Reality gehört zu den Schlüsseltechnologien der vierten industriellen Revolution und kann zum heutigen Stand als reife und kommerziell einsetzbare Technologie angesehen werden (vgl. Muñoz-Saavedra et al., 2020). Als Indikator für die Entwicklung und Verbreitung von AR kann der „Hype Cycle for emerging Technologies“ von Gartner (2022) herangezogen werden, welcher den Werdegang einer aufstrebenden Technologie in fünf Phasen darstellt:

Phase 1: Technologischer Auslöser

Ein potenzieller technologischer Durchbruch ist in Aussicht. Produkte sind oftmals nicht brauchbar, bieten jedoch viel Verbesserungs- und Anpassungspotenzial.

Phase 2: Gipfel der überzogenen Erwartungen

Erste Produkte sind marktreif und sorgen für eine breite mediale Präsenz. Erste Erfolge werden überzogen dargestellt, während Misserfolge ausgeblendet werden.

Phase 3: Tal der Enttäuschung

Der reelle Nutzen entspricht oftmals nicht den Erwartungen und das Interesse nimmt stark ab. Investitionen in die Technologie werden beschnitten und nur auf wenige, potenziell erfolgreiche Projekte fokussiert.

Phase 4: Pfad der Erleuchtung

Die Technologie wird immer besser verstanden und mehr Beispiele für die sinnvolle Anwendung zeichnen sich ab. Anfängliche Mängel der ersten Generation wurden weitestgehend beseitigt.

Phase 5: Plateau der Produktivität

Die Technologie wird technisch ausgereift und wirtschaftlich rentabel. Es gibt einen Nutzen für den breiten Markt und die Mainstream-Adaption beginnt.

Abbildung 2.2 veranschaulicht den vollständigen Werdegang von Augmented Reality im Gartner Hype Cycle:

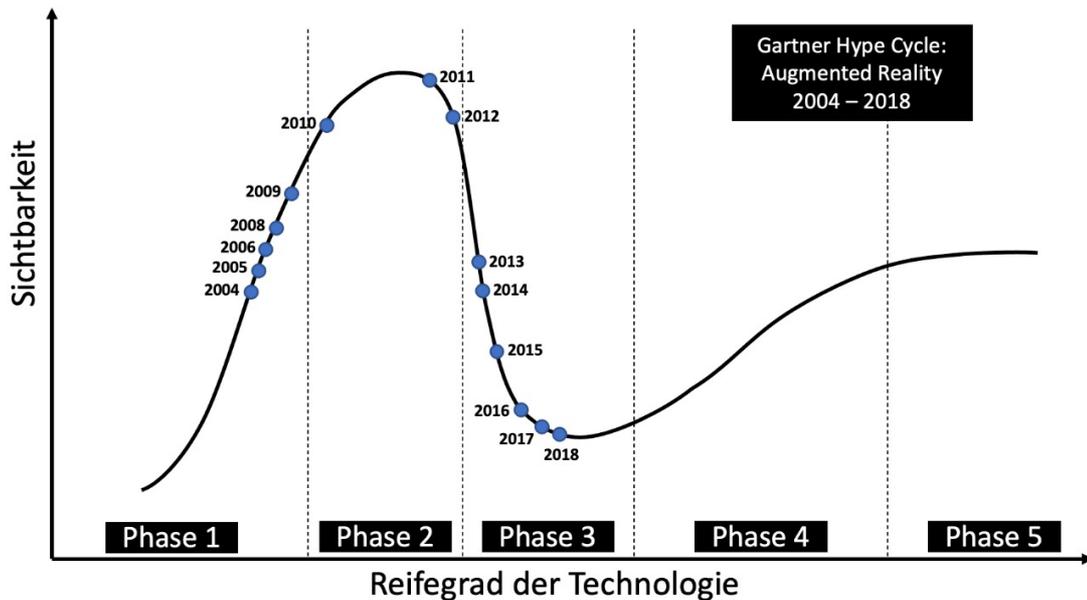


Abbildung 2.2: Gartner Hype Cycle für AR³: Jahrgänge 2004-2018

Quelle: eigene Darstellung (modifiziert nach Gartner, 2022)

Demnach lassen sich die technologischen Errungenschaften von AR in vier Zeitperioden einteilen:

2004-2009:

Im Jahr 2005 prognostiziert der Horizon Report (Berryman, 2012, S. 214), dass sich AR-Technologien in den folgenden vier bis fünf Jahren vollständig durchsetzen werden. Zur Untermauerung dieser Prognose werden die in diesem Jahr entwickelten Kamerasysteme angeführt, welche Positionen zwischen Objekten innerhalb einer physischen Umgebung in Echtzeit erfassen und analysieren können (vgl. ebd.). In den folgenden Jahren schreitet die Entwicklung weiterer AR-Anwendungen voran. So entstehen beispielsweise erste Anwendungen im medizinischen Bereich (Carmigniani et al., 2011, S. 365) oder für mobile Anwendungsfälle (vgl. Arth et al., 2015).

³ Im Jahr 2007 wird AR nicht aufgeführt. In diesem Jahr erscheint einmalig der Term „Ambient an Glanceable Displays“ (umgebungsbezogene und erfassbare Displays), welcher als Substitut für AR interpretiert werden kann.

2010-2012:

In diesem Zeitraum erreicht das Interesse an der Technologie seinen Höhepunkt. Allen voran sind es zwei AR-basierte Endgeräte, die in der Öffentlichkeit für Aufmerksamkeit sorgen. Das im Jahr 2010 von Microsoft vorgestellte Kamerasystem „Kinect“, ursprünglich entwickelt als bewegungsempfindliches Eingabesystem für eine Spielkonsole, bietet über einen Infrarotsensor die Möglichkeit, Tiefeninformationen der realen Umwelt wahrzunehmen und diese auszuwerten. Als „am schnellsten verkaufter Consumer-Elektroartikel aller Zeiten“ (Billie, 2011, S. 7) brachte das System AR, neben dem Gaming-Sektor, auch in die Bereiche Steuerung von Betriebssystemen, Überwachung von Personen sowie Forschung und Entwicklung (vgl. Carmigniani & Furht, 2011; Van Krevelen & Poelman, 2010).

Die größte öffentliche Sichtbarkeit von AR geht mit der Entwicklung der AR-Datenbrille Google Glass einher, welche 2012 auf der Entwicklerkonferenz Google I/O vorgestellt wurde. Mit dieser AR-Brille konnten Umgebungsdaten in Echtzeit erfasst und ausgewertet werden. Noch im selben Jahr konnten erste Brillen von Entwicklern vorbestellt werden.

2013-2018:

Die Google Glass wird 2013 ausgeliefert und scheitert gesellschaftlich, was vor allem auf fehlendes Vertrauen in den Datenschutz bei der Verwendung der Brille zurückzuführen ist (vgl. Minor, 2021). Wichtige Meilensteine in diesem Zeitraum sind die 2015 angekündigte und 2016 erschienene AR-Brille Microsoft Hololens, das 2016 erschienene AR-Smartphone-Spiel Pokémon Go und das Erscheinen der frei zugänglichen Entwicklerwerkzeuge Apple ARKit (2017) für das Betriebssystem iOS sowie Google ARCore (2018) für das Betriebssystem Android (vgl. Bezmalinovic, 2022).

Ab 2019:

AR verlässt den Hype Cycle und überspringt somit Phase 4 und 5. Laut Gartner ist die Entwicklung von Augmented Reality so rapide vorangeschritten, dass sie nicht mehr als „aufstrebende“ Technologie gilt (vgl. Herdina, 2020). Das Ausscheiden von Augmented Reality aus dem Zyklus bedeutet also, dass AR

aufgrund der vielseitigen Anwendungsszenarien und -möglichkeiten als reife Technologie für den Massenmarkt zu betrachten ist.

Schlussfolgerung

Somit ist AR für die industrielle Anwendung samt der beruflichen Bildung aus technischer Sicht bereit. Für diese Arbeit bedeutet das, dass es sich hier nicht nur um ein Pilotprojekt mit einer experimentierfähigen Technologie, sondern auch um ein umsetzungsfähiges Anwendungsszenario handelt, welche einem breiten Anwenderkreis in der gewerblich technischen Branche geöffnet wird.

2.2 Industrie 4.0 - Qualifizierung von Facharbeit bei wachsender Digitalisierung

Die Digitalisierung ist ein Kernmerkmal von Industrie 4.0, da sie alle Bereiche eines Unternehmens durchdringt. Dabei wird, je nach betrachtetem Aufgabenbereich, ein variables Komplexitätsniveau geschaffen. Für die betriebliche Ausbildung und die Facharbeiterebene bedeutet dies zweierlei: Auf der einen Seite steigt durch die Integration digitaler Elemente die Komplexität im Arbeitsalltag, auf der anderen findet eine Verringerung der Komplexität durch den Einsatz moderner Technologien statt. Dieser Sachverhalt wird auch als digitaler Taylorismus⁴ bezeichnet, da komplexe Tätigkeiten durch Technologien vereinfacht und standardisiert werden können (Günzel & Yamen, 2020, S. 112). Die folgenden zwei Beispiele verdeutlichen den Sachverhalt:

1. Komplexe Wartungs- oder Montagetätigkeiten müssen nicht mehr zwangsläufig von einem Experten ausgeführt werden. Unter der Voraussetzung, dass Grundkenntnisse vorhanden sind, kann eine beliebige Arbeitskraft diese Tätigkeiten durch die Unterstützung digitaler Assistenzsysteme bewerkstelligen.

⁴ Der ursprüngliche „Taylorismus“ ist auf ein Konzept von Frederick Winslow Taylor zurückzuführen und beschreibt eine wissenschaftliche Methode zur Verbesserung der Arbeitsabläufe aus den frühen 1900er Jahren. Im Kern beruht das Konzept auf einer Arbeitsplatzoptimierung (Standardisierung von Arbeitsprozessen, Aufteilung von Arbeit, Schaffung von Leistungsanreizen), welche menschliche Arbeitskraft voraussetzt.

2. Einige digitale Systeme oder Anlagen müssen für den individuellen Einsatz programmiert werden. Die benötigten Programmierkenntnisse können durch eine KI zur Verfügung gestellt werden.

Neben der Komplexität steigt im digitalen Zeitalter auch die Menge an Informationen in allen Unternehmensbereichen kontinuierlich an. Dies ist vor allem der dezentralen Intelligenz geschuldet, also der ortsunabhängigen Informationsansammlung, welche durch die digitale Vernetzung ermöglicht wird. Der daraus resultierenden Informatisierung (Hirsch-Kreinsen & Itterman, 2017, S. 133) von Facharbeit kann ebenfalls durch den technologischen Fortschritt entgegengewirkt werden. Um eine Informationsüberflutung zu vermeiden, können Informationen und Daten mit Hilfe von Softwarelösungen bzw. Assistenzsystemen zielgerichtet bereitgestellt werden. An dieser Stelle wird deutlich, dass es bei den betroffenen Berufsgruppen an entsprechenden IT- und Medienkompetenzen bedarf. Wie die historische Entwicklung gezeigt hat, setzt der generelle Wandel von Facharbeiterkompetenzen immer auch eine Anpassung von Qualifikationsstandards voraus. Tabelle 2.1 verdeutlicht den Wandel von Facharbeiterqualifikation in Relation zu den jeweiligen Industrialisierungswellen:

Tabelle 2.1: Qualifizierung von Facharbeit seit dem 18. Jh.

Industrialisierung	Qualifikationsstandards
Erste industrielle Revolution (Ende 18. Jh.)	Die Nutzung menschlicher Muskelkraft steht im Vordergrund. Die Facharbeiter wurden hauptsächlich für die auszuführende Tätigkeit angelernt. Fachwissen wurde vor allem durch Erfahrung und den verbalen Austausch innerhalb eines Betriebes weitergegeben. Es existierten keine formalen Ausbildungsgänge. (Hahn, 2011, S. 32ff.)
Zweite industrielle Revolution (Anfang 19. Jh.)	Es entsteht ein Bedarf nach Facharbeitern mit spezialisierten Fähigkeiten. Die Folge sind erste Berufsschulen, die eine theoretische Ausbildung in Verbindung mit einer praktischen Tätigkeit ermöglichen. Erste einfache Berufe und Berufsgruppen entstehen und Ausbildungsstandards werden etabliert. Facharbeiter müssen die Anwendung von Maschinen verstehen. (Herkner, 2008 S. 175f.)
Dritte industrielle Revolution (Anfang 1970er)	Einfache Anlernberufe verlieren an Bedeutung und wenige Kernberufe kristallisieren sich heraus, welche eine breite Basis an Kenntnissen und Fähigkeiten bedienen. Die entsprechenden Ausbildungsprogramme decken insbesondere den Bereich Computerkenntnisse ab. Facharbeiter übernehmen die Verantwortung für die Maschinensteuerung und die Überwachung von Produktionsprozessen. (vgl. Bretschneider & Schwarz, 2015)

Vierte industrielle Revolution (Anfang 2000er)	Das bestehende Berufsschulsystem wird durch weitere Kernberufe ergänzt, wobei der inhaltliche Anteil an Informationstechnik innerhalb dieser Kernberufe immer weiter zunimmt. Es werden zudem immer mehr Facharbeiter benötigt, die den Umgang mit komplexen Systemen beherrschen. Die dafür notwendigen Qualifikationen erfordern ein breiteres Verständnis für IT-Systeme, Programmierung und innovative Fertigungstechnologien. (vgl. Ittermann & Niehaus, 2018)
---------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Die Übergänge zwischen den jeweiligen Revolutionswellen sind fließend, einen genauen Stichtag gibt es nicht. Das auffälligste Merkmal der industriellen Revolutionswellen ist, dass die Qualifikation von gewerblich-technischer Facharbeit in jeder Welle eine Aufwertung erfährt. So befinden wir uns insbesondere heute, also in Zeiten schneller technologischer Veränderungen und des digitalen Wandels, in einer Phase, in der die Aufwertung von Qualifikation eine übergeordnete Rolle spielt (vgl. Kagermann, 2014). Diese Erkenntnis geht mit der steigenden Akademisierung der Berufswelt einher, also der wachsenden Bedeutung von Beschäftigten mit Hochschulabschluss auf dem Arbeitsmarkt, die vor allem in der vierten industriellen Revolution mit der Einführung des Bachelor/Master-Systems und der Öffnung der Hochschulen für beruflich Qualifizierte einen Aufschwung erfahren hat (vgl. Kuda et al., 2012; Severing & Teichler, 2013).

An dieser Stelle ist festzuhalten, dass der Faktor Mensch und dessen Qualifizierung noch immer eine entscheidende Funktion innerhalb der digitalisierten Arbeitswelt innehat. Die vorliegende Arbeit versucht hier die Brücke zu schlagen: Durch die sich verändernden Anforderungen der Facharbeiterqualifizierung nehmen sowohl betriebliche als auch überbetriebliche Weiterbildungsmaßnahmen eine Schlüsselrolle ein, was ein wesentliches Merkmal der vorgelegten Arbeit ist.

2.3 Grundlagen und Forschungsstand zu AR

Der Begriff „Augmented Reality“ wurde von verschiedenen Disziplinen und Forschungsfeldern geprägt, weshalb keine einheitliche Definition in der Literatur existiert (Mehler-Bicher & Steiger, 2014, S. 9; Milgram et al., 1995, S. 283). Eine allgemein anerkannte Einordnung von AR wird durch das „reality-virtuality

continuum“ (RVC) geliefert (vgl. Milgram & Kishino, 1995), welches auch die Abgrenzung zur virtuellen Realität (VR) verdeutlicht (vgl. Abbildung 2.3).

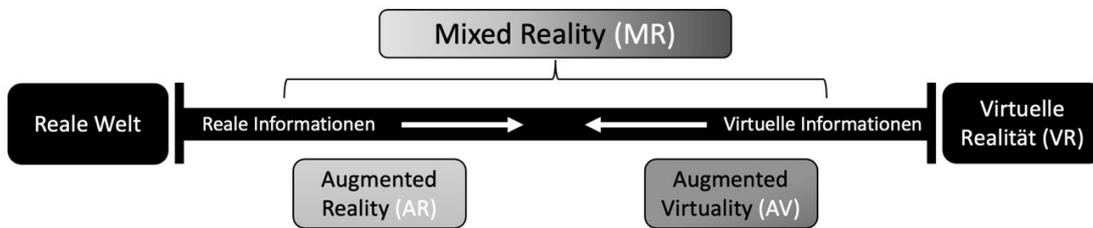


Abbildung 2.3: Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum

Quelle: eigene Darstellung (in Anlehnung an Milgram, 1995)

Das RVC beschreibt eine Skala, welche sich von der realen Welt (Realität) bis hin zu einer vollständig virtuellen Welt (Virtualität) erstreckt, wobei jede Stufe eine zunehmende Immersion in die virtuelle Welt darstellt. Die verschiedenen Stufen auf dem RVC können wie folgt beschrieben werden:

- **Reale Welt:** Die physische Welt, in der wir leben und uns bewegen. Hier gibt es keine virtuellen oder erweiterten Elemente, die in die Umgebung integriert sind.
- **Augmented Reality (AR):** Die reale Welt wird durch virtuelle Elemente erweitert oder ergänzt. Diese virtuellen Elemente können über ein AR-fähiges Endgerät in die reale Welt eingeblendet werden. Die primäre Erfahrung findet in der realen Welt statt.

Beispiel: Das AR-Spiel „Pokémon GO“, bei dem Spieler Pokémon in der realen Welt virtuelle Monster über ihre Smartphone-Kamera „fangen“.

- **Augmented Virtuality (AV):** In der erweiterten Virtualität werden reale Elemente in eine virtuelle Umgebung integriert. Ein Beispiel hierfür ist ein Fahr-Simulator, der reale Objekte wie ein Lenkrad enthält, welches in eine virtuelle Umgebung projiziert wird. Die primäre Erfahrung findet in der virtuellen Welt statt.

Beispiel: Ein Flugsimulator, der Echtzeit-Wetterdaten nutzt, um das Wetter in der virtuellen Flugumgebung darzustellen.

- **Mixed Reality (MR):** Ein Überbegriff für den Raum zwischen AR und AV, der den fließenden Übergang dieser beiden Stufen beschreibt.

- Virtuelle Realität (VR): Eine computer-generierte, vollständig virtuelle Umgebung. Hier ist die physische Welt vollständig ausgeschlossen. Die Erfahrung finden ausschließlich in der virtuellen Welt statt.

Beispiel: Das „Metaverse“, also ein vollständig virtueller Versammlungsraum, den Nutzer mit Hilfe eines VR-Headsets betreten können.

Das RVC soll zeigen, dass sich Technologien wie AR, MR, und VR in unterschiedlichen Entwicklungsstadien auf der selben Kontinuumslinie befinden. Neben einer allgemeinen Beschreibung von AR veranschaulicht das RVC aber vor allem auch, was nicht unter AR zu verstehen ist.

Neben *Milgrams* Einordnung von AR liefert *Azuma* (vgl. Azuma, 1997; Azuma et al., 2001) die charakteristischen Merkmale, welche die Technologie als solche definiert:

- Kombination von realen und virtuellen Objekten in einer realen Umgebung: AR ermöglicht es, virtuelle Objekte in die reale Welt zu integrieren. Dies bedeutet, dass ein Benutzer sowohl die reale Welt als auch virtuelle Objekte sehen kann.
- Interaktion in Echtzeit: AR ermöglicht die Interaktion mit virtuellen Objekten in Echtzeit. Die Interaktion kann durch Touchscreen, Gesten oder Sprachbefehle erfolgen.
- Registrierung und Ausrichtung realer und virtueller Objekte: AR-Systeme müssen in der Lage sein, virtuelle Objekte innerhalb der realen Welt zu registrieren. Dieser Vorgang schließt den Abgleich von Position und Ausrichtung des Nutzers sowie der virtuellen Elemente mit ein.

Damit wird AR auf seine wesentlichen Kernmerkmale eingegrenzt, nach denen sich auch diese Arbeit richtet.

2.3.1 Augmented Reality - Stand der Technologie

Die technische Realisierung von AR wird durch eine Kombination verschiedener Teilelemente gewährleistet. Um die für AR typische immersive Darstellung von virtuellen Elementen zu ermöglichen, sind die in Abbildung 2.4 dargestellten Komponenten in jedem AR-System zwingend notwendig:

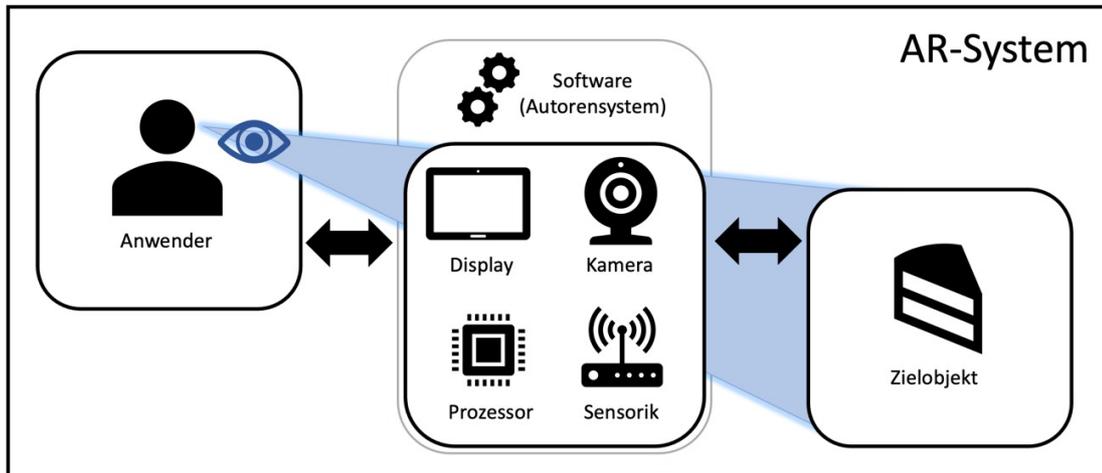


Abbildung 2.4: Komponenten eines AR-Systems

Quelle: eigene Darstellung

Anwender

Der Anwender des AR-Systems muss sowohl mit der Benutzeroberfläche als auch mit der ordnungsgemäßen Bedienung des Systems vertraut sein.

Display

Das Display bzw. das Visualisierungsmedium ist ein Bildschirm, auf dem die AR-Inhalte dargestellt werden. Dabei kann es sich um das Display auf einem Smartphone, Tablet, Computerbildschirm oder einer AR-Brille handeln.

Kamera

Die Kamera ist notwendig, um die reale Umgebung zu erfassen, in der die virtuellen Objekte eingesetzt werden.

Sensorik

Um die Position und Ausrichtung des AR-Gerätes und des Anwenders erfassen zu können, werden Sensoren wie Gyroskope, Beschleunigungsmesser, Abstandsmesser (LiDAR-Scanner⁵) oder GPS verwendet.

⁵ Ein LiDAR-Scanner (Light Detection and Ranging) ist ein optisches Messinstrument, das die Entfernung zu Objekten anhand des reflektierten Lichtes präzise messen kann.

Prozessor

Der Prozessor stellt die Rechenleistung zur Verfügung, um digitale Inhalte generieren sowie die Sensor- und Kameradaten verarbeiten zu können. Zudem muss der Prozessor leistungsstark genug sein, um die Echtzeitverarbeitung der Daten zu ermöglichen.

Software

Die AR-Software ist der wichtigste Bestandteil des Systems. Mit Hilfe der eingehenden Prozessordaten werden die AR-Inhalte generiert. Weiterhin umfasst die Software auch die Benutzeroberfläche, welche die Interaktion des Benutzers mit dem System steuert. Die verwendete Software kann auch als Autorensystem dienen (vgl. Kapitel 2.5).

Zielobjekt

Das Zielobjekt ist ein physisches Objekt in der realen Welt, auf das die AR-Inhalte projiziert werden. Es kann ein Produkt, eine Fläche, ein Raum oder eine andere Art von physischem Objekt sein, das mit digitalen Inhalten erweitert werden soll.

Die genannten Elemente sind für die Entwicklung eines funktionierenden AR-Systems notwendig. Obwohl die Details und Ausgestaltung dieser Elemente je nach AR-System variieren können, sind sie allgemein gültig und bilden die Grundlage für die Schaffung einer erweiterten Realität.

Je nach Anwendungszweck unterscheiden sich AR-Systeme in der Art und Weise, mit der virtuelle Elemente projiziert und positioniert werden. Tabelle 2.2 zeigt eine Übersicht der wichtigsten Projektionsmethoden von AR-Systemen:

Tabelle 2.2: Projektionsmethoden von AR-Systemen

Projektionsmethode	Beschreibung
Marker	Bei der Marker-basierten AR werden Muster in der realen Welt platziert, die von der AR-Software erkannt werden. Bei den Mustern kann es sich beispielsweise um QR-Codes, Bilder oder individuelle Muster handeln. Wenn die Kamera des AR-Systems den Marker erfasst, platziert die Software an diesem Referenzpunkt die virtuellen Elemente.

Markerlos	Bei der markerlosen AR wird keine spezielle Markierung benötigt, da das AR-System die Umgebung selbstständig scannt und die Position der virtuellen Elemente anhand von Merkmalen aus der Umgebung bestimmt. Diese Methode erfordert jedoch eine präzise Erfassung der Position und Ausrichtung des AR-Systems sowie der Umgebung, um die virtuellen Objekte korrekt zu platzieren.
Objektorientiert	Bei dieser Methode erkennt das AR-System spezifische Objekte in der realen Welt und nutzt diese als Ankerpunkt für die Platzierung von digitalen Inhalten. Um diese Objekte erkennen zu können, müssen sie vorab durch Verfahren wie 3D-Scanning oder in Form von CAD-Daten in die AR-Software integriert worden sein.
Räumlich	Bei der räumlichen Projektion scannt das AR-System die Umgebung nach (vorrangig ebenen) Oberflächen ab. Diese Methode kann genutzt werden, um virtuelle Objekte auf beispielsweise einer Wand, einem Tisch oder einem Bildschirm zu projizieren.
Standort	Bei der standortbasierten AR werden virtuelle Objekte an vorab bestimmten Orten in der realen Welt platziert. Zur Bestimmung der Position von virtuellen Objekten werden GPS-Koordinaten aus der realen Welt verwendet.

Diese Projektionsmethoden erlauben es, digitale Objekte auf verschiedene Arten ortsgebunden in die reale Welt zu projizieren und somit eine erweiterte Realität zu erschaffen. Welche Methode eingesetzt wird, hängt von der spezifischen AR-Anwendung, der verwendeten Hardware und der angestrebten Benutzererfahrung ab.

2.3.2 AR-Systeme in Forschung und Praxis

In diesem Unterkapitel werden ausgewählte Fallbeispiele vorgestellt, bei denen AR-Systeme in der Montage und für die Facharbeiterqualifizierung verwendet werden. Die Auswahl bezieht sowohl nationale als auch internationale Projekte aus der Forschung und industriellen Praxis ein, welche mit dem Forschungsziel der vorliegenden Arbeit kongruieren und aufgrund der Schnittmengen als bedeutend und lehrreich angesehen werden. In Tabelle 2.3 werden die Projekte kurz vorgestellt und ein Bezug zur vorliegenden Arbeit hergestellt:

Tabelle 2.3: Verwandte Projekte

Projektdaten	Projektumriss	Erkenntnisse für die eigene Arbeit
<p>Boeing Computer Services, Research and Technology, Seattle</p> <p><u>Referenz:</u> (Caudell & Mizell, 1992; Vaughan-Nichols, 2009)</p>	<p>Dieses Projekt gilt als Vorreiter in der Entwicklung von AR-Technologien und entstand in den frühen 1990er Jahren. Die Nutzung einer AR-Brille unterstützt den Bediener beispielsweise bei der korrekten Verlegung von Kabeln oder der Wartung und Montage von Flugzeugteilen. Für die detailgetreue Darstellung von virtuellen Objekten werden CAD-Daten verwendet.</p> <p>Der Begriff „Augmented Reality“ wurde hier geprägt.</p>	<p>Obwohl sich AR noch in einem sehr frühen Stadium befindet, dient das eingesetzte AR-System als Inspiration für unzählige Folgeprojekte. Auch wenn die eingesetzte Hardware stark veraltet ist, baut die vorliegende Arbeit auf den grundlegend eingesetzten AR-Elementen auf.</p>
<p>Mobile AR Paint-cAR, University of Girona (Spain)</p> <p><u>Referenz:</u> (Bacca et al., 2015)</p>	<p>In diesem Beitrag wird eine markenbasierte AR-Anwendung für Smartphones verwendet, die den Lernprozess der Lackreparatur an einem Auto im Rahmen eines Berufsausbildungsprogramms für die Wartung von Autos unterstützt. Bei der Zielgruppe handelt es sich um Berufsschulklassen. Verglichen mit herkömmlichen Lehrmethoden, ist die Steigerung von Aufmerksamkeit, Relevanz, Zuvorsicht und Zufriedenheit bei der Arbeit mit der AR-Anwendung als hervorzuhebendes Ergebnis dieses Projektes zu nennen.</p>	<p>AR-Systeme werden in zahlreichen Fach- und Lehrgebieten erforscht und primär auf eine Steigerung der Produktivität ausgelegt. Dieses Projekt gehört zu den ersten, die AR im Bereich der beruflichen Bildung erforscht und den Fokus dabei auf die Aufgabenstellung und die Adressierung von heterogenen Zielgruppen legt. Zudem wird hier die Begeisterungsfähigkeit der Technologie AR im Kontext von Berufsschulklassen deutlich, also einer Zielgruppe, die ebenfalls in der vorliegenden Arbeit adressiert wird.</p>
<p>Project SAL, Bergische Universität Wuppertal</p> <p><u>Referenz:</u> (Fehling, 2017; Fehling et al., 2015)</p>	<p>Das Projekt Social Augmented Learning (SAL) zielt darauf ab, komplexe Wirkungszusammenhänge innerhalb eines Produktionsprozesses mit Hilfe eines AR-Systems zu veranschaulichen. Dabei liegt der Fokus auf Maschinen, deren Innenleben während der Produktion nur schwer ersichtlich sind. Das AR-System ist markenbasiert und wird mit Hilfe einer selbst erstellten AR-Software für Smartphones und Tablets realisiert. Die Akteure des Projektes stammen aus dem gewerblich-technischen Bereich und das kollaborative Lernen in diesen Gruppen steht im Vordergrund.</p>	<p>Das didaktische Konzept des Projektes SAL setzt einen stärkeren Fokus auf die Vermittlung von Fachtheorie. Zudem wird hier die Vermittlung von Arbeitsprozesswissen adressiert und die Autorenrolle wird mit einbezogen. Anknüpfend an diese Ansätze unterscheidet sich das Projekt aber bei der praktischen Umsetzung und den zu vermittelnden Lehr- und Lerninhalten. Ebenso wird der Umgang mit Arbeitsprozesswissen weniger stark fokussiert als in der eigenen Arbeit.</p>

<p>motionEAP, Universität Stuttgart</p> <p><u>Referenz:</u> (Funk et al., 2016; Kosch et al., 2016)</p>	<p>Das Projekt motionEAP konzentriert sich auf die Nutzung von AR zur Schaffung einer Schnittstelle zwischen dem Nutzer und der digitalen Produktion in interaktiven Arbeitsplatzszenarien. Dabei werden Montageanleitungen mit Hilfe eines AR-Systems auf die Arbeitsfläche projiziert. Als Endgerät zur Projektion virtueller Elemente wird eine AR-Brille verwendet.</p>	<p>Wie auch in der vorliegenden Arbeit werden Montageprozesse im Projekt motionEAP in den Fokus genommen. Die Erfahrungen und Ergebnisse des Projektes spiegeln sich in einer Reihe aufgestellter Richtlinien wieder, welche in Teilen auch für die vorliegende Arbeit von Bedeutung sind.</p>
<p>FeDiNAR, RWTH Aachen</p> <p><u>Referenz:</u> (Atanasyan et al., 2020; Goppold et al., 2021)</p>	<p>Das Projekt FeDiNAR zielt darauf ab, Fehler innerhalb eines konkreten Anwendungsszenarios mit Hilfe eines AR-Systems zu veranschaulichen und dadurch als Lernmöglichkeit nutzbar zu machen. Dafür wurde ein AR-basiertes Lernsystem entwickelt, welches für Anwender aus dem gewerblich-technischen Bereich einen lernwirksamen Nutzen bei der Bewältigung von Arbeitsprozessen bietet. Die Darstellung von virtuellen „Fehlern“ wird mit einer AR-Brille realisiert.</p>	<p>Die Entwicklung beruflicher Handlungskompetenz ist ein zentraler Aspekt des Projektes FeDiNAR, was eine deutliche Parallele zu dieser Arbeit darstellt. Die didaktische Nutzung von Fehlern für den Kompetenz- und Wissenserwerb ist ebenso ein wichtiger Aspekt, der in der eigenen Arbeit eine wichtige Rolle einnimmt (vgl. Kapitel 4.3.5).</p>
<p>LeARn4Assembly, Fraunhofer-Institut IFF Magdeburg, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg</p> <p><u>Referenz:</u> (Fredrich et al., 2021; Haase et al., 2020)</p>	<p>Das Projekt LeARn4Assmby befasst sich mit der Entwicklung von Lern- und Assistenzlösungen auf der Basis von VR- und AR-Systemen. Die Assistenzlösungen werden didaktisch so gestaltet, dass sie auf betriebliche Arbeitsprozesse individuell abgestimmt werden. Dabei werden AR-Lösungen auf Basis einer AR-Brille für die Mitarbeiterqualifizierung in der Montage genutzt.</p>	<p>Wie auch in der vorliegenden Arbeit werden im Projekt LeARn4Assembly AR-Lösungen für den industriellen Bereich entwickelt. Zudem sind dabei Einarbeitungsprozesse im Fokus. Der im Projekt verwendete Gestaltungsprozess ist äußerst umfangreich und weist Gemeinsamkeiten mit dem der vorliegenden Arbeit auf.</p>

2.3.3 Problemaufriss

Alle betrachteten Projekte weisen auf ihre Art gemeinsame Schnittmengen mit der vorliegenden Arbeit auf, sei es bei der Nutzung des AR-Systems, der Zielgruppe oder dem didaktischen Konzept. Was in den Projekten und der Literatur jedoch vernachlässigt wird, ist die Betrachtung der Autorenrolle bezogen auf die Einbringung von Arbeitsprozesswissen bei der Verwendung eines AR-Systems. Diese Forschungslücke soll in der vorliegenden Arbeit genauer betrachtet werden. Dafür ist es zunächst notwendig, berufswissenschaftliche Fachbegriffe zu

klären, welche für das Verständnis dieser Forschung von zentraler Bedeutung sind und im Folgenden erläutert werden.

2.4 Arbeitsprozesswissen als Teil beruflicher Kompetenz

Für den Kompetenzbegriff existiert allgemein eine große Vielzahl an Auslegungen. Wird der Begriff auf die berufliche Kompetenz konkretisiert, sind es vor allem drei Kernmerkmale, die diesen Begriff prägen: Systematisches Fachwissen, Handlungsgeschick und Arbeitsprozesswissen.

Systematisches Fachwissen bezieht sich allgemein auf die „Kenntnisse“ einer Person und schließt das theoretische Wissen und Verständnis von Konzepten, Theorien und Prinzipien in einem bestimmten Berufsfeld mit ein. Dieses Wissen kann beispielsweise durch formale Ausbildung, Selbststudium oder Erfahrung erworben werden.

Handlungsgeschick oder auch praktisches „Können“ bezieht sich auf die Fähigkeit, spezifische Handlungen und Aufgaben in einem Berufsfeld effektiv und effizient durchzuführen. Dies umfasst die Anwendung von Werkzeugen, Technologien und Verfahren sowie die Fähigkeit, komplexe Aufgaben zu lösen und Entscheidungen zu treffen (vgl. Neuweg, 2021).

Arbeitsprozesswissen bezieht sich auf das Verständnis eines Gesamtarbeitsprozesses über dessen organisatorische und technische Abläufe (vgl. Kruse, 1986), die sich im Detail auf System-, Produkt-, Technik-, Gemeinschafts- und Organisationsaspekte beziehen (vgl. Abbildung 2.5). Konkret handelt es sich um dasjenige Wissen, das im Arbeitsprozess erforderlich ist, um Arbeitsabläufe zu verstehen, Aufgaben effektiv und effizient auszuführen sowie Probleme und Herausforderungen zu lösen, die im Verlauf des Arbeitsprozesses auftreten können (Fischer, 2018, S. 413f.). Dabei handelt es sich bei einem Arbeitsprozess typischerweise um eine Abfolge einzelner Arbeitsschritte, die nacheinander ausgeführt werden, um ein bestimmtes Ergebnis zu erzielen. Je nach Berufsfeld, Betrieb oder Art der Arbeit können sehr unterschiedliche Arbeitsprozesse vorkommen. Die vorliegende Arbeit legt den Fokus auf Arbeitsprozesse bei Montagetätigkeiten.

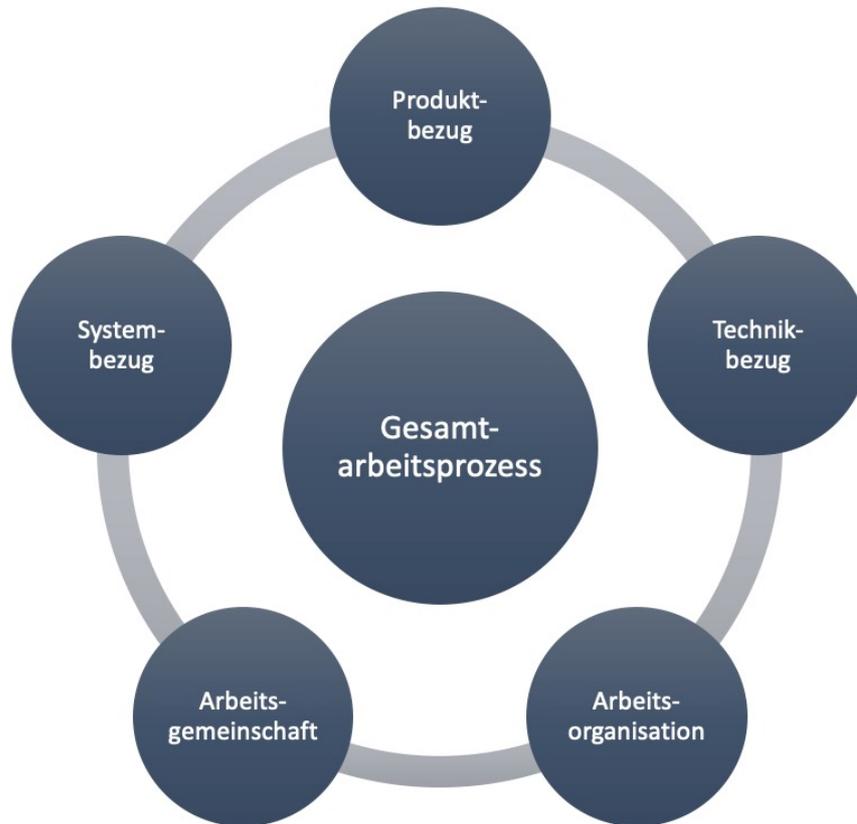


Abbildung 2.5: Dimensionen des Gesamtarbeitsprozesses

Quelle: eigene Darstellung (in Anlehnung an Engeström, 1987; Kruse, 1986)

Ein wichtiger Aspekt im Umgang mit Arbeitsprozesswissen ist, dass es vom Handelnden sowie von Dritten rekonstruiert werden kann, da es sowohl explizite als auch implizite Momente enthält (vgl. Neuweg, 2018). Diese Unterscheidung wird im Folgenden genauer charakterisiert:

Explizites Arbeitsprozesswissen

Das explizite Arbeitsprozesswissen bezieht sich auf das Wissen und Verständnis von Arbeitsabläufen, Verfahren und Methoden, die formal vermittelt und verbalisiert werden können. Es kann beispielsweise durch formale Schulungen, Anleitungen, Handbücher und andere schriftliche oder mündliche Quellen erworben werden.

Implizites Arbeitsprozesswissen

Das implizite Arbeitsprozesswissen bezieht sich auf das Verständnis von Arbeitsabläufen und -prozessen, das eine Person besitzt, aber oft nicht bewusst

artikulieren oder erklären kann. Es ist ein Wissen, das auf Erfahrung und praktischer Anwendung in einem bestimmten Berufsfeld basiert und sich im Laufe der Zeit durch ständige Anwendung und Reflexion aufgebaut hat. Im Gegensatz zum expliziten Arbeitsprozesswissen ist das implizite Arbeitsprozesswissen meist informell und nicht strukturiert. Zudem ist es oft schwer zu verbalisieren, da es aus vielen kleinen und subtilen Details besteht, die im Laufe der Zeit durch die praktische Anwendung erlernt wurden. Dieses Wissen kann sich aus verschiedenen Quellen zusammensetzen, wie zum Beispiel aus individuellen Erfahrungen, Beobachtungen, Feedback von Mitarbeitern oder der Zusammenarbeit mit anderen Personen im Arbeitsumfeld.

Um das implizite Arbeitsprozesswissen in Gänze zu erfassen, bedarf es einer weiteren Untergliederung. Das implizite Arbeitsprozesswissen geht auf den Terminus des „impliziten Wissens“ zurück (vgl. Polanyi, 1966), welcher in der Wissenschaft mehrdeutig in verschiedenen Theoriekontexten verwendet wird und an dieser Stelle für die eigene Arbeit eingeordnet werden soll.

Die Untergliederung unterscheidet den Terminus in „starkes“ und „schwaches“ implizites Wissen (Neuweg, 2005, S. 209):

„In der schwächeren Begriffsfassung meint implizites Wissen ein dem Könner nicht verbal zugängliches, durch die dritte Person aber durchaus explizierbares Wissen. Mit der starken Begriffsfassung wird dagegen auf im Handeln verausgabte, nicht-formalisierbare „Wissensbestände“ abgestellt, die sich der Abbildung auf Regeln entziehen. [...] Während nämlich für implizites Wissen in der schwächeren Form gefragt werden kann und letztlich empirisch entschieden werden muss, ob dieses zweckmäßigerweise explizit oder implizit erworben werden soll, kann implizites Wissen in der starken Form per definitionem nur implizit erworben werden.“

Analog verhält es sich mit dem Arbeitsprozesswissen, welches in seiner impliziten Form dieselben Unterscheidungsmerkmale aufweist. Für die eigene Arbeit ist demnach nur die Betrachtung des „schwachen“ impliziten Arbeitsprozesswissens von Interesse⁶, da dieses einen explizierbaren Charakter aufweist. Abbildung 2.6 fasst die Hierarchiebeziehungen des Arbeitsprozesswissens zusammen.

⁶ Falls nicht explizit ausformuliert, wird im Folgenden auf eine Unterscheidung zwischen „starkem“ und „schwachem“ impliziten Wissen zugunsten der besseren Lesbarkeit verzichtet. Der Begriff „implizites Wissen“ wird im Folgenden für die schwache Form verwendet.

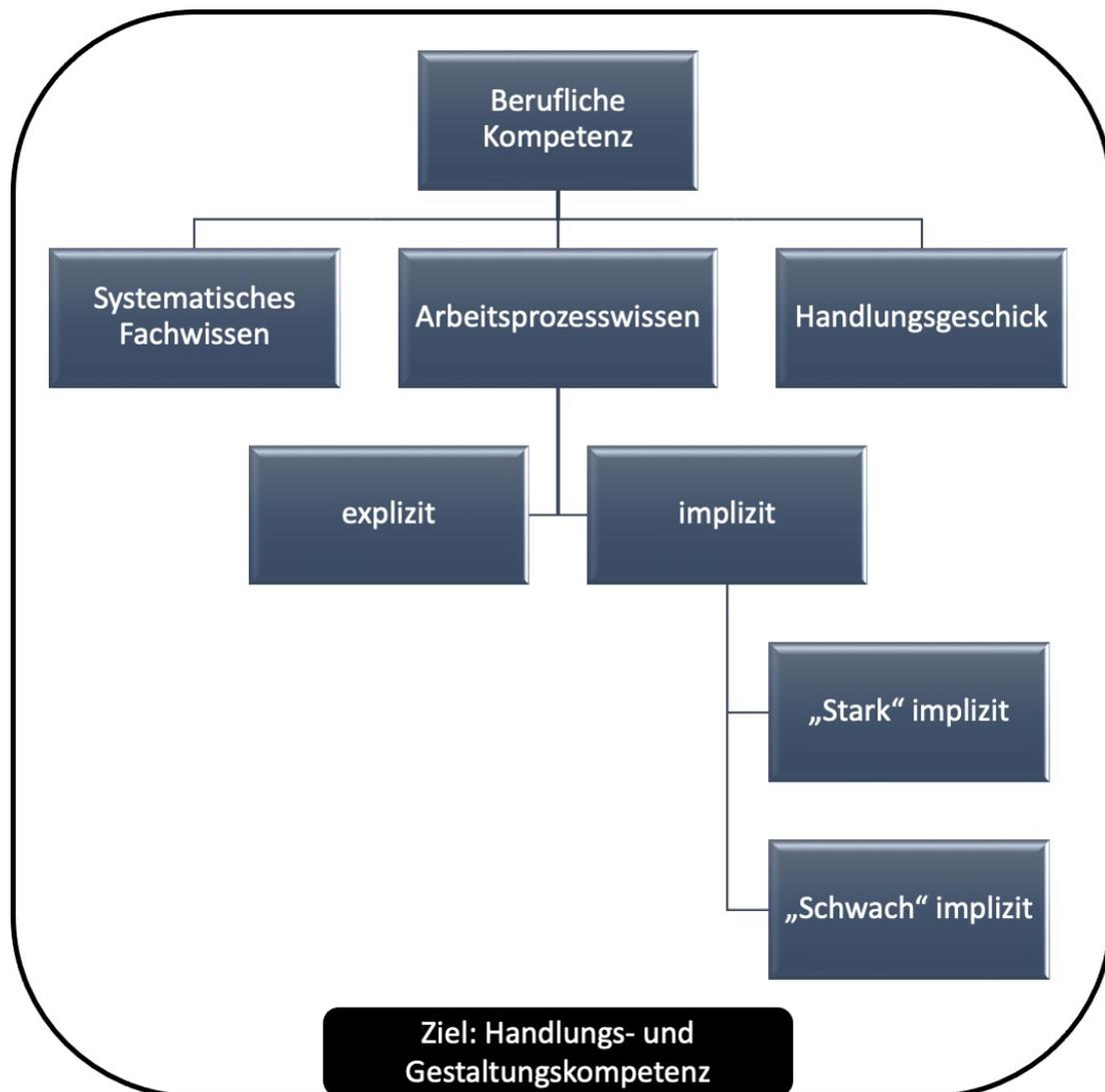


Abbildung 2.6: Einordnung des Arbeitsprozesswissens

Quelle: eigene Darstellung

In der beruflichen Bildung ist die Zielperspektive des Kompetenzbegriffs, inklusive aller genannten Bestandteile, der Erwerb von beruflicher Handlungs- und Gestaltungskompetenz (vgl. Dehnbostel, 2018; Pahl, 2015; Rauner, 2013). Handlungskompetenz beschreibt die Fähigkeit, theoretisches Wissen und praktische Fertigkeiten in einem bestimmten Berufsfeld oder Arbeitsbereich anzuwenden. Als Überbegriff umfasst sie sowohl fachliche als auch überfachliche Kompetenzen, wie beispielsweise Kommunikations- und Teamfähigkeit, Kreativität und Problemlösungskompetenz, Selbstständigkeit und Verantwortungsbewusstsein sowie die Fähigkeit zur Selbstreflexion (Dehnbostel & Lindemann, 2007, S. 181ff.). Gestaltungskompetenz baut auf der Handlungskompetenz auf (vgl. Spöttl

& Dreher, 2009). Sie bezeichnet die Fähigkeit einer Person, aktiv und verantwortungsbewusst Veränderungsprozesse im beruflichen und gesellschaftlichen Kontext mitzugestalten und dabei zukunftsorientiert und nachhaltig zu handeln (Rauner, 2021, S. 171).

Für die eigene Arbeit ist der Erwerb beruflicher Handlungs- und Gestaltungskompetenz sowie das damit einhergehende Arbeitsprozesswissen wesentlich.

2.5 Autorensysteme im Berufsbildungsbereich

In dieser Arbeit soll Arbeitsprozesswissen mit Hilfe eines AR-basierten Autorensystems erfasst werden (vgl. Kapitel 1.2). Dafür ist es notwendig, den Terminus „Autorensystem“ im Bezug zur beruflichen Bildung vorerst einzuordnen.

Autorensysteme sind Softwarelösungen, die als Werkzeug zur Erstellung von multimedialen Inhalten dienen. Sie ermöglichen es einem Autoren interaktive Lehrinhalte zu erstellen, zu bearbeiten und zu verwalten. Diese Systeme sind so ausgelegt, dass sie dem Nutzer eine möglichst intuitive Bedienung bieten. Dabei ist festzuhalten, dass die Erstellung von multimedialen Lehr- und Lerninhalten innerhalb eines Autorensystems weitestgehend ohne Programmierkenntnisse erfolgt (Karges, 2017, S. 75). Zusammengefasst bieten Autorensysteme in der Regel eine intuitive Benutzeroberfläche, die es ermöglicht, multimediale Elemente wie Texte, Bilder, Videos, Animationen und Audioaufnahmen zu integrieren und in einer interaktiven Form zu präsentieren.

In diesem Zusammenhang kann es sich bei Autoren beispielsweise um Trainer, Dozenten, Lehrer oder andere Fachexperten handeln. Diese müssen Lernende dazu anleiten, sich intrinsisch, selbstgesteuert und reflektiert mit dem Lerngegenstand innerhalb des Autorensystems auseinandersetzen (vgl. Wiemer, 2015). Durch diese Art des „Autorenlernens“ werden die Lerner zu Koautoren des Systems. Dementsprechend basiert das Autorensystem auf einem

konstruktivistischen Ansatz⁷, da die Lernenden innerhalb des Systems aktiv an der Konstruktion ihres eigenen Wissens beteiligt sind.

Das AR-basierte Autorensystem der eigenen Arbeit soll das „Lernen im Arbeitsprozess“ ermöglichen und in Anlehnung an das Konzept des Arbeitsprozesswissens eine gestaltungsorientierte Berufsbildung ermöglichen (Rauner, 2013, S. 17).

⁷ Konkret geht es um den „gemäßigten“ Konstruktivismus, der sich von radikaleren Formen dadurch abgrenzt, dass die Wahrnehmung und das Verständnis der Welt durch eine Kombination aus individueller Konstruktion und Erfahrung beeinflusst werden. Demnach wird neues Wissen mit bereits vorhandenem Wissen kombiniert bei gleichzeitiger Einbeziehung der Umwelt (vgl. Dubs, 1995).

3 Bewertung sowie Forschungs- und Handlungsbedarf

Industrie 3.0 führte die Automatisierung von Produktionsmitteln ein, während Industrie 4.0 einen weiteren Schritt geht und auch die Automatisierung von Produktionsentscheidungen umfasst. Diese Automatisierung geht mit einem Komplexitätszuwachs einher, da die beabsichtigte Produktions- und Qualitätssteigerung nur umgesetzt werden kann, wenn das notwendige (Arbeitsprozess-)Wissen vollumfänglich vorhanden ist. Somit kann eine „Algorithmierung“ von Prozessentscheidungen nur durch die Verbalisierung von Arbeitsprozesswissen, welches aus der Facharbeit heraus entstanden ist, realisiert werden (vgl. Dreher, 2020). Abbildung 3.1 veranschaulicht die wesentlichen Zusammenhänge der genannten Parameter.

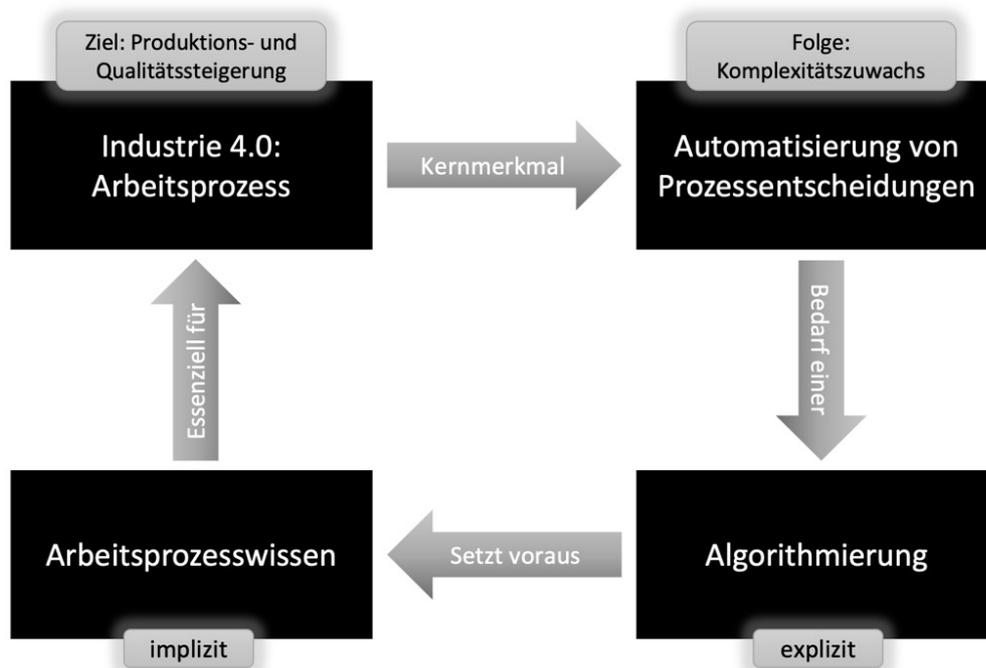


Abbildung 3.1: Arbeitsprozess und Automatisierung von Prozessentscheidungen

Quelle: eigene Darstellung

Algorithmierung bedeutet in diesem Szenario, dass Arbeitsprozesse, welche zuvor vorrangig von menschlichen Arbeitskräften ausgeübt wurden, durch informa-

tionstechnologische Systeme digitalisiert und übernommen werden. Für „einfache Arbeitsroutinen“, wie beispielsweise der Qualitätskontrolle von Produkten am Fließband, hat eine Algorithmierung dieser Tätigkeit in vielen Betrieben bereits stattgefunden. Eine steigende Komplexität des Arbeitsprozesses erschwert folglich auch dessen Algorithmierung. Insbesondere bei der Betrachtung von Arbeitsprozesswissen ist festzustellen, dass es sich aufgrund fehlender und nur schwer explizierbarer Handlungsregeln gegen eine informationstechnologische Algorithmierung sperrt (Hirsch-Kreinsen & Itterman, 2017, S. 145).

Dieses Problem geht auf Michael Polanyis „Polanyi Paradoxon“ zurück, welches er treffend durch die Phrase „we know more than we can tell“ (nicht alles was wir wissen, können wir ausdrücklich artikulieren) beschreibt (vgl. Polanyi, 1966). Polanyi argumentiert, dass wir als menschliche Wesen oft implizites Wissen besitzen, das schwer zu erklären ist oder das wir selbst nicht vollständig verstehen.

Ein Beispiel:

In der Automechanik können Techniken wie das Wechseln von Reifen, das Durchführen von Ölwechseln und das Ersetzen von Bremsbelägen erlernt werden. Allerdings erfordert das Erkennen von Problemen, wie zum Beispiel ungewöhnlichen Geräuschen oder Verhaltensweisen des Autos, ein Verständnis der zugrundeliegenden Mechanismen und Systeme. Dieses implizite Wissen kann nur schwer formalisiert und an andere weitergegeben werden, da es oft auf praktischer Erfahrung und Einschätzung basiert.

Dieses Beispiel soll aufzeigen, dass das Paradoxon von Polanyi auch in der gewerblich-technischen Facharbeiterausbildung relevant ist. Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen eröffnen die Möglichkeit, explizites Wissen und Fähigkeiten zu vermitteln und fördern durch praxisorientierte Lernszenarien den Erwerb von implizitem Wissen. Durch Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen sollen nicht nur explizites Wissen und Fähigkeiten vermittelt werden, sondern auch implizite Kenntnisse, welche oft durch Erfahrung und Praxis erworben werden. Dieses implizite Wissen kann nur durch die Reflexion des vorangegangenen Handlungsaktes entstehen, um so einen wesentlichen Bestandteil des Erkenntnisprozesses bei der Bewältigung von Arbeitsprozessen zu bilden. Das Paradoxon besteht letztlich darin, dass das implizite Wissen für die Facharbeiterausbildung unerlässlich ist, sich jedoch nur schwer artikulieren und vermitteln lässt. An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an. Mit Hilfe eines AR-basierten Autorensystems soll

versucht werden, das Paradoxon für ausgewählte Unterstützungsszenarien zu lösen. Um dieses Ziel zu erreichen, soll implizites Wissen in Form kleiner Wissensfragmente bei der Bewältigung von Arbeitsprozessen mit Hilfe eines AR-basierten Assistenzsystems eingebunden werden.

Verschiedene technologische Ansätze der Industrie 4.0 versuchen bereits Polanyis Paradoxon zu umgehen (Autor, 2014, S. 29f.). Das wohl prominenteste Beispiel hierfür ist die Algorithmierung von Arbeitsprozessen durch Machine-Learning-Technologien. In diesem Fall lernen Computersysteme, Muster in Daten zu erkennen und auf dieser Basis selbstständig Entscheidungen zu treffen. Dafür werden jedoch eine ausreichende Menge an Daten, passende Algorithmen und, je nach Komplexität des Anwendungsszenarios, entsprechend viel Rechenleistung benötigt. Das Unterstützungsszenario der vorliegenden Arbeit beschränkt sich auf die manuelle Montage von individuellen Baugruppen, bei denen eine vollständige Automatisierung der Tätigkeiten nur schwer möglich oder nicht wirtschaftlich ist. Aufgrund der mangelhaften Datenlage bei diesen Szenarien ist die rechnergestützte Analyse von Arbeitsprozesswissen durch Machine-Learning-Systeme nicht sinnvoll umsetzbar. Ein AR-System kann in diesen Fällen dabei helfen, implizites Arbeitsprozesswissen für den Benutzer zugänglich zu machen, um komplexe Konzepte besser zu verstehen. Insbesondere die Implementierung eines Autorensystems bietet das Potenzial, Arbeitsprozesswissen nachhaltig digital zu verankern und somit vor allem für das Grundverständnis des Arbeitsprozesses in der anfänglichen Lernphase einen Vorteil zu bieten. In der vorliegenden Arbeit soll ein entsprechendes Autorensystem in verschiedenen Versuchsreihen eingesetzt werden. Die Nutzer sollen dazu befähigt werden, AR-Inhalte in Form von implizitem Wissen selbstständig in dieses Autorensystem einzubringen. Dies führt zu folgender Hauptforschungsfrage:

„Kann die Augmented-Reality Autorentätigkeit mit dem Effekt der Offenlegung von impliziten Wissensinhalten in der beruflichen Bildung etabliert werden?“

Um diese Frage beantworten zu können, muss zunächst erfasst werden, welche Voraussetzungen geschaffen werden müssen, um AR-Inhalte in die entsprechende Hardware zu transportieren. Konkret sind dafür zwei Elemente erforderlich:

- Die Offenlegung des Arbeitsprozesswissens und
- ein leicht zu bedienendes Autorensystem.

Die eigentliche Autorentätigkeit besteht im Anschluss darin, das erschlossene Arbeitsprozesswissen aufzubereiten und in die AR-Hardware zu übertragen. Zudem soll abschließend evaluiert werden, ob und inwieweit das Polanyi Paradoxon durch das AR-Autorensystem gelöst werden kann.

Zusammenfassend lassen sich folgende Null- und Alternativhypothesen für diese Forschungsarbeit aufstellen:

Nullhypothese

Augmented Reality Autorentätigkeit in der beruflichen Bildung trägt nicht dazu bei implizite Wissensinhalte offenzulegen.

Alternativhypothese

Augmented Reality Autorentätigkeit in der beruflichen Bildung ermöglicht die Offenlegung und Weitergabe von impliziten Wissensinhalten.

4 Methodisches Vorgehen

4.1 Wissenspsychologische Grundlage

Um das implizite Wissen von Facharbeitern in Bezug auf die Bewältigung von Arbeitsprozessen offenzulegen, ist es zunächst erforderlich, ein fundamentales Verständnis für die Prozesse zu entwickeln, die dabei involviert sind. Facharbeiter, die über langjährige Erfahrung in ihrem spezifischen Tätigkeitsbereich verfügen, haben tendenziell ein großes Maß an implizitem Wissen (Fischer, 2007, S. 164ff.). Dieses Arbeitsprozesswissen⁸ entsteht durch das kontinuierliche praktische Handeln und die Bewältigung von Aufgaben im Laufe der Zeit. Hierbei ist wichtig anzumerken, dass das Ausmaß des impliziten Wissens von Facharbeitern stark von ihrer Erfahrung, ihrem Lernverhalten und ihrer Fähigkeit zur Reflexion abhängt (Neuweg, 2005, S. 219f.). Um relevante Ergebnisse in der vorliegenden Arbeit zu erzielen, ist deshalb die Einbindung erfahrener Facharbeiter mit hoher fachlicher Expertise und Arbeitsprozesswissen von Vorteil, da dies die Auffindbarkeit von Arbeitsprozesswissen erleichtern würde. Besonders relevante Elemente von Arbeitsprozesswissen werden im Folgenden kurz dargestellt:

Automatisierung/Routine

Facharbeiter, die über langjährige Erfahrung in einem bestimmten Arbeitsbereich verfügen, entwickeln automatisierte Denk- und Handlungsprozesse. Dies beinhaltet die Fähigkeit, Aufgaben routinemäßig und effizient auszuführen, ohne bewusstes Nachdenken oder Anstrengung. Automatisierung kann es Facharbeitern ermöglichen, komplexe Arbeitsprozesse zu bewältigen, indem sie Mustererkennung, schnelle Entscheidungsfindung und reaktionsschnelle Handlungen nutzen (Wentura & Frings, 2012, S. 119f.).

Situationsbewusstsein/Wahrnehmungsfähigkeit

Situationsbewusstsein bezieht sich auf die Fähigkeit von Facharbeitern, ihre Arbeitsumgebung zu verstehen und relevante Informationen zu erfassen (Hirsch-

⁸ Zur hier vorgenommenen Gleichsetzung von Arbeitsprozesswissen und implizitem Wissen vgl. Kapitel 2.4

Kreinsen & ten Hompel, 2017, S. 51). Durch eine ausgeprägte Fähigkeit zur Wahrnehmung der Situation können diese Informationen interpretiert und effektiv verarbeitet werden. Auch hier führt die Verarbeitung visueller, auditiver oder taktiler Reize zu einer effektiveren Mustererkennung am Arbeitsplatz.

Problemlösefähigkeit

Die Problemlösefähigkeit umfasst mehrere Schritte. Zunächst wird das Problem identifiziert und definiert. Dann werden die möglichen Ursachen analysiert, indem Informationen gesammelt und Zusammenhänge untersucht werden. Im Anschluss werden Vor- und Nachteile für die Findung einer Lösung evaluiert. Facharbeiter mit gut entwickelter Problemlösekompetenz verfügen über ausgeprägte kognitive Fähigkeiten im Bereich kritisches Denken, analytisches Denken und Entscheidungsfindung (vgl. Putz-Osterloh, 1988).

Metakognition

Metakognition bezieht sich auf das Bewusstsein und die Kontrolle über die eigenen kognitiven Prozesse. Facharbeiter mit gut entwickelter Metakognition haben die Fähigkeit, ihre Denk- und Lernstrategien zu überwachen, zu reflektieren und anzupassen (Seel & Hanke, 2015, S. 363). Sie sind sich ihren eigenen Stärken und Schwächen bewusst und können ihre Arbeitsweise effizient gestalten.

Gedächtnis

Das Gedächtnis spielt eine entscheidende Rolle bei der Aneignung von Arbeitsprozesswissen, da es Facharbeitern ermöglicht, Informationen über Verfahren, Abläufe und Best Practices aufzunehmen und abzurufen. Es bildet den Sockel, auf dem Facharbeiter ihr Wissen und ihre Fähigkeiten aufbauen können, um komplexe Arbeitsprozesse zu verstehen und erfolgreich auszuführen.

Die aufgeführten Elemente verdeutlichen, dass eine Vielzahl von kognitiven Prozessen bei der Aneignung von Arbeitsprozesswissen beteiligt sind. Der für eine Montageaufgabe „ideale“ Facharbeiter besitzt ausgeprägte Fähigkeiten in allen Bereichen. Für die vorliegende Arbeit ist es notwendig, Informationen aus diesen kognitiven Prozessen von Facharbeitern zu extrahieren. Dafür sind insbesondere der Erwerb von Wissen, die effiziente Wissensdarbietung und die Übertragung

von Wissen von Interesse, welche in den folgenden Unterkapiteln genauer betrachtet werden.

4.1.1 Theoretischer Ansatz zum Erwerb von Arbeitsprozesswissen

Der Erwerb von Arbeitsprozesswissen (und somit auch beruflicher Kompetenz, vgl. Kap. 2.4) kann mit Hilfe der ACT-Theorie (Adaptive Control of Thought-Theorie) beschrieben werden (vgl. Anderson, 1996). Die ACT-Theorie wird von *Anderson* seit den 1970er Jahren entwickelt und stellt ein Modell der kognitiven Struktur dar, das darauf abzielt, verschiedene grundlegende Aspekte der menschlichen Informationsverarbeitung zu erklären. Die Grundlage der ACT-Theorie ist die Unterscheidung zwischen zwei Arten von Wissen: dem deklarativen Wissen und dem prozeduralen Wissen. Deklaratives Wissen besteht aus Fakten und Informationen, die verbalisiert werden können. Die vorliegende Arbeit behandelt das deklarative Wissen als gleichbedeutend mit dem expliziten Wissen, welches in Kapitel 2.4 erläutert wurde. Prozedurales Wissen hingegen stellt die Fähigkeiten und Fertigkeiten dar, die bereits erlernt wurden und ohne bewusstes Nachdenken ausgeführt werden können. Es ist nur schwer zu verbalisieren und für die vorliegende Arbeit mit dem impliziten Wissen gleichzusetzen.

Um die Funktionsweise von prozeduralem Wissen zu verstehen, werden sogenannte Produktionssysteme verwendet (Mandl et al., 1987, S. 136). Sie repräsentieren die Art und Weise, wie Aufgaben ausgeführt werden, oder das „Know-how“. Im Detail besteht ein Produktionssystem aus einer Reihe von „Produktionen“, die jeweils eine Regel darstellen. Jede Regel besteht aus zwei Teilen: einem „WENN“-Teil (der Bedingung) und einem „DANN“-Teil (der Aktion). Diese Syntax einer Produktion kann mit einem typischen IF-THEN-Programmkonstrukt einer höheren Programmiersprache verglichen werden (Fischer, 2007, S. 157). Demnach kann ein allgemeines Beispiel für eine Produktion wie folgt lauten: WENN Bedingung A erfüllt ist, DANN führe die Aktion B aus. Die Produktionssysteme spielen eine entscheidende Rolle im Lernprozess der ACT-Theorie, da sie die Prozeduralisierung des Wissens beim Fertigkeitserwerb ermöglichen. Typischerweise durchläuft ein Produktionssystem drei Phasen (vgl. Abbildung 4.1):

1. Erwerbsphase:

In dieser Phase wird neues Wissen hauptsächlich in Form deklarativer Fakten oder Regeln erworben. Dies geschieht in der Regel durch Beobachtung und Übung, oft mit Feedback eines Experten oder durch Versuch und Irrtum. Es wird eine Menge an deklarativem Wissen erzeugt, das später in Prozeduren umgewandelt werden kann.

2. Kompilationsphase:

In dieser Phase wird deklaratives Wissen in prozedurales Wissen umgewandelt, ein Prozess, der als Kompilation bezeichnet wird. Dies bedeutet, dass Informationen, die ursprünglich in Form von Fakten oder Regeln erworben wurden, in Produktionen umgewandelt werden, die automatisch oder unbewusst angewendet werden können. Um eine schnellere Informationsverarbeitung zu ermöglichen, entfällt nun die Notwendigkeit des ständigen Verinnerlichen von Informationen und es können größere Informationseinheiten auf einmal effizient verarbeitet werden.

3. Tuning-Phase:

In dieser Phase werden die Produktionen durch weitere Praxis und Erfahrung verfeinert und optimiert. Dies kann das Anpassen der Bedingungen oder Aktionen der Produktionen umfassen, um sie effektiver zu machen. Zudem kann das „Tuning“ dazu führen, dass prozedurales Wissen zunehmend effizienter und automatischer wird, was einen konstruktivistischen Akt darstellt.

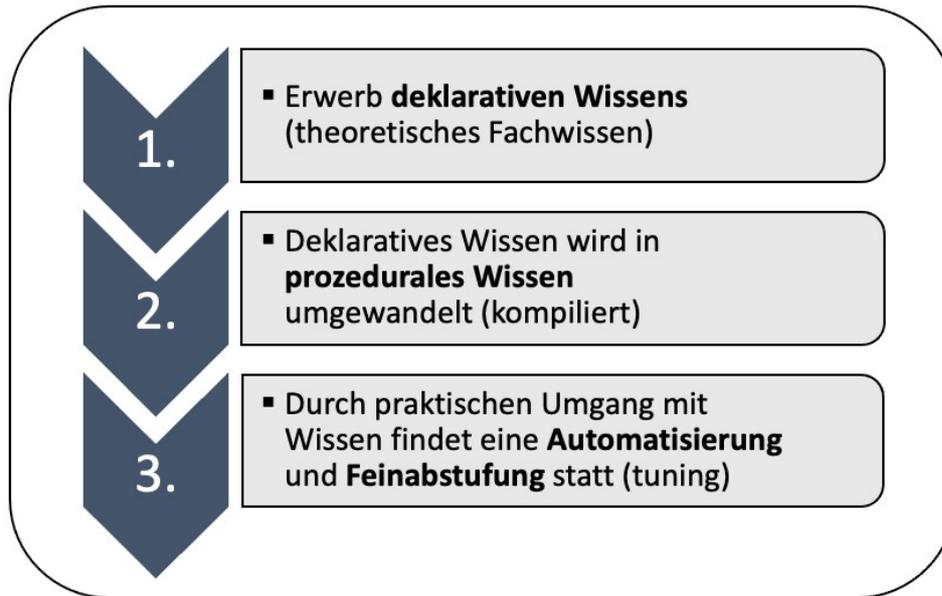


Abbildung 4.1: Drei Phasen der ACT-Theorie nach Anderson

Quelle: eigene Darstellung (in Anlehnung an Fischer, 2007, S. 160)

Diese drei Phasen repräsentieren den Prozess des Erwerbs und der Anwendung prozeduralen Wissens, welcher typischerweise (wie in Abbildung 4.1 dargestellt) linear abläuft. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass dieser Prozess nicht strikt linear ist. Zum Beispiel kann ein Individuum während der Tuning-Phase neues Wissen erwerben oder während der Kompilationsphase die bestehenden Produktionen verfeinern. Des Weiteren kann die Phase des Tunings auch eine negative Komponente besitzen, wenn beispielsweise die Automatisierung einer Tätigkeit zu Unaufmerksamkeiten oder Nachlässigkeit führt. Diese Form der Routineblindheit tritt zum Beispiel auf, wenn Arbeitskräfte Aufgaben so oft wiederholen, dass sie beginnen, Sicherheitschecks oder Qualitätsprüfungen zu überspringen. In diesem Szenario verlässt sich die Arbeitskraft auf die Tatsache, dass bei vorherigen Durchläufen ihrer Tätigkeit nie Probleme aufgetreten sind und nimmt fälschlicherweise an, dass dies auch in Zukunft so sein wird. Dies kann zu Unfällen, Fehlern oder Qualitätsmängeln führen. Das negative Tuning kann als eine zusätzliche metakognitive Ebene betrachtet werden, die neben der dritten Phase des Tunings existiert und als eine ergänzende vierte Phase verstanden werden kann. Dieser Sachverhalt wird in Abbildung 4.2 verdeutlicht.

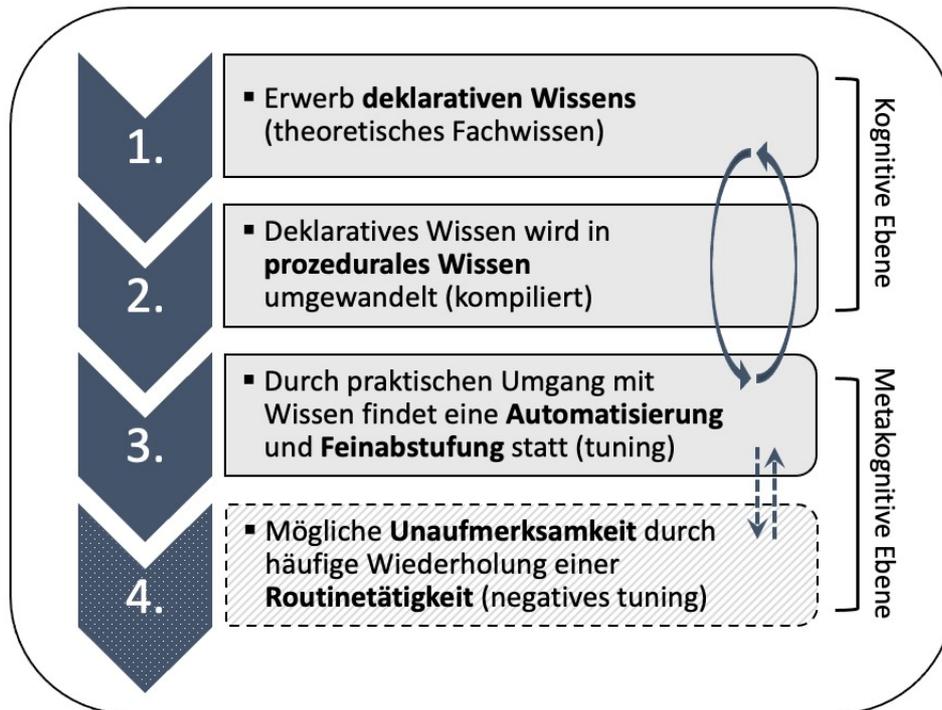


Abbildung 4.2: Negatives Tuning als Phase der ACT-Theorie

Quelle: eigene Darstellung

Besonders relevant für die Fragestellung der vorliegenden Arbeit sind die Kompilationsmomente in Phase 2 und die Optimierungsmomente in Phase 3. Diese Leistungsaspekte werden in Kapitel 6.2 näher untersucht, indem sie zusammenfassend als Performanzmomente betrachtet werden. Das in diesen Momenten gewonnene Wissen, welches durch das Arbeitsgedächtnis⁹ verarbeitet wird, gilt es zu rekonstruieren und dokumentieren.

4.1.2 Wissensrekonstruktion und -darbietung durch Chunks

An dieser Stelle soll zunächst der Begriff des für die vorliegende Arbeit „relevanten Wissens“ eingegrenzt werden: Gesucht ist das Wissen, welches sich auf Fähigkeiten oder Verfahren bezieht, die oftmals unbewusst oder automatisch ausgeführt werden. Dieses Wissen wird in der Fachliteratur häufig simultan mit „Arbeitsprozesswissen“ (vgl. Fischer, 2018), „tacit knowledge“ (vgl. Polanyi, 1985), „knowing how“ (vgl. Ryle & Baier, 1969), „prozeduralem Wissen“ (vgl. Anderson,

⁹ In diesem Kontext ist der Ausdruck „Arbeitsgedächtnis“ gleichbedeutend mit dem allgemein bekannteren Terminus „Kurzzeitgedächtnis“.

1996), „Erfahrungswissen“ (vgl. Dehnbostel, 1998) oder „implizitem Wissen“ (vgl. Neuweg, 2005) genannt oder gleichgesetzt. Ein gemeinsames Merkmal all dieser Notationen ist, dass das betreffende Wissen bei der Anwendung in der Praxis im Arbeitsgedächtnis verarbeitet wird. In der vorliegenden Arbeit soll versucht werden, dieses Moment zu nutzen, um das Wissen zu rekonstruieren, indem es durch sogenannte „Chunks“ verbalisiert wird.

Das Konzept des Chunking geht auf den Kognitionswissenschaftler *George A. Miller* zurück und bezieht sich auf die kognitive Fähigkeit, mehrere Elemente von Arbeitsprozesswissen zusammenhängend in einer größeren Einheit¹⁰ (einem „Chunk“) wahrzunehmen (vgl. Miller, 1956). *Millers* hierzu aufgestellte Chunk-Theorie besagt, dass das Arbeitsgedächtnis nur eine begrenzte Anzahl von Informationslücken gleichzeitig verarbeiten kann, jedoch durch die Organisation von Informationen in Chunks diese Kapazität effektiv genutzt werden kann. Laut *Miller* kann das menschliche Arbeitsgedächtnis etwa sieben (plus/minus zwei) Chunks von Informationen gleichzeitig verarbeiten. Allerdings ist es wichtig zu beachten, dass diese Zahl als Durchschnittswert zu verstehen ist und je nach Situation und Individuum variieren kann (Seel & Hanke, 2015, S. 319). Beispielsweise können die Größe und Komplexität der Chunks, die eine Person verarbeiten kann, je nach Art der Information und den Kenntnissen oder Erfahrungen der Person variieren. Folglich werden Chunks als handlungsleitende Wissensinhalte verstanden, die als situativer Reiz aktiviert und ins Arbeitsgedächtnis gerufen werden (vgl. Dreher & Reineking, 2024). Ferner werden Chunks „bereits während der Ausführung einer ständigen personalen Reflexion (z. B. Effizienz), Evaluation (z. B. Machbarkeit, Verantwortbarkeit) und damit letztlich Weiterentwicklung (Evolution) unterzogen“ (ebd.), womit sie aufgrund ihrer stabilen Gedächtnisstruktur durch selbstreflexives Problemlösen offengelegt werden können (Putz-Osterloh, 1988, S. 252f.).

In der vorliegenden Arbeit soll Arbeitsprozesswissen in Form von Chunks offengelegt und übertragen werden.

¹⁰ Der Ansatz, Informationen in einem einheitlichen Rahmen zu organisieren, wird auch in der (nicht einheitlichen) Schematheorie vertreten (Mandl et al., 1987, S. 124f.). Hier ist die Trennung zwischen deklarativem und prozeduralem Wissen jedoch unzureichend (ebd., S. 134)

4.1.3 Kommunikation von Wissen

Um einen Transfer von Arbeitsprozesswissen zu ermöglichen, bedarf es eines Kommunikationsprozesses. Eine vereinfachte Darstellung der Kommunikation und der Wissensübertragung kann durch das Sender-Empfänger-Modell von *Shannon* und *Weaver* verständlich gemacht werden (vgl. Shannon & Weaver, 1976). Es stellt den Prozess der Wissensübertragung als einen Zyklus dar, der aus mehreren Schlüsselementen besteht, welche im Folgenden kurz erläutert werden.

Sender

Der Sender ist die Person oder das Objekt, das eine Nachricht oder eine Information übertragen möchte. Der Sender codiert das Wissen in eine für die Übertragung geeignete Form, beispielsweise in Sprache, Schrift oder andere Kommunikationsmittel.

Nachricht

Die Nachricht ist die Information, die der Sender übertragen möchte. Sie kann in vielen Formen auftreten, wie zum Beispiel Worte, Gesten, Bilder, Symbole oder Töne. Zudem kann die übermittelte Information verschiedene Formen von Wissen enthalten, wie beispielsweise Fakten, Konzepte, Anweisungen, Erfahrungen, Einsichten etc.

Codierung

Die Codierung bezieht sich auf den Prozess, bei dem der Sender die Nachricht in eine Form bringt, die für die Übertragung geeignet ist. Dies könnte zum Beispiel das Schreiben eines Briefes, das Tippen einer E-Mail oder das Aufnahmen einer Sprachnachricht sein.

Kanal

Der Kanal ist das Medium oder der Weg, über den die Botschaft übertragen wird. Es kann sich um physische Medien wie Papier, elektronische Medien wie E-Mails oder um persönliche Interaktionen handeln. Der Kanal kann auch Geräte oder Technologien umfassen, die zur Übertragung des Wissens verwendet werden, wie beispielsweise Computer, mobile Endgeräte oder das Internet.

Decodierung

Der Empfänger entschlüsselt oder decodiert die übermittelte Botschaft, um das enthaltene Wissen zu verstehen. Dieser Prozess erfordert das Verständnis der Sprache, Symbole oder anderer Elemente, die in der Botschaft verwendet werden.

Empfänger

Der Empfänger ist die Person oder das Objekt, der die Nachricht erhält. Er sollte über die erforderlichen Fähigkeiten, das Wissen zu verstehen und zu interpretieren, sowie über die notwendigen Vorkenntnisse verfügen, um die Nachricht erfolgreich zu empfangen.

Feedback

Das Feedback ist die Reaktion des Empfängers auf die Nachricht. Es ermöglicht dem Sender zu wissen, ob die Nachricht korrekt verstanden wurde.

Abbildung 4.3 veranschaulicht, wie die verschiedenen Elemente ineinandergreifen.

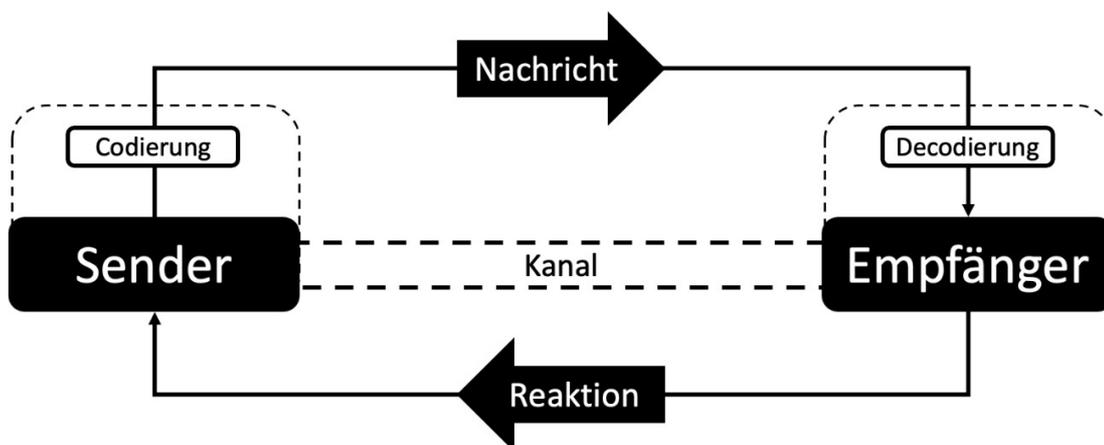


Abbildung 4.3: Elemente der Kommunikation nach Shannon und Weaver

Quelle: eigene Darstellung (in Anlehnung an Shannon & Weaver, 1976)

Das Sender-Empfänger-Modell betont auch das Potenzial für „Rauschen“ oder Störungen im Kommunikationsprozess (vgl. Röhner & Schütz, 2012). In der Wissensübertragung können solche Störungen beispielsweise durch

Missverständnisse, Vorurteile, Ablenkungen, komplexe oder unklare Informationen, Informationsüberflutung oder mangelnde Vorkenntnisse des Empfängers entstehen¹¹.

Um eine effektive Wissensübertragung zu gewährleisten, dürfen die Informationen innerhalb des Arbeitsprozesses nicht zu einer kognitiven Überlastung bei der Arbeitskraft führen. Das Sender-Empfänger-Modell ist eine vereinfachte Darstellung der Kommunikation, welche für den Transfer von Arbeitsprozesswissen konkretisiert werden muss. Bei der Betrachtung der Cognitive Load Theory (CLT) wird in Analogie zu *Miller* deutlich, warum die „Nachricht“ in Form von Chunks für die Übertragung von Arbeitsprozesswissen sinnvoll ist. Nach der CLT hat das Arbeitsgedächtnis eine begrenzte Kapazität, wodurch die Menge an neuen Informationen, die es gleichzeitig verarbeiten kann, beschränkt ist (vgl. Kirschner, 2002). Diese Beanspruchung wird als „kognitive Belastung“ bezeichnet. Wenn die kognitive Belastung zu hoch ist, beispielsweise durch zu viele neue Informationen oder zu komplexe Aufgaben, kann dies das Verständnis beeinträchtigen. In diesem Zusammenhang lässt sich die Chunk-Theorie von *Miller* gut mit der CLT verbinden. Durch die Umwandlung von Informationen in Chunks kann die kognitive Belastung effektiv reduziert werden. Die Chunk-Theorie bietet also eine konkrete Methode (chunking), um das Arbeitsgedächtnis effizient zu nutzen. Dementsprechend findet eine leichte Modifizierung des Sender-Empfänger-Modells statt (vgl. Abbildung 4.4).

¹¹ Nach *de Saussure* (2011) entstehen Missverständnisse im Kommunikationssystem, wenn die jeweilige Codierung von Sender und Empfänger (*de Saussure* spricht hier von „Langue“) nicht einheitlich sind. Es gilt daher, die Nachricht (oder die „Parole“) möglichst unmissverständlich und eindeutig zu gestalten (vgl. *Culler*, 1986).

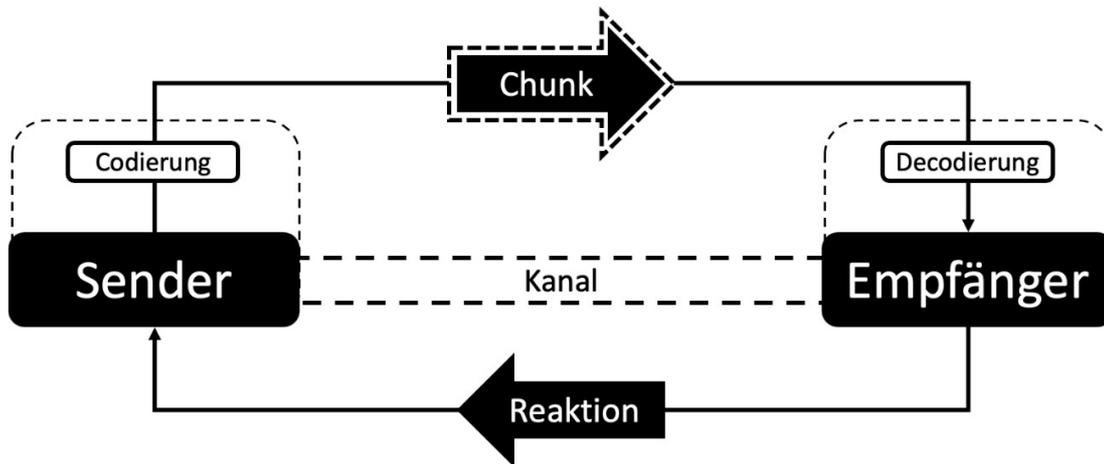


Abbildung 4.4: Sender-Empfänger-Modell mit Berücksichtigung von Chunks

Quelle: eigene Darstellung (in Anlehnung an Shannon & Weaver, 1976)

Im nächsten Schritt gilt es die Charakteristika des Mediums festzulegen, das als *Kanal* für den Transfer von Arbeitsprozesswissen genutzt wird.

4.2 AR-Autorensystem

Damit Chunks effektiv vermittelt werden können, ist es wichtig, dass das Autorensystem die in Abbildung 4.4 dargestellten Kommunikationselemente enthält. Der Sender sollte in der Lage sein, seine Chunks auf eine sinnvoll codierte Weise in das System einzufügen. Auf der anderen Seite muss der Empfänger dann in der Lage sein, den Chunk im System zu decodieren, wobei er seiner eigenen Interpretation oder Subjektivität folgt. Innerhalb des Autorensystems ist die Reaktion ein optionales Element. Beispielsweise kann der Empfänger den erhaltenen Chunk modifizieren oder neue Chunks hinzufügen. Im besten Fall ist jedoch keine direkte Reaktion im System erforderlich, was darauf hindeutet, dass der Nutzer erfolgreich mit dem vorhandenen Chunk arbeiten konnte. In diesem Szenario ist „keine Reaktion“ die optimale Reaktion¹². Im modifizierten Sender-Empfänger-Modell (vgl. Abbildung 4.4) übernimmt das AR-Autorensystem die

¹² Gemäß dem prominenten Zitat von Paul Watzlawick „Man kann nicht nicht kommunizieren“ (vgl. Watzlawick et al., 1969)

Funktion des Kommunikationskanals und stellt zugleich den Rahmen für die Kommunikation dar. Abbildung 4.5 veranschaulicht das resultierende Konzept.

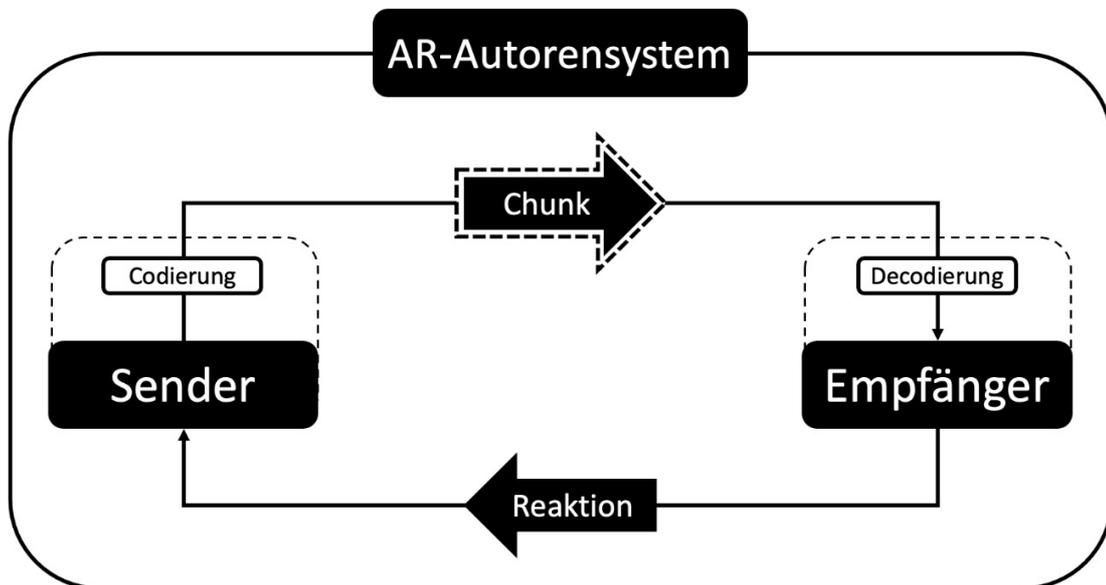


Abbildung 4.5: Kommunikation im AR-Autorensystem

Quelle: eigene Darstellung (in Anlehnung an Shannon & Weaver, 1976)

Das dargestellte Konzept veranschaulicht die Kommunikation innerhalb des AR-Autorensystems in einer sehr allgemeinen Form. Für die vorliegende Arbeit ist eine bimodale Betrachtungsweise der Sender-Empfänger-Konstellation möglich. Hierbei ist die Kommunikation zwischen Facharbeiter-Wissenschaftler und Facharbeiter-Facharbeiter zu unterscheiden. Bei erstgenannter Konstellation ist für den Wissenschaftler von Interesse, ob Chunks offengelegt wurden. Im zweiten Fall interessiert den Facharbeiter, ob die Anwendung des AR-Autorensystems einen Mehrwert bietet. Um einen konkreten Bezug zur Anwendung im gewerblich-technischen Bereich herzustellen, müssen einige Elemente näher definiert werden. Dabei sind insbesondere das Interaktionsdesign, das Multimediadesign und die Implementation von Bedeutung (vgl. Niegemann, 2020; Niegemann et al., 2008).

4.2.1 Interaktionsdesign

Das Interaktionsdesign ist ein wesentlicher Aspekt bei der Entwicklung jedes digitalen Systems. Es konzentriert sich auf die Gestaltung einer intuitiven und

effektiven Interaktion zwischen Benutzern und dem System. Dabei werden alle Kriterien einer guten Nutzbarkeit betrachtet, insbesondere die in Tabelle 4.1 aufgeführten Elemente.

Tabelle 4.1: Elemente des Interaktionsdesigns

Element	Beschreibung
Benutzerfreundlichkeit	Das System sollte intuitiv zu bedienen sein, um die Akzeptanz und Nutzung durch die Nutzer zu gewährleisten. Eine hohe Benutzerfreundlichkeit beinhaltet einfache Navigation und verständliche Benutzeroberflächen. Eine zu komplexe Benutzeroberfläche könnte abschreckend wirken und dazu führen, dass das System weniger verwendet wird.
Zugänglichkeit	Das Autorensystem sollte von jedem Ort und Gerät aus für den Nutzer zugänglich sein. Im besten Fall sollten mobile Lösungen priorisiert werden, die eine ortsunabhängige Einsatzfähigkeit bieten.
Flexibilität	Das System sollte flexibel genug sein, um verschiedenen Montageprozessen gerecht zu werden. Eingewiesene Nutzer sollten in der Lage sein, den Inhalt nach Bedarf zu modifizieren.
Test- und Überprüfungsfunktion	Das System sollte Funktionen für das Testen und Überprüfen der Anleitungen auf digitaler Ebene beinhalten, um sicherzustellen, dass sie korrekt und effektiv dargestellt werden. Die sachlogische Nutzung der Inhalte ist dabei nicht inbegriffen.

4.2.2 Multimediadesign

Im Kontext des Autorensystems bezieht sich das Multimediadesign auf die Fähigkeit des Systems, verschiedene Arten von Medien zu unterstützen und zu integrieren. Ein gut gestaltetes Multimediadesign ermöglicht es den Benutzern, bei der Erstellung von Inhalten unterschiedliche Medien nahtlos zu verwenden sowie selbstgesteuert und subjektbedarfsorientiert zu kombinieren. Letztendlich zielt das Multimediadesign darauf ab, die Darstellung und Übermittlung von Informationen zu verbessern und somit analog zum Interaktionsdesign die Benutzererfahrung zu bereichern. Die wichtigsten multimedialen Elemente zur Gestaltung des Systems sind in Tabelle 4.2 dargestellt.

Tabelle 4.2: Elemente des Multimediadesigns

Element	Beschreibung
Text	Text ermöglicht es den Benutzern, klare Anweisungen, Beschreibungen und Erklärungen zu liefern. Text kann auch durch Stilisierung und Formatierung angepasst werden, um bestimmte Informationen hervorzuheben oder die Lesbarkeit zu verbessern.
Bild	Durch Bilder können komplexere Vorgänge visualisiert werden. In Kombination mit Text können sie die allgemeine Verständlichkeit erhöhen.
Audio	Audiodateien können verwendet werden, um zusätzliche Informationen zu liefern, Anweisungen zu vermitteln oder den Inhalt zu bereichern. Sie können besonders nützlich sein, wenn der Anwender nicht in der Lage ist, auf den Bildschirm zu schauen, oder wenn die Informationen besser durch gesprochenen Text vermittelt werden können.
Video und Animation	Videos und Animationen können dazu beitragen, Bewegungen und Veränderungen über die Zeit darzustellen. Sie können dazu verwendet werden, abstrakte Konzepte zu visualisieren oder komplexe Vorgänge in einfache, leicht verständliche Schritte zu zerlegen.
Ikonographie	Eine leicht verständliche Ikonographie (also die Verwendung von Symbolen) kann dazu beitragen, die Benutzeroberfläche intuitiver und leichter navigierbar zu machen. Der Einsatz von Symbolen kann das Verständnis von Vorgängen verbessern und dazu beitragen, Text zu reduzieren sowie die Benutzererfahrung zu verbessern.

4.2.3 Implementierung

Die Implementierung bezieht sich auf die technische Umsetzung des Autoren-systems. Dies umfasst die Nutzung kompatibler Soft- und Hardware und die Integration des Systems in bestehende Infrastrukturen. Wichtige Aspekte wie Datenschutz, Datensicherheit sowie der langfristige Support werden ebenfalls berücksichtigt. Tabelle 4.3 fasst diese Aspekte im Detail zusammen.

Tabelle 4.3: Elemente der Implementierung

Element	Beschreibung
Kompatibilität	Das System sollte idealerweise auf verschiedenen Plattformen funktionieren, einschließlich Desktop-Computern, Laptops, Tablets, Smartphones und AR-Brillen. Dies bedeutet, dass es webbasiert angeboten oder zumindest plattformübergreifende Apps für gängige Betriebssysteme bereitgestellt werden sollten.
Vernetzung	Eine Integration des Systems in bereits vorhandene Softwarestrukturen ist anzustreben. Dies ermöglicht eine bessere Verwaltung der Software und erleichtert kollaboratives Arbeiten, so dass mehrere Nutzer das System gleichzeitig nutzen und Informationen austauschen können.
Sicherheit und Datenschutz	Die Benutzer sollten sich sicher fühlen, wenn sie das System nutzen. Dazu gehört, dass ihre Daten sicher gespeichert und übertragen werden. Zudem müssen die Datenschutzrichtlinien des Unternehmens und die gesetzlichen Vorgaben eingehalten werden.
Support und Zukunftssicherheit	Da sich Technologien schnell ändern können, sollte das System in der Lage sein, sich an zukünftige Technologietrends und -standards anzupassen. Dazu gehört, dass ein technischer Support bei Bedarf zur Verfügung steht.

Das Hauptziel des AR-Autorensystems in der vorliegenden Arbeit besteht darin, einerseits Wissensinhalte zu visualisieren und andererseits Chunks zu artikulieren. Dies setzt voraus, dass Content in Form von Arbeitsprozesswissen zur Verfügung steht. Um Chunks innerhalb projektbasierter Lernaufgaben in das System einzubringen, muss demnach das dafür notwendige Arbeitsprozesswissen zunächst offengelegt werden.

4.3 Methoden zur Offenlegung von Arbeitsprozesswissen

Um Arbeitsprozesswissen zu erschließen und nutzbar zu machen, braucht es geeignete Methoden und Instrumente. Den methodischen Rahmen hierfür bildet die berufswissenschaftliche Arbeitsprozessanalyse. Als eine systematische Untersuchung von Arbeitsabläufen und -verfahren zielt sie darauf ab, das in den Prozessen eingebettete Wissen zu identifizieren, zu dokumentieren und zu verstehen (Becker & Spöttl, 2008, S. 173ff.). Sie schafft somit die Grundlage, Kompetenzen im Arbeitsprozess zu erschließen und mit Hilfe des offengelegten

Wissens die Performanz¹³ zu verbessern (vgl. Rauner, 2004; Munz et al., 2012, S. 145).

Die Arbeitsprozessanalyse erfordert eine sorgfältige Beobachtung und Untersuchung der Arbeitsabläufe, geführte Gespräche mit den Akteuren und eine Analyse von Arbeitsprodukten oder Artefakten. Dabei ist es für den Forscher wesentlich, sowohl eine hohe Sensibilität für die Details der ausgeführten Arbeiten als auch ein tieferes Verständnis für die zugrundeliegenden Fachbereiche und Technologien mitzubringen (vgl. Kap. 4.3.1). In der vorliegenden Arbeit wird zunächst die Rolle des Forschers¹⁴ näher spezifiziert, gefolgt von der Erläuterung der angewandten Methoden zur Identifizierung von Arbeitsprozesswissen im Rahmen des Forschungsprojekts.

4.3.1 Rolle des Forschers

In der Arbeitsprozessanalyse und bei der Offenlegung von Arbeitsprozesswissen spielt der Forscher eine zentrale Rolle. Vor Beginn der Arbeitsprozessanalyse liegt es in der Verantwortung des Forschers, sich mit den objektiven Gegebenheiten vertraut zu machen, die für den Arbeitsprozess relevant sind. Laut *Rauner* (2005) umfassen diese:

- Technische Aspekte wie der Arbeitsgegenstand, die Arbeitsmittel und Werkzeuge sowie die Arbeitsverfahren.
- Festlegungen in Bezug auf die betrieblichen Arbeitsaufgaben, in die der zu untersuchende Arbeitsprozess eingebunden ist.
- Vorhandene Anleitungen und Dokumentationen, die für die Ausführung der entsprechenden Arbeitsaufgaben zur Verfügung stehen.
- Fachsystematische Zusammenhänge, insbesondere theoretische Konzepte, die für das theoretisch geleitete Arbeitshandeln von Bedeutung sind.

Basierend auf diesen objektiven Gegebenheiten ist die Fachkompetenz des Forschers die entscheidende Quelle für Erkenntnisse bei der Untersuchung von

¹³ Vereinfacht dargestellt beschreibt die Kompetenz das „Wissen-wie“ und die Performanz das reale „Tun“.

¹⁴ Anmerkung: Der „Forscher“ ist mit dem Autor der vorliegenden Arbeit gleichzusetzen

Arbeitsprozesswissen (Drescher, 1996, S. 30). *Drescher* argumentiert, dass ein optimales Verständnis für das Handeln und Verhalten der Fachkräfte erreicht wird, wenn der Forscher seine berufsbiografischen Wurzeln im Umfeld und/oder im Sozialsystem hat.

Innerhalb der Arbeitsprozessanalyse muss der Forscher verschiedene Rollen einnehmen, um das Arbeitsprozesswissen offenzulegen. Er agiert als Mittler und Kommunikator, der die Brücke zwischen verschiedenen Stakeholdern, darunter den Arbeitnehmern und dem Management, bildet. Beispielsweise werden die Ergebnisse der Arbeitsprozessanalyse, je nach den spezifischen Bedürfnissen und Anforderungen des Kontextes, durch die Erstellung von Berichten, der Durchführung von Präsentationen oder der Entwicklung von Schulungsprogrammen kommuniziert. Durch diese vermittelnde Rolle trägt der Forscher dazu bei, ein umfassendes Verständnis des Arbeitsprozesswissens zu schaffen und sicherzustellen, dass dieses Wissen effektiv genutzt wird.

In seiner Rolle als Katalysator des Prozesses leitet der Forscher die Bemühungen zur Externalisierung des impliziten Arbeitsprozesswissens (Nonaka & Takeuchi, 1997, S. 81), das tief in den Arbeitsabläufen verankert ist. Durch sein Methodenrepertoire, zu dem beispielsweise gezielte Beobachtungen, sorgfältige Fragen und interaktiv geführte Dialoge zählen, initiiert der Forscher den Prozess der Wissensentdeckung und -dokumentation.

Schließlich hat der Forscher die wichtige Rolle als Wächter der ethischen Standards des Prozesses. Es liegt in seiner Verantwortung sicherzustellen, dass der Prozess respektvoll und ethisch korrekt durchgeführt wird, die Privatsphäre und Vertraulichkeit der Beteiligten gewahrt bleiben und die gewonnenen Erkenntnisse auf nachhaltige und sozial verantwortungsvolle Weise genutzt werden (vgl. Dreher, 2015).

4.3.2 Berufswissenschaftliche Arbeitsbeobachtung

Bei der Arbeitsbeobachtung handelt es sich um eine qualitative Methode, die darauf abzielt, Arbeitsprozesse zu dokumentieren und zu interpretieren, indem sie direkt beobachtet werden. Dabei dokumentiert der Forscher vorrangig die

beobachteten Verhaltensweisen, Interaktionen, Tätigkeitsmerkmale, Beziehungsstrukturen, Prozessabläufe und Merkmale für Handlungskompetenz (vgl. Becker, 2018). Für die Arbeitsprozessanalysen der vorliegenden Arbeit handelt es sich konkret um sogenannte teilnehmende und offene Beobachtungen. Diese lassen sich wie folgt charakterisieren:

Teilnehmende Beobachtung

Bei dieser Form der Arbeitsbeobachtung ist der Forscher ein aktiver Teilnehmer an der Arbeitsumgebung. Er interagiert mit den Facharbeitern, führt optional eigene Arbeitsaufgaben aus und erlebt die Arbeitsumgebung aus erster Hand. Diese Methode ermöglicht ein tieferes Verständnis des Kontextes, in dem die Arbeit ausgeführt wird, sowie der sozialen Dynamik, welche die Arbeitsleistung beeinflussen kann. Im Gegensatz zur nicht-teilnehmenden Beobachtung kann der Forscher durch die aktive Teilnahme Nuancen und Feinheiten feststellen, die ihm andernfalls bei der Datenerhebung entgehen könnten.

Offene Beobachtung

Bei der offenen Beobachtung wissen die beobachteten Personen, dass sie beobachtet werden. Dies kann die Genauigkeit der Beobachtungen verbessern, da die beobachteten Personen sich bewusst sind, dass ihr Verhalten analysiert wird und daher eher dazu neigen, ihre Arbeitsaufgaben so korrekt wie möglich auszuführen. Ein möglicher Nachteil im Vergleich zur verdeckten Beobachtung ist jedoch der sogenannte „Hawthorne-Effekt“, bei dem Menschen ihr Verhalten unvorhersehbar ändern, weil sie wissen, dass sie beobachtet werden.

Die erhobenen Daten werden analysiert, um Muster, Trends und mögliche Problembereiche zu identifizieren. Um ein umfassenderes Verständnis der Arbeitsprozesse zu gewinnen, empfiehlt es sich, dass der Forscher zusätzlich Interviews mit den Mitarbeitern durchführt.

4.3.3 Handlungsorientiertes Fachinterview

Das handlungsorientierte Fachinterview ist eine Methode zur Reflexion von erfasstem Arbeitsprozesswissen, bei der der Forscher das Gespräch auf die spezifischen Aktionen und Entscheidungen des Interviewten während der

Ausführung seiner Aufgaben konzentriert. Dabei steht das konkrete Handeln und die damit verbundenen Entscheidungen, Überlegungen und Kenntnisse im Mittelpunkt. In der vorliegenden Arbeit finden die Fachinterviews als mündliche Befragungsform statt, wobei zu jeder Zeit ein Situations- und Sachzusammenhang bei der Durchführung besteht (Becker, 2018b, S. 732). Diese Kontextgebundenheit wird gewährleistet, wenn die folgenden Kriterien erfüllt sind (vgl. ebd.):

- Das Interview findet direkt am Arbeitsplatz und während der Durchführung des Arbeitsprozesses statt.
- Die Art der Gesprächsführung orientiert sich an den Kommunikationsstrukturen der „betrieblichen Praxisgemeinschaft“¹⁵.
- Die Beziehung zwischen Forscher und Befragtem ist von Gleichberechtigung und gegenseitigem Respekt geprägt.
- Die besprochenen Inhalte werden von beiden Seiten hinsichtlich ihrer Bedeutungsstruktur analysiert und diskutiert.

Die Fragen des Forschers sind darauf ausgerichtet herauszufinden, wie der Interviewte eine bestimmte Aufgabe angeht, welche Schritte er unternimmt, welche Entscheidungen er trifft und warum er dies tut. Der Fokus liegt folglich auf dem „Wie“, nicht nur auf dem „Was“. Ein weiteres Merkmal von handlungsorientierten Fachinterviews ist ihre Interaktivität. Der Forscher hat die Möglichkeit, auf die Antworten des Befragten einzugehen, Nachfragen zu stellen oder Erklärungen zu verlangen. Zudem kann der Forscher den Befragten durch entsprechende Fragen und Reaktionen dazu ermutigen, seine Arbeit zu reflektieren und ihn somit zum „lauten Denken“ anzuregen (Fischer & Spöttl, 2008, S. 175f.).

Durch die Wahl des handlungsorientierten Fachinterviews für die vorliegende Arbeit wird das Ziel, Arbeitsprozesswissen offenzulegen, effektiv unterstützt, da es eine funktionale Ergänzung zur berufswissenschaftlichen Arbeitsbeobachtung darstellt.

¹⁵ Nach *Rauner* (2005, S. 32) profitiert der Forscher als Mitglied der betrieblichen Praxisgemeinschaft von verschiedenen Vorteilen. Beispielsweise kann die Akzeptanz des Forschers innerhalb der Gemeinschaft dazu beitragen, dass die zu untersuchenden Personen sprachlich, emotional und fachlich offener sind.

4.3.4 Experten-Facharbeiter-Workshop und Masterlösung

Ein Experten-Facharbeiter-Workshop (EFW) ist eine Methode zur Erhebung von Arbeitsprozesswissen, bei der Experten und Facharbeiter zusammenkommen, um ihre Kenntnisse und Erfahrungen zu reflektieren, zu korrigieren und zu ergänzen. In der vorliegenden Arbeit fungiert der Forscher sowohl als Initiator des EFW als auch als Mitglied der betrieblichen Praxisgemeinschaft. Als Erhebungsverfahren stehen neben der Gruppendiskussion (Kleiner, 2004, S. 84ff.) auch die Arbeitsprozessanalyse auf Shop-Floor-Ebene im Zentrum (Spöttl, 2018, S. 742).

Die Durchführung eines EFW sollte im Vorfeld geplant und vorbereitet werden. Dies schließt die Auswahl der Teilnehmer, die Festlegung der Agenda und die Bereitstellung von relevanten Materialien mit ein. Der Erfolg des EFW hängt stark von der Auswahl der Teilnehmer ab. Idealerweise sollten Experten und Facharbeiter aus verschiedenen Bereichen und mit unterschiedlichen Erfahrungsniveaus ausgewählt werden, um eine breite Perspektive zu gewährleisten. Zudem sollten sich die Experten selbst noch im Arbeitsprozess befinden, um präzise Informationen über ihre Aufgaben und deren Einordnung geben zu können (Fischer & Spöttl, 2008, S. 177).

Für die vorliegende Arbeit ist ein Ziel des EFW die Erstellung einer sogenannten „Masterlösung“. Diese bezieht sich auf die Entwicklung einer optimalen Vorgehensweise für einen bestimmten Arbeitsprozess. Bei der Erstellung der Masterlösung sollten alle relevanten Aspekte der Arbeitsaufgabe berücksichtigt werden, darunter spezifische Anforderungen, verfügbare Ressourcen, die Umsetzung in ein AR-Autorensystem sowie potenzielle Risiken und Chancen. Die Dokumentation kann in Schriftform, als Audioaufzeichnung oder als Videoaufnahmen erfolgen.

Die Erstellung einer Masterlösung kann dazu beitragen, die Effizienz und Qualität von Arbeitsprozessen zu verbessern, Best Practices zu fördern und das Training von Mitarbeitern zu erleichtern. Jedoch sollte eine Masterlösung nicht als statisch angesehen werden. Sie sollte regelmäßig überprüft und bei Bedarf aktualisiert werden.

4.3.5 Didaktische Nutzung von Fehlern

Die didaktische Nutzung von Fehlern bezieht sich auf den bewussten Einsatz von Fehlern als Lehr- und Lerninstrument. Fehler bieten in vielen Fällen Lerngelegenheiten, da sie oft zeigen, wo Verständnislücken oder Missverständnisse bestehen. Nach konstruktiver Rückmeldung können sie dazu beitragen, die kritische Denkfähigkeit zu fördern, Problemlösungsfähigkeiten zu verbessern und ein tieferes Verständnis des Lerninhalts zu ermöglichen (Niegemann et al., 2008, S. 331ff.). In der vorliegenden Arbeit erfolgt die Aufbereitung von Arbeitsprozesswissen durch reale Fehlersituationen, wobei vorrangig Fehlerquellen betrachtet werden, die durch eine menschliche Handlung im Arbeitsprozess hervorgerufen werden. Diese Fehler werden vom Forscher und Experten identifiziert, analysiert und dokumentiert.

Insbesondere bei der Arbeit mit Auszubildenden ist eine positive Fehlerkultur wichtig, um sicherzustellen, dass die Lernenden sich wohl fühlen, Fehler zu machen und darüber zu sprechen. Durch ein geeignetes Feedback und die Gelegenheit zum Reflexionsakt können Fehler als wesentlicher Teil des Lernprozesses integriert werden. Der Forscher zieht seinen Nutzen aus der multimedialen Aufbereitung des Lernmaterials, die in einem optimierten AR-Autorensystems resultiert.

4.3.6 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojektes werden für die Arbeitsprozessanalyse die in Kapitel 4.3 beschriebenen Erhebungsmethoden verwendet. Dabei konzentriert sich die Analyse immer auch darauf, die folgenden vier Leitfragen zu beantworten (Lehberger, 2013, S. 225):

1. Die Frage nach den Teilschritten des Arbeitsprozesses – WAS ist zu tun?
2. Die Frage nach der Vorgehensweise und dem Sachwissen – WIE ist es zu tun?
3. Die Frage nach den Erklärungen – WARUM ist es zu tun?

4. Die Frage nach der Reflexion und den Entscheidungskriterien – WARUM ist es SO UND NICHT ANDERS zu tun?

Tabelle 4.4 bietet eine übersichtliche Zusammenfassung aller Methoden der Arbeitsprozessanalyse, die zur Offenlegung von Arbeitsprozesswissen in der vorliegenden Arbeit eingesetzt werden. Aus der beschriebenen Rolle des Forschers heraus wurden hier insbesondere Methoden zum Einsatz gebracht, die es dem Forscher ermöglichen, sich in die betriebliche Praxisgemeinschaft zu integrieren.

Tabelle 4.4: Konzeptbausteine zur Erhebung von Arbeitsprozesswissen

Konzeptbaustein zur Erhebung von Arbeitsprozesswissen	Begründungszusammenhang
Berufswissenschaftliche Arbeitsbeobachtung (teilnehmend, offen)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reflexives Nachvollziehen des individuellen Problemlöseprozesses
Handlungsorientiertes Fachinterview	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Herstellen von Begründungszusammenhängen des Problemlöseprozesses ▪ Anwendung in Kombination mit der berufswissenschaftlichen Arbeitsbeobachtung
Lautes Denken	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verstehen von Denkprozessen und Herstellung erster Gemeinschaftlichkeit
Experten-Facharbeiter-Workshop	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entwicklung eines funktionsfähigen Lösungsweges innerhalb einer fachkundigen Praxisgemeinschaft
Masterlösung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gemeinsame Entwicklung eines funktionsfähigen Lösungsweges
Didaktische Nutzung von Fehlern	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reflexionsakt beim Auftreten von Fehlern zur Optimierung der Masterlösung

Nachdem die Methoden zur Erfassung von Arbeitsprozesswissen detailliert betrachtet wurden, werden im folgenden Kapitel die Methoden zur Evaluation vorgestellt. Mit diesen Evaluationsmethoden kann die Wirksamkeit der erfassten Informationen überprüft und Erkenntnisse über die Effektivität der Arbeitsprozesse gewonnen werden.

4.4 Methoden zur Evaluation

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der Offenlegung und dem Transfer von Arbeitsprozesswissen. Dieses Wissen soll mit Hilfe der entstandenen Masterlösung nach der Montage von Baugruppen softwareseitig erfasst und konkretisiert werden. Neben dem Erkenntnisgewinn in Bezug auf den Arbeitsprozess werden in der Forschungsarbeit auch andere Aspekte bewertet, darunter verschiedene Kriterien zur Nutzung des AR-Systems und dessen Wirkung auf die Entwicklung einer holistischen Gestaltungskompetenz¹⁶ bei den Anwendern. Zur Evaluation der AR-Systemnutzung werden Leitfadeninterviews und klassische Evaluationsbögen verwendet, während die COMET-Methode zur Messung der Kompetenz eingesetzt wird. Im folgenden Abschnitt werden diese Evaluationsmethoden vorgestellt.

4.4.1 Leitfadeninterviews

Leitfadeninterviews sind eine qualitative Forschungsmethode, die gemäß *Bortz* und *Döring* die gängigste Form der Befragung darstellen und auch in der berufswissenschaftlichen Forschung zur Anwendung kommen (Becker & Spöttl, 2008, S. 93f.). Sie bieten einen strukturierten Rahmen für Gespräche und ermöglichen es dem Forscher, tiefgreifende Einblicke in die Erfahrungen, Meinungen und Motivationen der Befragten zu gewinnen. Dabei dient ein vordefinierter Leitfaden oder eine Liste von Fragen als Ausgangspunkt für das Interview. Diese Fragen werden in der Regel offen formuliert, um dem Forscher die Möglichkeit zu geben, spontan weitere Fragen einzubringen, die bei der Konzeption des Leitfadens nicht bedacht wurden (Bortz & Döring, 2007, S. 314). Im Gegensatz zum Facharbeiterinterview (vgl. Kap 4.3.3), welches bereits während der Versuchsdurchführung zur Anwendung kommt, findet das Leitfadeninterview für das Forschungsprojekt aufgrund seines reflexiven Charakters erst am Ende der Versuchsdurchführung statt.

¹⁶ Als curriculares Richtziel in der beruflichen Bildung steht die Gestaltungskompetenz (vgl. Kapitel 2.4) für die Fähigkeit zur nachhaltigen und kreativen Gestaltung von Arbeitsumgebungen unter Berücksichtigung sozialer, ökonomischer und ökologischer Aspekte (Rauner, 2013, S. 14ff.; vgl. Spöttl & Dreher, 2009).

4.4.2 Fragebogenerhebung zur Evaluation

Nach der Versuchsdurchführung kommen neben Leitfadeninterviews auch Evaluationsbögen zum Einsatz. Entgegen dem üblicherweise quantitativen Forschungscharakter weist die Fragebogenauswertung der vorliegenden Studie einen eher qualitativen Charakter auf. Dies ist mit der geringen Teilnehmerzahl aufgrund der Arbeit mit unternehmensspezifischen Baugruppen zu begründen.

Grundsätzlich ermöglichen Evaluationsbögen die systematische Erfassung von Daten und Meinungen einer ausgewählten Gruppe von Personen. In der vorliegenden Studie wird eine Likert-Skala zur Beantwortung der Fragen verwendet. Diese bestehen aus insgesamt 20 Items und beschränken sich ausschließlich auf die Arbeit und den Umgang mit dem AR-System (vgl. Anhang A1). Der Einsatz von Evaluationsbögen erfolgt vor allem aufgrund der Tatsache, dass diese allen Teilnehmern gleichermaßen zugänglich sind, was, verglichen mit Leitfadeninterviews, eine verbesserte Vergleichbarkeit und eine schnellere Möglichkeit der Datenerhebung ermöglicht. Dies ermöglicht es dem Forscher, Muster und Trends in den Daten zu erkennen und begrenzt quantifizierbare Ergebnisse zu erzielen. Darüber hinaus unterstützen die Evaluationsbögen die Kompetenzerfassungsmethodik, die im folgenden Unterkapitel näher erläutert wird.

4.4.3 Kompetenzmessung mit COMET

Das Kompetenzmessmodell „COMET“¹⁷ zielt darauf ab, berufliche Handlungskompetenz anhand ganzheitlicher Testaufgaben zu messen. Die Handlungskompetenz wird hier in drei unterschiedlichen Dimensionen betrachtet:

- Inhaltsdimension
- Handlungsdimension
- Anforderungsdimension

Die Grundlage der Inhaltsdimension ist das Novizen-Experten-Paradigma (vgl. Dreyfus & Dreyfus, 1992), welches besagt, dass man als Anfänger in einem Beruf

¹⁷ Das Modell wurde ursprünglich im deutschsprachigen Raum als „KOMET“ betitelt. Im Jahr 2012 wurde es infolge der Internationalisierung in „COMET“ umbenannt (Rauner & Zhao, 2018).

startet und sich schrittweise zum Experten entwickeln kann. Die berufliche Bildung hat die Aufgabe, diesen Prozess des Kompetenzerwerbs zu unterstützen und zu fördern. Daher müssen unterschiedliche Lern- und Testaufgaben für Anfänger, fortgeschrittene Anfänger, erfahrene Praktiker¹⁸ und Könnern definiert werden (vgl. Dreyfus & Dreyfus, 1987), um den individuellen Entwicklungsstand angemessen zu berücksichtigen (Lehberger & Rauner, 2017, S. 16).

Das Konzept der vollständigen (holistischen) Arbeitshandlung dient als Grundlage für die Handlungsdimension. Dieses Konzept teilt die Handlung in verschiedene Stufen ein: Informieren, Planen, Entscheiden, Durchführen, Kontrollieren und Reflektieren. Bei den Testaufgaben des COMET-Verfahrens steht eine offene Gestaltung im Vordergrund. Es ist jedoch zweckmäßig, „dass der zeitliche Handlungsrahmen für die Testpersonen überschaubar und in den Handlungsmöglichkeiten und -verzweigungen beschreibbar bleibt.“ (ebd.).

Die Anforderungsdimension umfasst die spezifischen Teilkompetenzen, die benötigt werden, um eine berufliche Aufgabe vollständig zu lösen. Insgesamt werden acht Kriterien unterschieden, die bei der Bewertung einer COMET-Testaufgabe zu berücksichtigen sind. Tabelle 4.5 erläutert diese Kriterien ausführlich für Berufe aus dem gewerblich-technischen Bereich.

Tabelle 4.5: Kurzbeschreibung der Kriterien beruflicher Kompetenz nach Rauner (COMET)

Kriterium	Kurzbeschreibung
(1) Anschaulichkeit/Präsentation	Das Ergebnis beruflicher Aufgaben wird im Planungs- und Vorbereitungsprozess vorweggenommen und so dokumentiert und präsentiert, dass der/die Auftraggeber (Vorgesetzte, Kunden) die Lösungsvorschläge kommunizieren und bewerten können. Insofern handelt es sich bei der Veranschaulichung und Präsentation einer Aufgabenlösung um eine Grundform beruflicher Arbeit und beruflichen Lernens. Eine zentrale Facette für die Kommunikation im Beruf ist die Fähigkeit sich durch Beschreibungen, Zeichnungen und Skizzen und klar und strukturiert mitteilen zu können. Dabei ist die Angemessenheit der Darstellung bezogen auf den jeweiligen Sachverhalt Ausdruck professionellen Handelns.

¹⁸ Lehberger & Rauner (2017) gliedern die Testaufgaben in vier Stufen für Anfänger, fortgeschrittene Anfänger, Fortgeschrittene und Könnern. In der vorliegenden Arbeit wird anstatt des Begriffs „Fortgeschrittener“ der Terminus „erfahrener Praktiker“ in Anlehnung an Dreyfus & Dreyfus (1992) verwendet.

(2) Funktionalität	Die Funktionalität einer vorgeschlagenen Lösung beruflicher Aufgaben ist ein auf der Hand liegendes Kernkriterium bei deren Bewertung. Die Funktionalität verweist auf die instrumentelle Fachkompetenz, bzw. das kontextfreie, fachsystematische Wissen und die fachkundlichen Fertigkeiten. Der Nachweis der Funktionalität einer Lösungsvariante ist grundlegend und maßgebend für alle weiteren Anforderungen, die an Aufgabenlösungen gestellt werden.
(3) Gebrauchswertorientierung	Zuletzt verweisen berufliche Handlungen, Handlungsabläufe, Arbeitsprozesse und Arbeitsaufträge immer auf einen Kunden, dessen Interesse der Gebrauchswert des Arbeitsergebnisses ist. In hoch arbeitsteiligen Produktions- und Dienstleistungsprozessen verflüchtigt sich nicht selten der Gebrauchswertaspekt bei der Ausführung von Teilaufgaben sowie in einer auf den Handlungsaspekt reduzierten Berufsbildung. Das Kriterium der Gebrauchswertorientierung verweist daher auch auf den Gebrauchswert einer Aufgabenlösung im Kontext von Arbeitszusammenhängen. Für einen hohen Gebrauchswert einer Lösungsvariante sind neben der unmittelbaren Nutzung durch den Anwender auch der Gesichtspunkt der Vermeidung der Störanfälligkeit und die Berücksichtigung von Aspekten der Wartungs- und Reparaturfreundlichkeit wichtig. In wieweit eine Lösung längerfristigen Bestand in der Verwendung hat und welche Erweiterungsoptionen sie künftig bietet, sind ebenfalls zentrale Bewertungsgrundlagen zum Gebrauchswert.
(4) Wirtschaftlichkeit	Berufliche Arbeit unterliegt prinzipiell dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit. Die kontextbezogene Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte bei der Lösung beruflicher Aufgaben zeichnet das kompetente Handeln von Fachleuten aus. Dabei gilt es im Arbeitshandeln, fortlaufend Beurteilungen der Wirtschaftlichkeit vorzunehmen und die unterschiedlichen Kosten und Wirkfaktoren einzubeziehen. Auch perspektivisch anfallende Kosten (Folgekosten) müssen in die Entscheidungen für die wirtschaftliche Gestaltung beruflicher Arbeit einbezogen werden. Zur Entscheidungsfindung wird zentral bilanziert, in welchem Verhältnis Aufwand und betrieblicher Nutzen zueinander stehen. Darüber hinaus kennzeichnet es wirtschaftlich verantwortungsvolles Handeln auch die gesellschaftliche Beurteilungsebene zu berücksichtigen, denn nicht alle Strategien, die auf betriebswirtschaftlicher Ebene schlüssig sind, erweisen sich volkswirtschaftlich als gleichsam akzeptabel.
(5) Geschäfts- und Arbeitsprozessorientierung	umfasst Lösungsaspekte, die auf die vor- und nachgelagerten Arbeitsbereiche in der betrieblichen Hierarchie (der hierarchische Aspekt des Geschäftsprozesses) sowie auf die vor- und nachgelagerten Arbeitsbereiche in der Prozesskette (der horizontale Aspekt des Geschäftsprozesses) Bezug nehmen. Vor allem unter den Bedingungen der Arbeit mit und an programmgesteuerten Arbeitssystemen in vernetzten betrieblichen und zwischenbetrieblich organisierten Arbeitsprozessen kommt diesem Aspekt eine besondere Bedeutung zu. Eine geschäftsprozessorientierte Lösungsvariante berücksichtigt die Verknüpfung an den Schnittstellen zu den vor- und nachgelagerten Prozessen und bezieht dabei auch das Zusammenwirken über die Grenzen der eigenen Berufsarbeit hinaus mit ein.
(6) Sozialverträglichkeit	betrifft vor allem den Aspekt humaner Arbeitsgestaltung und -organisation, den Gesundheitsschutz sowie ggf. auch die über die beruflichen Arbeitszusammenhänge hinausreichenden sozialen Aspekte beruflicher Arbeit (z. B. die oftmals unterschiedlichen Interessenlagen von Auftraggeber, Kunden und Gesellschaft). Berücksichtigt werden

	dabei auch Aspekte der Arbeitssicherheit und des Unfallschutzes sowie mögliche Folgewirkungen, die eine Lösung beruflicher Aufgabenstellungen auf die soziale Umwelt hat.
(7) Umweltverträglichkeit	ist mittlerweile für nahezu alle Arbeitsprozesse ein relevantes Kriterium. Dabei geht es nicht um den Aspekt allgemeinen Umweltbewusstseins, sondern um die berufs- und fachspezifischen Anforderungen an berufliche Arbeitsprozesse und deren Ergebnisse, die den Kriterien der Umweltverträglichkeit zugeordnet werden können. In wieweit bei Lösungen umweltverträgliche Materialien verwendet werden ist ebenso zu berücksichtigen, wie auch die umweltgerechte Arbeitsgestaltung bei der Bewältigung der Arbeitsaufgabe. Weiterhin sind energieschonende Strategien und Aspekte des Recyclings und der Wiederverwendung Gesichtspunkte, die zur Umweltverträglichkeit einer Lösung Berücksichtigung finden müssen.
(8) Kreativität	Die Kreativität einer Lösungsvariante ist ein Indikator, der bei der Lösung beruflicher Aufgaben eine große Rolle spielt. Dies resultiert aus den situativ höchst unterschiedlichen Gestaltungsspielräumen bei der Lösung beruflicher Aufgaben. Dabei muss das Kriterium „Kreative Lösung“ in besonderer Weise berufsspezifisch interpretiert und operationalisiert werden. Im gestalterischen Handwerk ist Kreativität ein zentraler Aspekt der fachlichen Kompetenz. In anderen Berufen kommt dem Kriterium „Kreative Lösung“ eine relative Eigenständigkeit als Konzept beruflichen Arbeiten und Lernens zu. In der Ausprägung der Kreativität einer Lösungsvariante zeigt sich auch Sensitivität für die Problemlage. Von kompetenten Fachleuten sind in der beruflichen Arbeit kreative ungewöhnliche Lösungsvarianten gefragt, die zugleich sinnvoll der Zielerreichung dienen.

Quelle: wörtlich entnommen aus Rauner et al., 2011, S. 56ff.

COMET Bewertungsraster

Anhand dieser Kriterien bietet die COMET-Methode standardisierte Bewertungsbögen, um die einzelnen Teilbereiche der Kompetenz zu bewerten. Für jede der acht Teilkompetenzen werden fünf Items zur Bewertung der Kompetenzanforderungen herangezogen. Insgesamt gibt es 40 Items, die auf einer Skala von 0 (keineswegs erfüllt) bis 3 (vollständig erfüllt) bewertet werden können (vgl. Anhang A2). Das Auswertungsergebnis kann in Form eines Spinnendiagramms dargestellt werden. Abbildung 4.6 veranschaulicht die Struktur des Diagramms und teilt den Ergebnisraum in drei aufeinander aufbauenden Wissenskategorien ein. Diese können wie folgt beschrieben werden (Lehberger & Rauner, 2017, S. 14f.):

- Know that: Die Fachkraft kennt die Regeln und Normen, die bei der Ausführung der Tätigkeit einzuhalten sind.
- Know how: Die Fachkraft ist in der Lage, ihr berufliches Handeln fachlich zu begründen und inhaltlich zu verstehen.

- Know why: Die Fachkraft ist in der Lage zu verstehen, warum eine Handlung „so und nicht anders“ ausgeführt wird. Dies beinhaltet auch die Fähigkeit, alternative Lösungsmöglichkeiten abzuwägen.

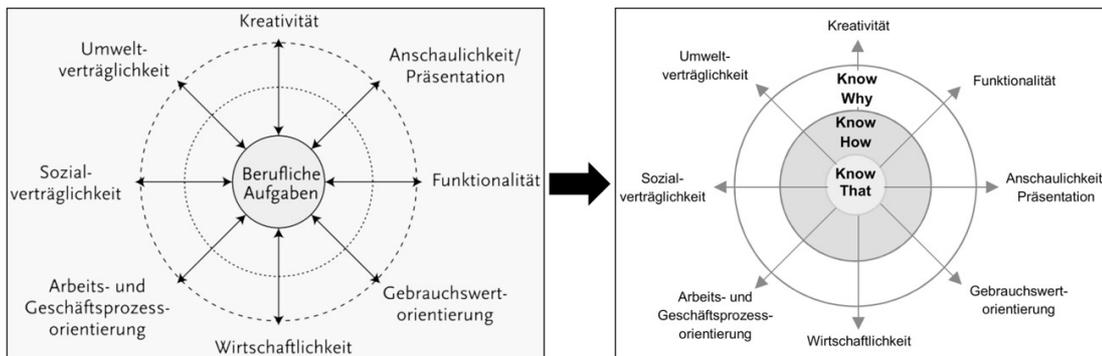


Abbildung 4.6: Kriterien der vollständigen Handlung beruflicher Aufgaben

Quellen: Lehberger & Rauner, 2017, S. 16; Rauner et al., 2011, S. 30

Für die Auswertung der Bewertungsbögen bedarf es qualifizierter Rater. Idealerweise sollten mindestens zwei Rater die Kompetenzmessung durchführen, um die Objektivität zu gewährleisten. Um sicherzustellen, dass verschiedene Rater die Aufgabenlösungen weitgehend gleich bewerten, beinhaltet das COMET-Modell das Konzept der Raterschulung. Diese Schulung muss im Vorfeld von den Ratern absolviert werden (Lehberger, 2018, S. 481). Bei der Erstellung der Testaufgaben wird der zu bewertende Lösungsraum für jede der acht Teilkompetenzen im Voraus festgelegt.

Gestaltung der Testaufgaben

Bei der Gestaltung der Testaufgaben werden die Unterschiede der vorliegenden Studie zum klassischen COMET-Modell deutlich. Tabelle 4.6 zeigt die Leitlinien zur Entwicklung der Testaufgaben nach COMET auf.

Tabelle 4.6: Leitlinien zur Entwicklung von Testaufgaben

Nr.	Die Testaufgaben...
1	erfassen ein authentisches Problem beruflicher und betrieblicher Arbeitspraxis,
2	stecken einen berufsspezifischen – eher großen – Gestaltungsspielraum ab und ermöglichen damit eine Vielzahl verschiedener Lösungsvarianten unterschiedlicher Tiefe und Breite,
3	sind gestaltungsoffen, d. h. es gibt nicht die eine „richtige“ oder die „falsche“ Lösung, sondern anforderungsbezogene Lösungsvarianten,
4	erfordern bei ihrer umfassenden Lösung außer fachlich-instrumentellen Kompetenzen die Berücksichtigung von Aspekten wie Wirtschaftlichkeit, Gebrauchswertorientierung und Umweltverträglichkeit (s. Das Konzept der holistischen Aufgabenlösung),
5	erfordern bei ihrer Lösung ein berufstypisches Vorgehen. Die Lösung der Aufgaben konzentriert sich auf den planerisch-konzeptuellen Aspekt und wird dokumentiert unter Verwendung einschlägiger Darstellungsformen,
6	können auch die praktische Lösung einschließen, wenn mit den Testaufgaben das konkrete berufliche Können überprüft werden soll,
7	fordern die Probanden dazu heraus, die Aufgaben im Sinne beruflicher Professionalität (auf dem jeweiligen Entwicklungsniveau) zu lösen, zu dokumentieren und zu begründen, ohne dass dabei reduzierte Lösungen ausgeschlossen werden

Quelle: Rauner, 2017, S. 95

In Leitlinie 5 wird deutlich, dass der klassische COMET-Test in der Regel schriftliche Arbeitsaufträge verwendet¹⁹. Für die vorliegende Studie wird ein praxisorientierter Ansatz gewählt. Entgegen der schriftlichen Aufgabenstellung wird diese mündlich kommuniziert, was einerseits den Messfehler hinsichtlich der Lesekompetenz eliminiert und andererseits die Möglichkeit bietet, Verständnisfragen vor Beginn der Bearbeitungszeit zu klären. Durch die praktische Aufgabenlösung kann auch die Performanzebene der Probanden betrachtet werden, wobei sich diese in den gewählten Aufgaben auf den Umgang mit Werkstattausrüstung und Werkzeug beschränkt. Aufgrund dieser Umstände handelt es sich bei der vorliegenden Studie um einen Pilotversuch, da die Messung in einer realen Arbeitsumgebung durchgeführt wird. Die wichtigsten Voraussetzungen zur Legitimation dieser Methode sind jedoch gegeben: es werden Kompetenzen gemessen und es

¹⁹ Rauner et al. (2011, S. 72) sprechen hier von „Paper-and-pencil-Design“

handelt sich um eine authentische Arbeitssituation, die in einem realen Setting stattfindet.

Es sei abschließend erwähnt, dass der COMET-Test nicht dafür entwickelt wurde, implizites Wissen zu messen oder zu entschlüsseln (Rauner et al., 2011, S. 32). In der vorliegenden Arbeit wird der COMET-Test daher nur in der letzten Phase genutzt, um die Eignung der Probandengruppe für die Arbeit mit einem AR-System, insbesondere im Ausbildungsbereich, zu bestimmen (vgl. Kapitel 5.4.8). In diesem Kontext ist die Messung besonders sinnvoll, da die Teilnehmer, im Gegensatz zu den ersten beiden Phasen, das Autorensystem nach Abschluss der Studie auch in ihrem beruflichen Alltag einsetzen sollen. Daher ist ein Verständnis des Kompetenzniveaus dieser Teilnehmer auch von praktischer Relevanz.

5 Einsatz des Design-Based Research Verfahrens

5.1 Forschungsdesign

Nachfolgend soll begründet werden, warum sich die vorliegende Arbeit dem Design-Based Research (DBR) Ansatz zugewandt hat. Dieser hat sich als vielversprechend erwiesen, um Bildungspraktiken zu verbessern und gleichzeitig neue Erkenntnisse zu gewinnen (vgl. Reinmann, 2021; The Design-Based Research Collective, 2003). Im Folgenden sollen zunächst die grundlegenden Merkmale und Prinzipien von DBR dargestellt werden, um im Anschluss das DBR-basierte Forschungsdesign der vorliegenden Arbeit zu skizzieren.

5.1.1 Grundlegende Merkmale und Prinzipien von DBR

DBR ist ein Forschungsansatz, der darauf abzielt, sowohl die Gestaltung von innovativen Bildungspraktiken als auch die Erzeugung von theoretischem Wissen zu fördern (Reinmann, 2005, S. 62). Dabei dient DBR als methodischer Rahmen, um Erkenntnisse „über die Entwicklung oder Gestaltung von Interventionen zu gewinnen, die in realen Kontexten zyklisch [...] mehrfach implementiert, evaluiert und einem Re-Design unterzogen werden.“ (Reinmann, 2019, S. 127). Interventionen (syn.: Design, Maßnahme, Problemlösung) sind im DBR-Kontext bewusst gestaltete Maßnahmen, die wiederholt in Praxissituationen umgesetzt und optimiert werden, um Probleme zu lösen und wissenschaftliche Erkenntnisse zu gewinnen (Euler & Sloane, 2018, S. 782).

Im Wesentlichen zeichnet sich der DBR-Ansatz durch drei Hauptmerkmale aus, die auch in dieser Arbeit zur Geltung kommen:

- Theorie-Praxis-Verzahnung
- Iterative Entwicklung und Verbesserung
- Beitrag zur Theoriebildung

Theorie-Praxis-Verzahnung

DBR strebt eine enge Verknüpfung von theoretischem Wissen und praktischer Anwendung an. Dabei wird ein besonderer Fokus auf die Kooperation zwischen Forschenden und denjenigen gelegt, die die Interventionen und Innovationen in der Praxis umsetzen (Euler & Sloane, 2018, S. 786). Diese enge Zusammenarbeit ermöglicht es, die Bedürfnisse, Herausforderungen und Kontexte der Praktizierenden zu verstehen und darauf aufbauend Lösungen zu entwickeln. Die Praktizierenden werden aktiv in den Lösungsprozess einbezogen und bringen ihre Expertise mit ein.

Iterative Entwicklung und Verbesserung

DBR ist ein zyklischer Prozess, der aus wiederholten Phasen von Entwicklung, Erprobung, Analyse und Überarbeitung besteht. Nach jeder Implementierung wird das Design auf der Basis der gewonnenen Erkenntnisse verbessert und angepasst (Reinmann, 2007, S. 206). Der Fokus liegt auf einer kontinuierlichen Verbesserung der Interventionen, um die Wirksamkeit und Effektivität zu steigern.

Beitrag zur Theoriebildung

DBR zielt nicht nur darauf ab, praktische Lösungen zu entwickeln, sondern auch dazu beizutragen, theoretisches Wissen in der Bildungsforschung zu erweitern (vgl. The Design-Based Research Collective, 2003). Durch das iterative Design und die wiederholte Anwendung im realen Kontext tragen DBR-Projekte zur Entwicklung von Theorien über das Lernen und die Gestaltung effektiver Lernumgebungen bei (vgl. Reinmann & Sesink, 2011).

Im Gegensatz zur herkömmlichen empirischen Forschung findet bei DBR die Entwicklung neuer Perspektiven für die Praxis bereits während des Forschungsprozesses statt, da neben der Untersuchung bereits bestehender Wirklichkeiten immer auch die Exploration von neuen Möglichkeiten angestrebt wird (Euler & Sloane, 2018, S. 782; Reinmann & Sesink, 2011, S. 16).

*„Design experiments differ from most educational research, because they do not study what exists; they study what could be.“
(Schwartz et al., 2005, S. 2)*

Unter Berücksichtigung der genannten Merkmale bietet DBR einen geeigneten Rahmen, um die Ziele der vorliegenden Forschung im Zusammenhang mit der Nutzung eines AR-Autorensystems zur Vermittlung von implizitem Arbeitsprozesswissen in der beruflichen Bildung zu erreichen. Im nachfolgenden Unterkapitel wird dieser Rahmen ausführlich dargestellt.

5.1.2 DBR-Konzept für diese Forschungsarbeit

Für die vorliegende Arbeit ist DBR ein geeigneter Ansatz, um systematisch und praxisnah die Herausforderungen des Einsatzes eines AR-Autorensystems zur Offenlegung und Vermittlung von implizitem Arbeitsprozesswissen zu erforschen. Durch die iterative Natur von DBR kann die Effektivität des Autorensystems über mehrere Zyklen hinweg geprüft und verbessert werden.

Die theoretischen und methodischen Bezüge, die in den Kapiteln 2 und 4 beschrieben wurden, bilden das Fundament für die Forschung. Die praktische Umsetzung erfolgt in drei übergeordneten DBR-Zyklen, wobei sich jeder Zyklus durch ein unterschiedliches Montageszenario auszeichnet.

Die Anordnung der drei Montageszenarien ergab sich aufgrund der zunehmenden Komplexität²⁰ sowie der Bedeutung und Menge des impliziten Wissens, das in jedem spezifischen Montageszenario erforderlich ist. Dieser Zusammenhang wird in Tabelle 5.1 veranschaulicht.

Tabelle 5.1: Einordnung der Montageszenarien

Zyklus	Repräsentativität	Schwierigkeit	Implizites Wissen
1	Baugruppe für den AR-Einsatz geeignet, realer Nutzen der Baugruppe ist jedoch eingeschränkt	Einfache Schraub- und Steckverbindungen, geringe Komplexität	Von geringer Bedeutung bei dieser Baugruppe

²⁰ Der Komplexitätsbegriff ist vielschichtig; im Rahmen dieser Studie bezieht er sich hinsichtlich der untersuchten Baugruppen auf die statische oder strukturelle Komplexität. „Generell gilt: Je komplexer ein System, desto mehr Aufwand (z. B. hinsichtlich Entdeckung, Aufmerksamkeit, Anstrengung) muss seitens eines Werkers unter der Annahme gleicher Kompetenz und Motivation betrieben werden, um das System sicher zu beherrschen und keine Fehler zu machen.“ (Bornewasser, 2020, S. 49f.)

2	Baugruppe für den AR-Einsatz geeignet, realer Nutzen der Baugruppe ist jedoch eingeschränkt	Montage etwas komplexer, Schwierigkeiten können auftreten	An einigen Stellen für fehlerfreie Montage von Bedeutung
3	Baugruppe für den AR-Einsatz geeignet, realer Einsatz in Ausbildungs- und Fachwerkstätten	Komplexe Baugruppe, viele Montageschritte	Wird an vielen Stellen benötigt, von hoher Bedeutung

Diese drei Zyklen bilden den Gesamtzyklus der Forschung, da jeder Folgezyklus auf den Ergebnissen des vorherigen aufbaut. Innerhalb jeder dieser Zyklen gibt es zwei Phasen, die aus den Schritten „Entwicklung“, „Erprobung“ und „Analyse“ für das jeweilige Montageszenario bestehen.

Ziel des ersten Zyklus ist es, die Erstellungsprinzipien einer AR-gestützten Montage mit der Baugruppe „*Sickenvorrichtung*“ mittels geeigneter Software- und Hardware-Tools herauszuarbeiten und den Einsatz an verschiedenen Probandengruppen zu erproben, um sich auf ein für diese Forschung passendes AR-Autorensystem festzulegen.

Die in Zyklus 1 gewonnenen Erkenntnisse und das ausgewählte Autorensystem werden dann in Zyklus 2 für die Montage eines „*Radialwellendichtrings*“ in einer universitären Werkstatt mit verschiedenen Probanden genutzt. Innerhalb dieses Zyklus gibt es eine Unterteilung in zwei Phasen (oder Iterationsschleifen) mit dem Ziel, sowohl die Funktionsfähigkeit des Systems als auch die Übertragbarkeit des Arbeitsprozesswissens zu überprüfen.

In Zyklus 3, der auf den Erkenntnissen aus Zyklus 2 aufbaut, wird ein komplexeres Montageszenario (Baugruppe „*Doppelmembranzyylinder*“) in einem Unternehmen durchgeführt, wobei hier Akteure beteiligt sind, die das System (inklusive der während der Forschung gewonnenen Erkenntnisse) später auch in der realen Praxisumgebung nutzen werden. Auch hier gibt es eine Unterteilung in zwei Phasen mit dem Ziel, zu überprüfen, ob das Arbeitsprozesswissen der Benutzer übertragen werden kann. Am Ende dieses dritten Zyklus wird eine Kompetenzmessung mit der COMET-Methode durchgeführt, um die Kompetenz der Teilnehmer bei der Überführung ihres Arbeitsprozesswissens und der Lösung komplexer Montageaufgaben mit Hilfe des AR-Autorensystems zu bewerten. Abschließend werden alle gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst. Abbildung 5.1 veranschaulicht das DBR-basierte Forschungsdesign dieser Arbeit.

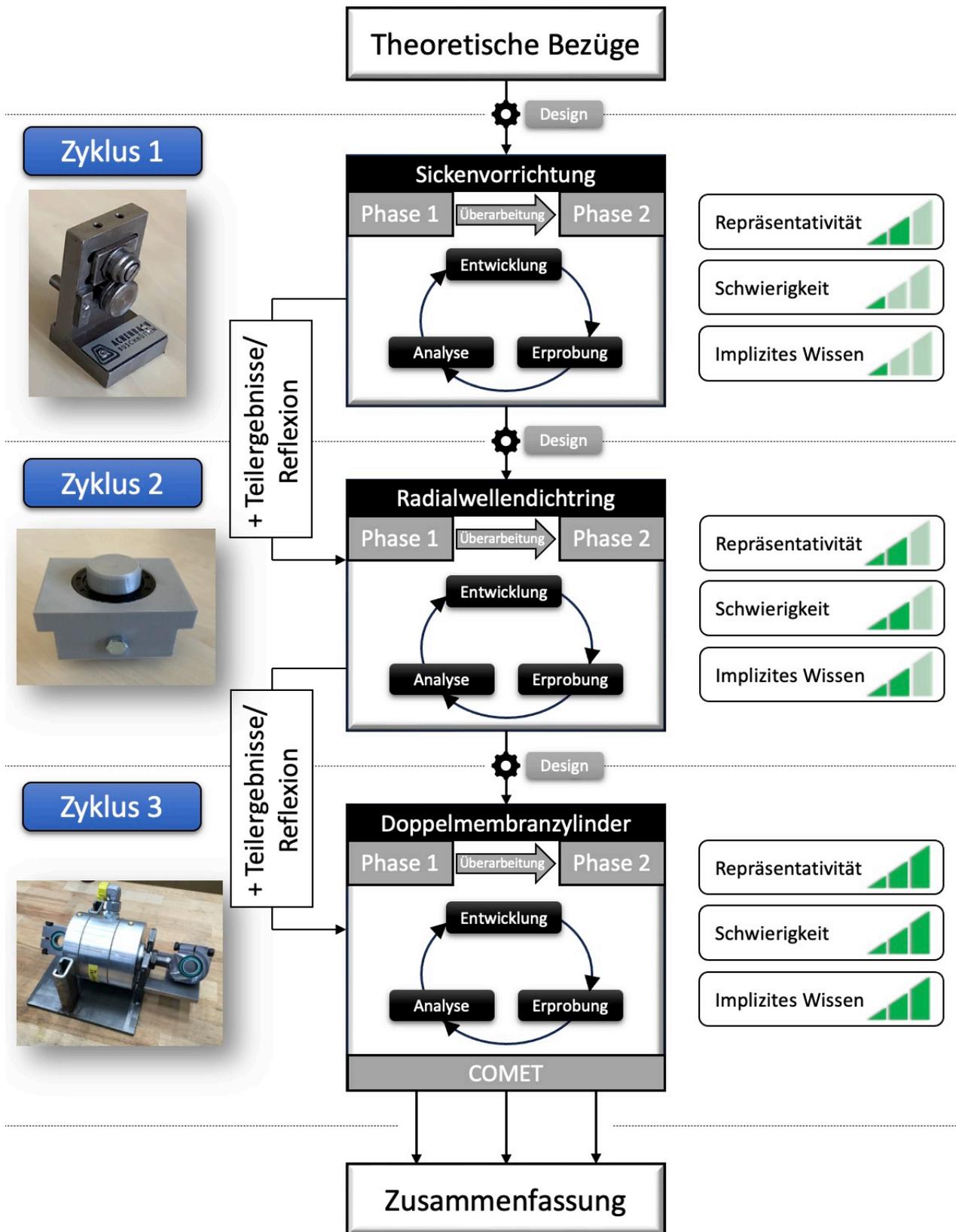


Abbildung 5.1: Forschungsdesign der vorliegenden Studie

Quelle: eigene Darstellung

5.2 DBR-Zyklus 1: Sickenvorrichtung (SVR)

Im Rahmen des ersten DBR-Zyklus wurde die Baugruppe „Sickenvorrichtung“ (SVR) für weitere Untersuchungen gewählt. Der Fokus liegt auf der sorgfältigen Auswahl passender Soft- und Hardware, die für den Erfolg der weiteren Forschungszyklen von ausschlaggebender Bedeutung sind. Die Verwendung von AR in der Montage stellt einen weiteren Schwerpunkt dar, insbesondere im Hinblick auf die Reaktion und Akzeptanz der Probanden. Das Ziel besteht darin, ein Verständnis dafür zu gewinnen, wie sich die Technologie auf den Montageprozess auswirkt und welche Unterschiede bei der Verwendung unterschiedlicher AR-Systeme (vgl. Kapitel 2.3.1) erkennbar sind. Um diesen ersten DBR-Zyklus ausführlich zu beleuchten, ist Kapitel 5.2 in verschiedene Abschnitte unterteilt. Dabei werden zunächst das grundlegende Forschungssetting und die Rahmenbedingungen definiert, die weitgehend auch für die folgenden DBR-Zyklen gelten. Anschließend werden innerhalb von zwei Phasen jeweils die notwendigen Entwicklungsschritte dargestellt, Erprobungen durchgeführt und analysiert. Darauf aufbauend findet die Auswahl der geeigneten Software- und Hardwarelösungen statt. In der abschließenden Reflexion werden die gewonnenen Teilergebnisse zusammengefasst und interpretiert, um mit diesen Erkenntnissen den nächsten DBR-Zyklus zu gestalten.

5.2.1 Forschungssetting und Rahmenbedingungen

Das Forschungsvorhaben ist auf zwei primäre Standorte ausgerichtet. Zum einen dient der Lehrstuhl für Technikdidaktik am Berufskolleg (TVD) in Siegen als Forschungsstandort, der eine voll ausgestattete Werkstatt für Montageversuche und ein CAD-Labor bereitstellt. Dieses Labor bietet leistungsfähige Laptops für Softwarearbeiten, was einen idealen Rahmen für die Durchführung und Anpassung der AR-Montageaufgaben schafft. Abbildung 5.2 vermittelt einen Überblick über die Möglichkeiten, die dieser Standort bietet.



Abbildung 5.2: Werkstatt und CAD-Labor des TVD

Fotos: Alexander Reineking (beschriftet)

Parallel dazu bietet der Campus Buschhütten in Kreuztal einen weiteren wichtigen Standort für das Forschungsvorhaben. Der Campus fungiert als „Zukunftswerkstatt“ für die Region und bietet verschiedensten Unternehmen, Bildungseinrichtungen und Start-ups einen Raum, um innovative Anwendungsszenarien, etwa im Kontext von Industrie 4.0, zu erproben. Dort finden regelmäßig Großveranstaltungen statt, die ein technikaffines Publikum anziehen, darunter Schülergruppen, Lehrkräfte und technisch interessierte Besucher. Neben diesen Personengruppen bieten die Auszubildenden und die Ausbilder des Kooperationspartners Achenbach Buschhütten, welche in der ebenfalls ansässigen Lehrwerkstatt tätig sind, weitere Probandengruppen für die AR-Versuche auf diesem Campus. Abbildung 5.3 vermittelt einen Einblick in die Dimension dieser Arbeits- und Forschungseinrichtung.



Abbildung 5.3: Campus Buschhütten

Foto: Alexander Reineking

Durch diese Standorte erreicht die Forschung ein breites Spektrum von Probanden, darunter Studierende, Schüler, Lehrer, Auszubildende aus verschiedenen Disziplinen, Ausbilder und technisch Interessierte aller Altersklassen. Für jede dieser Teilnehmergruppen ist eine Betrachtung der Montageszenarien mit unterschiedlichen AR-Hardwarelösungen möglich.

AR-Hardware

Für die Umsetzung der Forschung steht eine Reihe von Hardwarelösungen zur Verfügung, darunter gängige Smartphones (iOS und Android), ein Tablet mit LiDAR-Scanner und eine AR-Brille (Microsoft HoloLens 2). Obwohl andere Brillen wie die Microsoft HoloLens 1 und die Realwear HMT-1 getestet wurden, stellte sich die HoloLens 2 aufgrund des Funktionsumfangs und des umfangreichen Drittanbietersupports als sinnvollste AR-Brille für das Forschungsvorhaben heraus.

AR-Software

Die Auswahl der passenden Software war ein Prozess, der verschiedene Entwicklungsumgebungen berücksichtigte, darunter Vuforia Studio, JigSpace,

3DQR, Unity, Creo Illustrate und verschiedene CAD-Programme. Das Hauptziel bei der Auswahl der Software war es, eine Lösung zu finden, die den in Kapitel 4.2 definierten Standards am nächsten kommt und alle grundlegenden Bedingungen an das Interaktions- und Multimediadesign erfüllt, um eine erfolgreiche Implementierung und Nutzung in den gegebenen Forschungssettings zu gewährleisten.

5.2.2 Phase 1: Entwicklung des Montageszenarios SVR

Im Folgenden wird die Baugruppe SVR sowie die Software für die Entwicklung des ersten Montageszenarios vorgestellt.

Vorstellung der Baugruppe

Die Baugruppe SVR wurde vom Kooperationspartner Achenbach Buschhütten zur Verfügung gestellt. Dabei handelt es sich um die Baugruppe, welche im Rahmen eines Praktikumsprojekts bei Achenbach Buschhütten gebaut wurde. Die Abmessungen der SVR betragen ungefähr 10cm x 6cm x 6cm (HxBxT) und sie besteht aus insgesamt 23 (7 Hauptbauteile, 16 Schrauben/Stifte/Steckteile) zu montierenden Bauteilen. Abbildung 5.4 zeigt die (montierte) Baugruppe.



Abbildung 5.4: Baugruppe Sickenvorrichtung

Fotos: Alexander Reineking (beschriftet)

Es ist anzumerken, dass die SVR hauptsächlich als Demonstrationsobjekt dient und keine nützlichen Funktionen bietet. Ihre einzige praktische Funktion ist das Pressen einer Sicke in dünne Materialien wie Aluminiumfolie oder Papier, was ebenfalls nur zu Demonstrationszwecken dient (vgl. Abbildung 5.5).

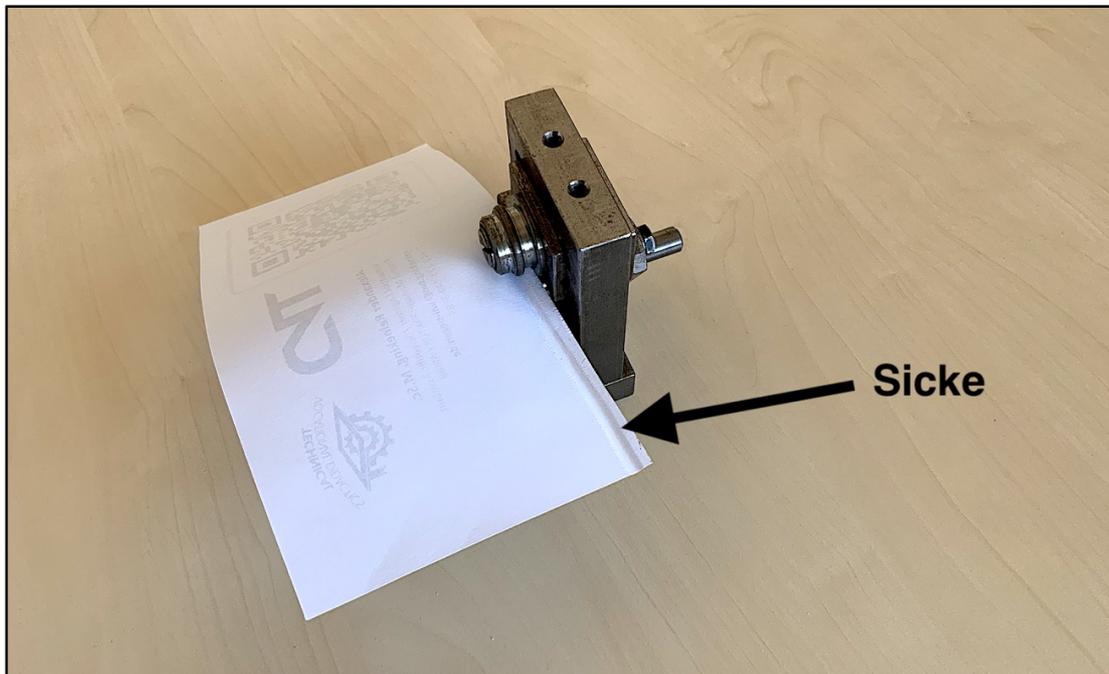


Abbildung 5.5: Walzen einer Sicke in Papier

Foto: Alexander Reineking (beschriftet)

Wenn die Baugruppe demontiert ist, ist der Montageprozess für das ungeschulte Auge oder den Laien nicht ersichtlich (vgl. Abbildung 5.6). Aus diesem Grund erweist sich die Baugruppe SVR in Bezug auf die Anwendung und Erprobung eines AR-Systems im ersten DBR-Zyklus als geeignet, da für die Montage in jedem Fall Unterstützung in Form einer Anleitung erforderlich ist. Darüber hinaus erfordert die Montage nur wenig implizites Arbeitsprozesswissen, da sie hauptsächlich aus einfachen Schraub- oder Steckverbindungen besteht. Die Verwendung einer AR-gestützten Montage erscheint daher aufgrund der geringen Komplexität sinnvoll und bietet eine gute Grundlage, um den Montageprozess zu erleichtern und klare Anweisungen zu geben.



Abbildung 5.6: Sickenvorrichtung (demontiert)

Foto: Alexander Reineking

Montageablauf

Um ein vollständiges Verständnis für den Montageablauf zu erlangen, wurde ein handlungsorientiertes Fachinterview mit dem Ausbildungsleiter von Achenbach Buschhütten durchgeführt. Dieser besaß die notwendige Expertise, um jeden Montageschritt genau zu erklären und wusste, worauf bei der Montage zu achten ist.

Während des Fachinterviews wurde eine spezifische Stelle identifiziert, bei der implizites Arbeitsprozesswissen während der Montage erforderlich ist. Der in diesem Arbeitsprozesswissen enthaltene Chunk²¹ (vgl. Kapitel 4.1.2) wurde als entsprechender Hinweis in die Montagedokumentation aufgenommen. Die schriftliche Dokumentation umfasste die Aufteilung in übergeordnete Montageschritte sowie die Auswahl des für die Montage erforderlichen Werkzeugs (vgl. Anhang A3). Als Grundlage für die softwareseitige Umsetzung der AR-gestützten Montageanleitung dient eben diese Dokumentation.

²¹ Dieser wird, neben einer konkreten Hinweisschaltfläche, auch durch ein rotes Blinken der betroffenen Bauteile hervorgehoben (dargestellt in Anhang A3: Montageschritt 4)

Softwareumgebung

Im Hinblick auf die Entwicklung einer AR-gestützten Montageanleitung sollte nicht nur der Forscher, sondern auch der Anwender in die Bearbeitung der AR-Inhalte mit einbezogen werden. Aus diesem Grund war eine Art „PowerPoint für AR“ notwendig, da eine maximale didaktische Reduktion erreicht werden sollte.

Zu Beginn des Projekts wurden Versuche unternommen, eine eigene AR-Umgebung zu programmieren. Dies erfolgte durch eine Kombination der Softwareprogramme Unity und dem Vuforia Plugin. Diese Bemühungen wurden jedoch schnell verworfen, da die Implementierung und Bearbeitung von AR-Inhalten einen unverhältnismäßig hohen Programmieraufwand erforderten. Darüber hinaus hätten Aspekte wie die notwendige Serveradministration zur Gewährleistung einer breiten Verfügbarkeit und ein dauerhafter Softwaresupport seitens des Forschers nicht dauerhaft gewährleistet werden können.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde deutlich, dass eine Drittanbietersoftware für das Forschungsprojekt erforderlich war, die den in Kapitel 4.2 festgelegten Anforderungen an das Interaktions- und Multimediadesign gerecht wird. Nach der Auswertung verschiedener technischer Möglichkeiten, also den Funktionen, welche von Herstellern geeigneter Softwarelösungen beworben werden, fiel die Entscheidung für die erste Testreihe auf Vuforia Studio, einem Autorentool der *PTC Inc.* Mit Hauptsitz in Boston. Vuforia Studio wurde als Autorentool ausgewählt, weil es alle gängigen Endgeräte unterstützt, alle Projektionsmethoden ermöglicht (vgl. Kapitel 2.3.1) und ein vielseitiges Autorenwerkzeug für die Erstellung von AR-Inhalten bietet. Abbildung 5.7 veranschaulicht die wichtigsten Elemente und Funktionen des Autorentools. Die einzelnen Montageschritte für die AR-Brille (Hololens 2) sind in Anhang A3 hinterlegt²².

²² Die Programmierung der Montageschritte für Tablets und Smartphones in Vuforia Studio verläuft analog und ist deshalb nicht zusätzlich im Anhang aufgeführt. Der einzige Unterschied liegt in der Bedienung der Schaltflächen: Bei der Verwendung einer AR-Brille werden Gesten und Schaltflächen in der Umgebung verwendet, während auf Tablets und Smartphones Schaltflächen auf dem Bildschirm vorhanden sind.

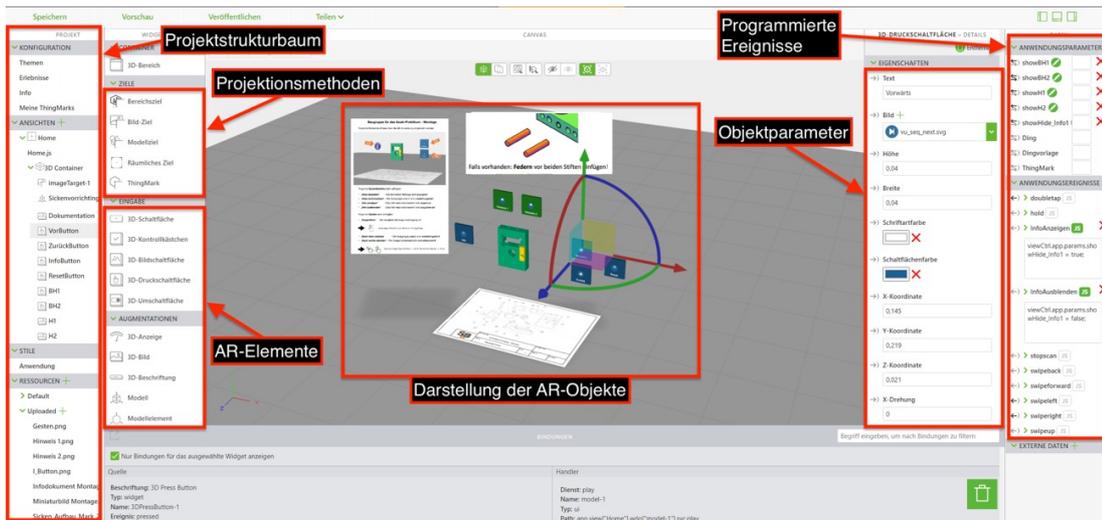


Abbildung 5.7: Wichtige Elemente des Autorentools (Vuforia Studio)

Quelle: eigene Darstellung

Die Autorensoftware Vuforia Studio erfüllt die Anforderungen weitgehend, wobei nachteilig berücksichtigt werden muss, dass grundlegende Programmierkenntnisse vorausgesetzt werden und zur Erstellung von 3D-Animationen eine Zusatzsoftware (PTC Creo Illustrate) benötigt wird. Zudem erfolgt die Bearbeitung der AR-Inhalte ausschließlich am Computer.

Die für die Darstellung in AR und die Bearbeitung in der Autorensoftware erforderlichen CAD-Daten wurden vom Kooperationspartner Achenbach Buschhütten bereitgestellt. Da im ersten DBR-Zyklus keine weiteren 3D-Daten benötigt wurden, war keine zusätzliche Software zur Modellierung von CAD-Daten erforderlich.

5.2.3 Phase 1: Erprobung des ersten Montageszenarios

Die AR-gestützte Montage wurde in verschiedenen Kontexten und bei unterschiedlichen Teilnehmergruppen getestet. Sowohl die Montage mit der AR-Brille als auch mit dem Tablet wurden dabei betrachtet.

Anwendungssetting

Die AR-gestützte Montage der SVR wurde umfassend mit Studierenden des TVD Lehrstuhls (n=2) und den Auszubildenden von Achenbach Buschhütten (n=6)

getestet. Hinzu kamen insgesamt vier Großveranstaltungen, bei denen das AR-Montagesetting einer breiteren Masse an Teilnehmern vorgestellt und zugänglich gemacht wurde.

Im Einzelnen handelte es sich dabei um die Eröffnungsveranstaltung des Campus Buschhütten, bei der Interessenten aus unterschiedlichen Berufsgruppen und Altersklassen teilnahmen (n=6), die Ausbildungsmesse Siegen, bei denen Abschlussklassen mit Technikscherpunkt vertreten waren (n=16), die exklusive Vorstellung des Campus Buschhütten beim Rotary Club Siegen, welcher diverse Berufsgruppen in der vorrangigen Altersklasse 50+ einschloss (n=4), sowie Schülern eines Maschinenbaulehrgangs für Grundschulklassen am Campus Buschhütten (n=12).

Durch die Anwendung der AR-Montage bei diesen Großveranstaltungen wurden nicht nur Lehrer und Schüler als Teilnehmergruppen berücksichtigt, sondern auch technikinteressierte Personen eines großen Altersspektrums. Die grundlegende Voraussetzung, dass keiner der Teilnehmer im Vorfeld mit der Montage der SVR vertraut war, wurden in allen Fällen erfüllt. Dies stellte sicher, dass die AR-gestützte Montage unter realen Bedingungen beobachtet und bewertet werden konnte.

Montage mit AR-Brille

Für die Montage mit der AR-Brille wurde auf die Marker-basierte Projektion zurückgegriffen (vgl. Kapitel 2.3.1). Als Marker diente eine einfache Explosionszeichnung der SVR (siehe Anhang A3). Eine Projektionsmethode mittels Objekterkennung, die zunächst in Erwägung gezogen wurde, wurde verworfen da die einzelnen Bauteile nicht zuverlässig erkannt werden konnten.

Bevor die Montage beginnen konnte, war es erforderlich, den Teilnehmern eine kurze Einführung in die Bedienung des AR-Systems zu geben. Diese umfasste die Nutzung der Brille mittels Gesten oder Sprachsteuerung sowie die Navigation innerhalb der AR-Benutzeroberfläche. Zusätzlich wurde darauf hingewiesen, dass „rotes Blinken“ einzelner Bauteile während der Montageanimation signalisiert, dass die hinterlegten Hinweisschaltflächen zur Unterstützung herangezogen werden sollten. Abbildung 5.8 verdeutlicht die gestengesteuerte Bedienung der AR-Schaltflächen.

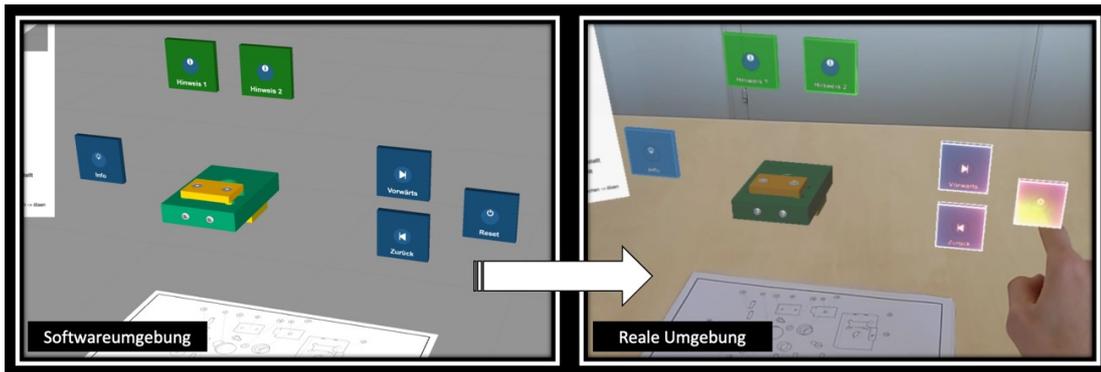


Abbildung 5.8: Virtuelle Umgebung vs. Digitale Umgebung (Vuforia Studio)

Quelle: eigene Darstellung (modifiziert nach Reineking, 2022)

Es wurden insgesamt zwei Hinweise für die Montage hinterlegt. Der erste Hinweis beinhaltete implizites Arbeitsprozesswissen und kann als Chunk angesehen werden (vgl. Anhang A3). Der zweite Hinweis wurde hinzugefügt, um eine eventuell bestehende Unklarheit zu klären, da nicht alle bereitgestellten SVR Baugruppe mit zwei zusätzlichen Federn für die Montage ausgestattet waren.

Montage mit Tablet²³

Wie zuvor angeführt, waren die Montageschritte bei Verwendung des Tablets analog zur Vorgehensweise mit der AR-Brille. Auch hier wurde die Marker-basierte Projektionsmethode zur Positionierung der AR-Elemente genutzt. Die Bedienung der Steuerungselemente stellt jedoch eine Unterscheidung dar. Statt Gesten- und Sprachsteuerung, wie bei der AR-Brille, mussten die Bedienelemente direkt auf dem Bildschirm des Tablets betätigt werden, um die AR-Animationen zu navigieren. Die zugehörigen Steuerelemente wurden nicht in die Umgebung projiziert, sondern waren direkt auf dem Display des Tablets sichtbar. Abbildung 5.9 zeigt den Aufbau der Bedienelemente.

²³ Die Entwicklungs- und Montageschritte, die in dieser Studie für Tablets beschrieben werden, sind gleichermaßen auf gängige Smartphones anwendbar und lassen sich auf diese übertragen. Aus Gründen der besseren Realisierbarkeit, wie beispielsweise dem größeren Display, höherer Rechenleistung und dem LiDAR-Scanner, wird jedoch primär das Tablet verwendet.

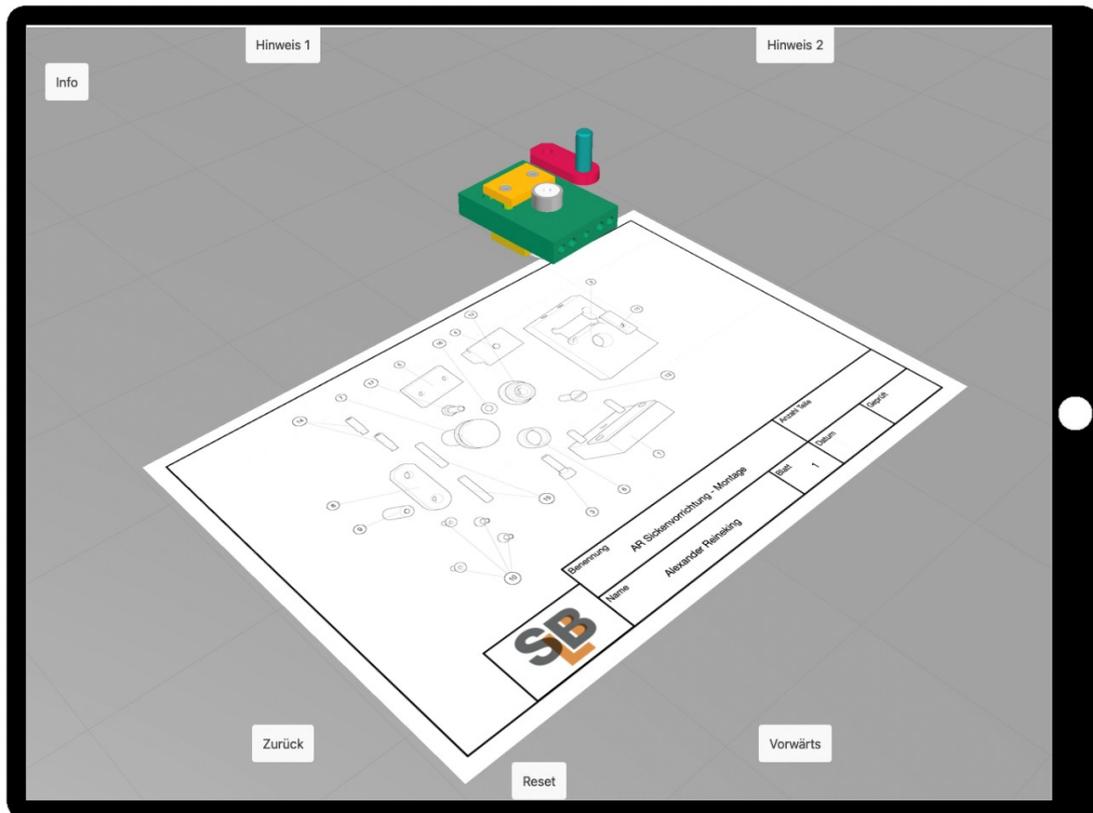


Abbildung 5.9: Aufbau der Bedienelemente beim Tablet

Quelle: eigene Darstellung (Vuforia Studio Vorschau-Modus)

Bei der Montage mit dem Tablet war – im Gegensatz zur AR-Brille – aufgrund fehlender Handfreiheit bei der Montage ein häufiges Absetzen notwendig. Um vergleichbare Montagezeiten wie bei der AR-Brille zu erreichen, musste das Tablet entweder von einer zweiten Person gehalten oder nach jedem Montageschritt abgestellt werden. Idealerweise wurde das Tablet mit Hilfe eines Ständers in einem Winkel aufgestellt, bei dem die (auf den Arbeitsplatz projizierte) Baugruppe gut sichtbar war. Auf diese Weise konnte nach jedem Montageschritt auf das Display des abgestellten Tablets gedrückt werden, um den nächsten Montageschritt anzuzeigen.

5.2.4 Phase 1: Analyse des ersten Montageszenarios

Das primäre Ziel dieser Phase bestand darin, die Erstellungsprinzipien der AR-Montageanleitung herauszuarbeiten und dabei Erfahrungen im Erstellen von AR-Anleitungen zu sammeln. Weiterhin sollte untersucht werden, wie gut

unerfahrene Nutzer mit der AR-Technologie zurecht kommen und welche Schwierigkeiten bei der Nutzung der verwendeten Hard- und Software während der Montage auftreten.

Die Montagezeiten wurden nur bei den Studenten, den Auszubildenden und einigen Schülern gemessen und mit den Montagezeiten einer schriftlichen Anleitung verglichen. Dabei handelte es sich jeweils um gleichaltrige Teilnehmergruppen, welche auf Nachfrage hinsichtlich der AR-Technologie kein Vorwissen besaßen. Die Gruppen wurden zufällig geteilt, womit von weitestgehend homogenen Teilgruppen ausgegangen werden kann. Dieser eingeschränkt repräsentative Vergleich der beiden Montageszenarien zeigte eine um etwa 30% verringerte Montagezeit bei der Verwendung der AR-gestützten Anleitung (vgl. Reineking 2022a).

Montagefehler spielten in dieser Phase eine untergeordnete Rolle, da es sich um eine sehr einfache Montage mit einem eindeutigen Verfahrensweg handelte. Trotz der quantitativen Beschränkung der Teilnehmerzahl und den unterschiedlichen handwerklichen Fähigkeiten der Teilnehmer bestätigt das erhaltene Ergebnis den Eindruck, dass ein AR-basiertes Assistenzsystem (sowohl AR-Brille als auch Tablet) zu kürzeren Montagezeiten, insbesondere bei der Erstmontage, führt. Dieses Ergebnis ist wenig überraschend, da auch die vorherrschende Studienlage in diese Richtung tendiert (vgl. Hegenberg & Schmidt, 2021; Hořejší, 2015; Pfeifroth et al., 2021).

Bemerkenswert war, dass der Unterschied in den Montagezeiten zwischen der AR-Brille und dem Tablet nur minimal war. Dies ist nach den Beobachtungen der Teilnehmer hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass sich für beide Geräte vorrangig zwei Vor- und Nachteile ergeben haben. Die AR-Brille ermöglichte eine Handfreiheit bei der Montage, während das Tablet abgestellt werden musste. Andererseits traten bei der Bedienung der AR-Brille häufig Probleme auf. Die Schaltflächen, die in die Umgebung projiziert wurden, wurden oft nicht präzise getroffen oder die Brille erfasste die Hände der Teilnehmer nicht korrekt, was zu Eingabeproblemen führte. Auf die alternative Möglichkeit der sprachgesteuerten Bedienung wurde von keinem Teilnehmer zurückgegriffen. Bei der Nutzung der

Bedienelemente auf dem Bildschirm des Tablets hingegen gab es keinerlei Probleme. Diese Bedienung erfolgte intuitiv und präzise.

Bei der Nutzung der AR-Brille wurden während der ersten Phase weitere Nachteile festgestellt. Einige Teilnehmer hatten auch nach einer Nachjustierung der Brillengläser Schwierigkeiten, die 3D-Elemente durch die AR-Brille scharf zu sehen. Insbesondere bei hellem Untergrund waren die Objekte schwerer zu erkennen als bei einem dunklen Untergrund. Darüber hinaus berichteten einige Auszubildende nach einer längeren Verwendungsdauer von etwa 15 Minuten über visuelle Ermüdung, leichten Kopf- und Nackenschmerzen und einer erhöhten kognitiven Belastung. Diese Beobachtungen decken sich mit den Erkenntnissen verschiedener anderer Studienergebnisse (vgl. Abele & Kluth, 2020; Berns et al., 2023; Buchner et al., 2021; Wille, 2016, S. 21ff.).

Der wesentliche Nachteil des Tablets, nämlich das Fehlen der notwendigen Handfreiheit bei der Montage, konnte durch das Abstellen des Gerätes bei gleichzeitiger Ausrichtung zu den projizierten 3D-Elemente behoben werden. Allerdings ist dies für größere Baugruppen keine praktikable Lösung. Diese Beobachtung legt nahe, eine Lösung zu finden, die neben der AR-Darstellung auch die Alternative einer rein virtuellen Darstellung (3D-Ansicht) bietet, für den Fall, dass das Tablet abgestellt werden muss. Das Ergebnis wäre eine leicht bedienbare Mixed-Reality-Lösung (vgl. Kapitel 2.3), die beide Vorteile (Handfreiheit, intuitive Bedienung) vereint.

Aufgrund der genannten Nachteile der AR-Brille kann diese angepasste Tablet-Option eine sinnvollere Alternative darstellen. Daher wurde eine Software gesucht, die sich auf AR-Autorensysteme für Tablets spezialisiert und neben einer AR-Ansicht auch die Möglichkeit einer 3D-Ansicht bietet.

Die Suche nach einer neuen Software bot zudem die Möglichkeit, ein Autorensystem zu finden, das im Vergleich zu Vuforia Studio einen geringeren Programmieraufwand bei der Erstellung der Inhalte erfordert. Zwei AR-Autorensysteme wurden identifiziert, welche die genannten Kriterien erfüllten und die negativen Aspekte von Vuforia Studio verbessern könnten. Es handelt sich dabei um „3DQR“ und „JigSpace“, welche in der nächsten Phase des Projekts getestet werden sollen.

5.2.5 Phase 2: Entwicklung (Schwerpunkt Tablet-Nutzung)

Die zweite Phase des ersten DBR-Zyklus gestaltete sich insgesamt etwas einfacher und war daher auch deutlich kürzer. Dies war vor allem darauf zurückzuführen, dass die Montageschritte der SVR unverändert blieben und der Fokus primär auf die Verwendung des Tablets gelegt wurde. In dieser Phase wurde lediglich die Software neu evaluiert, wobei zwei AR-Entwicklungsumgebungen zur Diskussion standen. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

3DQR

Die erste Entwicklungsumgebung war 3DQR, ein AR-Autorensystem der *3DQR GmbH* aus Magdeburg, das sich durch die folgenden Merkmale auszeichnete. Bei diesem System wird die Marker-basierte Projektionsmethode in Kombination mit einer Standortbindung verwendet. Abhängig von der Positionierung des Markers werden die Koordinaten der eingeblendeten AR-Elemente in der Umgebung festgelegt. Für eine präzise Positionierung im Raum wird der LiDAR-Scanner des Tablets genutzt. Als Marker können ausschließlich von 3DQR generierte QR-Codes verwendet werden. 3DQR unterstützt gängige Smartphones und Tablets und ermöglicht ebenfalls die Nutzung einer AR-Brille (Hololens 2), letzteres jedoch nur als Dienstleistungsangebot der *3DQR GmbH*. Während der Nutzung der Software am Tablet können multimediale AR-Inhalte in Echtzeit eingefügt oder bearbeitet werden. Programmierkenntnisse sind dafür nicht zwingend erforderlich. Für die Erstellung von Animationen ist jedoch die Verwendung der Software Unity, einer Entwicklungsumgebung für Spiele, erforderlich, was geringe Programmier- und Schnittstellenkenntnisse erfordert. In Abbildung 5.10 wird das Autorenwerkzeug von 3DQR für den Webbrowser dargestellt. Dabei werden die wesentlichen Elemente und Funktionen des Autorentools veranschaulicht.

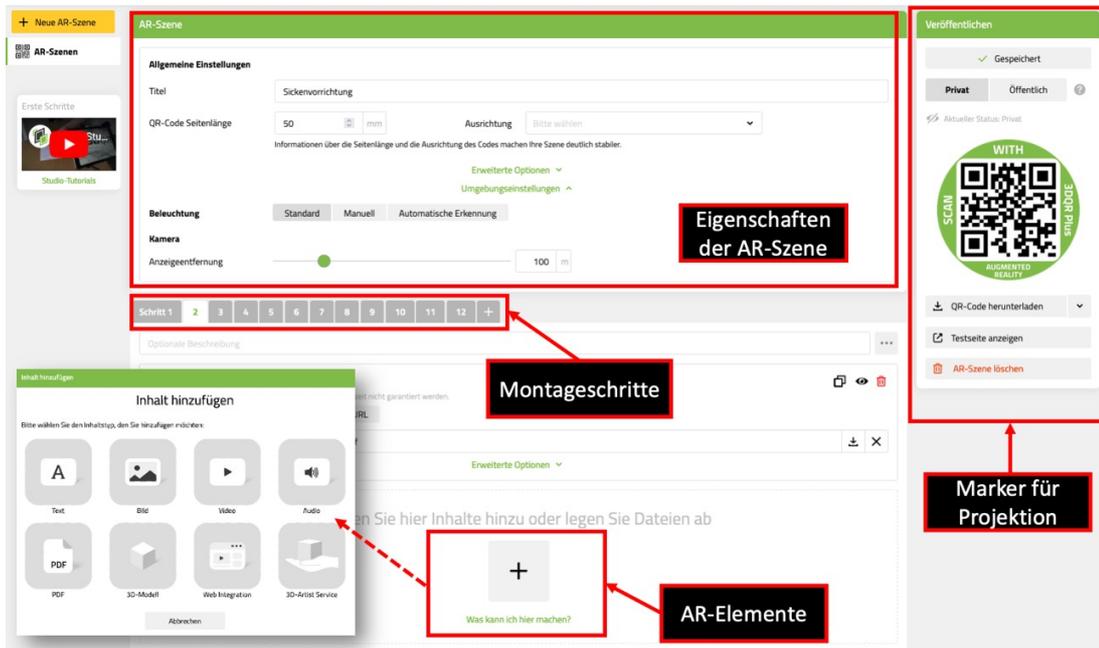


Abbildung 5.10: Wichtige Elemente des Autorentools (3DQR)

Quelle: eigene Darstellung

Ein kritischer Aspekt des Systems ist jedoch, dass innerhalb der Verwendung von 3DQR die Baugruppe nur als Ganzes bearbeitet werden kann. Einzelne Elemente der Baugruppe können nicht separat für die Bearbeitung ausgewählt werden, dies muss vorab durch die Verwendung einer CAD-Software gelöst werden. 3DQR bietet die Möglichkeit, alle AR-Elemente in einer rein virtuellen 3D-Ansicht darzustellen. Abbildung 5.11 veranschaulicht die AR-Projektion und die 3D-Ansicht²⁴ von 3DQR.

²⁴ Die Immersion der eingeblendeten Elemente wird durch die 3D-Ansicht begrenzt, jedoch bietet sie den Vorteil der Handfreiheit.



Abbildung 5.11: 3DQR – AR-Ansicht und 3D-Ansicht

Fotos: Alexander Reineking (beschriftet)

JigSpace

Die zweite potenzielle Entwicklungsumgebung war JigSpace, ein AR-Autoren-system der international ansässigen *Jigspace Inc.* Mit Hauptsitz in Melbourne. Die Merkmale dieser Software werden im Folgenden dargestellt.

Als Projektionsmethode wird die räumliche Platzierung genutzt. Dies bedeutet, dass die AR-Elemente auf jede ebene Oberfläche projiziert werden können. Die Software unterstützt gängige Smartphones und Tablets, allerdings besteht derzeit keine Möglichkeit der Nutzung einer HoloLens 2. Für zukünftige Versionen von JigSpace ist jedoch der Support für modernere AR-Brillen geplant.

Für die Erstellung der AR-Inhalte in JigSpace sind keinerlei Programmierkenntnisse erforderlich. Sämtliche multimedialen Inhalte werden unterstützt und Animationen für die Montagevorgänge werden automatisch von JigSpace erzeugt. Demnach wird keine Zusatzsoftware für die Erstellung von Animationen benötigt. Die wichtigsten Elemente und Funktionen des Autorenwerkzeugs von JigSpace werden in Abbildung 5.12 dargestellt.

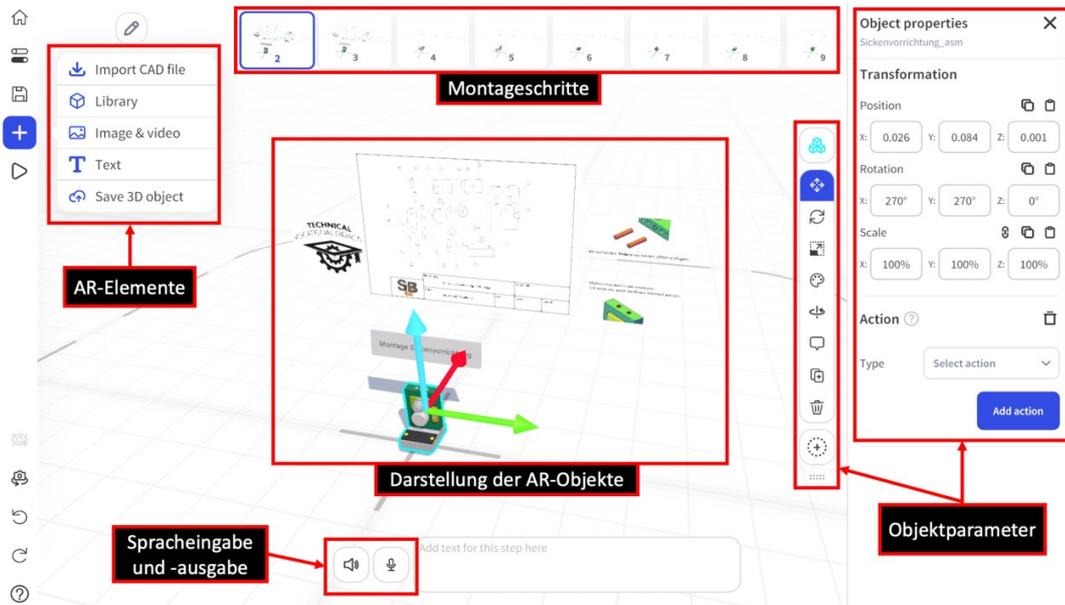


Abbildung 5.12: Wichtige Elemente des Autorentools (JigSpace)

Quelle: eigene Darstellung

Die Autorensoftware von JigSpace ist sowohl auf dem PC als auch auf dem Tablet verfügbar. Analog zu 3DQR macht JigSpace vom LiDAR-Scanner für eine präzise Positionierung der AR-Elemente gebrauch. Zudem gibt es auch hier die Möglichkeit, die Montageanleitung in einer vollständig virtuellen 3D-Ansicht darzustellen.

Abbildung 5.13 veranschaulicht (analog zu Abbildung 5.11) die AR-Projektion und die vollständig virtuelle 3D-Ansicht von JigSpace.



Abbildung 5.13: JigSpace – AR-Ansicht und 3D-Ansicht

Fotos: Alexander Reineking (beschriftet)

Für beide AR-Tools wurde eine Montageanleitung erstellt, wobei die bereits festgelegten Montageschritte unverändert blieben. Daher wird auf eine erneute detaillierte Aufstellung dieser Schritte verzichtet und auf die Montageschritte aus Anhang A3 verwiesen.

5.2.6 Phase 2: Erprobung (Schwerpunkt Tablet-Nutzung)

In der zweiten Phase wurde auf eine umfangreiche Erprobung der Montageanleitungen verzichtet, da die Darstellung der Montage mit dem Tablet keine erheblichen Unterschiede zur Vuforia Studio Version aufwies. Allerdings zeigten die Softwaretools 3DQR und JigSpace – in Bezug auf die alleinige Tablet-Nutzung – klare Vorteile hinsichtlich der Nutzung und des Funktionsumfangs.

Die Montageanleitungen der beiden neuen Softwaretools wurden intern am TVD Lehrstuhl mit drei Studenten erprobt, die bereits Erfahrung mit der Montage unter Verwendung von Vuforia Studio hatten. Als Endgerät für die Darstellung der AR-Anleitungen wurde ein Tablet (Modell: iPad Pro, Version 2020, 11 Zoll, LiDAR-Scanner) eingesetzt.

Bei den Bedienungsoptionen gab es, abgesehen von optischen Differenzen bei den Schaltflächen, keine nennenswerten Unterschiede aller genutzten Systeme. Allerdings wurden bei der Navigation einige Unterschiede deutlich. JigSpace wurde dabei als das am „flüssigsten“ zu bedienende System wahrgenommen. Im Detail lässt sich das auf folgende Unterschiede zurückführen: Bei Vuforia Studio konnte erst zum nächsten Montageschritt geschaltet werden, wenn die Animation eines Montageschritts beendet war. Dies führte an manchen Stellen zu unbeabsichtigten Wartezeiten. Dieses Problem existiert bei 3DQR und JigSpace nicht. Allerdings benötigt 3DQR für den Aufbau der 3D-Elemente bei jedem Schritt, abhängig von der Menge des Inhaltes, eine kurze Ladezeit, was zu einem weniger kontinuierlichen Ablauf führen konnte. JigSpace hat dieses Problem nicht und ermöglicht eine nahezu unterbrechungsfreie Navigation von einem Montageschritt zum nächsten ohne nennenswerte Ladezeiten.

Abgesehen von den genannten Navigationsaspekten bewerteten die Teilnehmer in einem abschließenden Interview die virtuellen Montageumgebungen beider

Systeme als gleichwertig. Dennoch hinterließ JigSpace bei der reinen Anwendung während der Erprobungsphase den besten Gesamteindruck.

5.2.7 Phase 2: Analyse (Schwerpunkt Tablet-Nutzung)

Das Ziel der zweiten Phase bestand darin, eine geeignete Software für den weiteren Projektverlauf zu identifizieren. Dabei lag der Fokus auf der Verwendung eines Tablets für die Montage. Nach einer anfänglichen Recherche erwiesen sich die beiden Softwaretools 3DQR und JigSpace als sinnvolle Alternativen, die es zu erproben galt.

3DQR besitzt die positive Eigenschaft der Standortbindung der AR-Inhalte. Dies ermöglicht eine präzise Positionierung von AR-Elementen in einem weitläufigen Umkreis (>100m), ohne dass das Tablet sich ständig neu in der Umgebung orientieren muss. Für die Montage kleinerer Baugruppen ist diese vorteilhafte Eigenschaft jedoch weniger relevant. Zudem bietet der Support für eine Hololens 2 über die *3DQR GmbH* keinen Mehrwert, da die Realisierung und Bearbeitung von AR-Inhalten im weiteren Projektverlauf von den Anwendern selbstständig erfolgen soll.

JigSpace bietet neben einer unterbrechungsfreieren Navigation subjektiv ein besseres Autorensystem für den Ersteller der AR-Inhalte²⁵. Der größte Vorteil von JigSpace liegt jedoch darin, dass keinerlei Programmieraufwand erforderlich ist. Dies erweist sich als besonders relevant, da die Probanden der folgenden DBR-Zyklen selbst das Autorensystem nutzen und AR-Inhalte einfügen werden. Durch die intuitive Handhabung der JigSpace-Software wird die Einstiegshürde für die Probanden deutlich reduziert.

Beide Softwarelösungen erlauben eine ausschließlich virtuelle Darstellung (3D-Ansicht) des Montageprozesses. Allerdings wurde diese Funktion erst genutzt, nachdem die Montageschritte zuerst in der AR-Ansicht überprüft wurden, die vor Beginn der eigentlichen Montage zur Verbesserung der räumlichen Orientierung beitrug.

²⁵ Diese Einschätzung stützt sich auf die umfassende Arbeit und Expertise des Forschers, der Erfahrungen mit allen genannten Systemen gesammelt hat.

Letztlich fiel die Entscheidung auf JigSpace, da der Funktionsumfang für den geplanten Anwendungszweck besser geeignet ist und die Software zum Zeitpunkt der Testphase generell den stabilsten und marktreifsten Eindruck hinterließ. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde für die restliche Projektlaufzeit eine unabhängige Entwicklungspartnerschaft mit der *Jigspace Inc.* eingegangen.

5.2.8 Zusammenfassung und Teilergebnisse des ersten DBR-Zyklus

Der erste DBR-Zyklus, der sich auf die Baugruppe SVR konzentrierte, gliederte sich in zwei Phasen. In der ersten Phase ging es um die Untersuchung der Machbarkeit einer AR-gestützten Montageanleitung. Hierbei wurde die Autorensoftware Vuforia Studio mit verschiedenen Endgeräten getestet, darunter die AR-Brille Hololens 2 und ein iPad Pro (Tablet mit LiDAR-Scanner).

Durch die Einbeziehung verschiedener Nutzergruppen und dem Einsatz bei unterschiedlichen Veranstaltungen konnten vielfältige Einblicke in die Reaktionen und Erfahrungen der Nutzer im Zusammenhang mit der AR-gestützten Montage der SVR gesammelt werden. Dabei zeigte sich, dass die Verwendung der AR-Brille individuelle Nachteile mit sich brachte. Diese variierten je nach Nutzer und umfassten hauptsächlich subjektive Aspekte wie schlechte Sichtbarkeit der AR-Elemente, unzureichender Tragekomfort und eine hohe kognitive Belastung.

Es wurde jedoch auch festgestellt, dass die Nutzung eines Tablets der AR-Brille überlegen war, insbesondere wenn die Möglichkeit bestand, das Tablet abzusetzen und somit Handfreiheit während der Montage zu haben. Aus diesem Grund wurden in der zweiten Phase dieses DBR-Zyklus zwei weitere AR-Autorensysteme in Betracht gezogen, die eine rein virtuelle 3D-Ansicht der Montageanleitung für Tablets ermöglichten.

Die vergleichende Gegenüberstellung der erprobten AR-Autorensysteme ist in Tabelle 5.2 dargestellt. Hierin werden alle Aspekte des Interaktionsdesigns, des Multimediadesigns und der Implementierung berücksichtigt (vgl. Kapitel 4.2).

Tabelle 5.2: Gegenüberstellung der erprobten Autorensysteme

	Vuforia Studio	3DQR	JigSpace
Zugänglichkeit (Autorensystem)	On- und offline nutzbar, gerätegebunden	Online nutzbar, nicht gerätegebunden	Online nutzbar, nicht gerätegebunden
Flexibilität (Montage)	Montageprozess flexibel gestaltbar; Animationen nur mit Zusatzsoftware	Montageprozess flexibel gestaltbar; Animationen nur mit Zusatzsoftware	Montageprozess flexibel gestaltbar
Flexibilität (Projektionsmethode)	Marker, markerlos, räumlich	Marker + Standort	Räumlich
Test- und Überprüfungsfunktion	Vorhanden	Nicht vorhanden	Vorhanden
Multimediasign	Alle Medienarten werden unterstützt	Alle Medienarten werden unterstützt	Alle Medienarten werden unterstützt
Kompatibilität (Montage)	Tablet, Smartphone, AR-Brille	Tablet, Smartphone, (AR-Brille mit Einschränkungen)	Tablet, Smartphone, (AR-Brille voraussichtlich ab 2024)
Kompatibilität (Autorentool)	Computer	Computer und Tablet/Smartphone	Computer und Tablet/Smartphone
Vernetzung	Kompatibel zur PTC Infrastruktur	Autonomes System, keine Softwarederivate	Autonomes System, keine Softwarederivate
Sicherheit und Datenschutz	Herstellerbedingt ²⁶	Herstellerbedingt ²⁷	Herstellerbedingt ²⁸
Support und Zukunftssicherheit	Technischer Support verfügbar (Drittanbieter und Hersteller), Softwareupdates in unregelmäßigen abständen	Technischer Support verfügbar (Hersteller), Softwareupdates in unregelmäßigen abständen	Technischer Support verfügbar (Hersteller), Softwareupdates in unregelmäßigen abständen
Zusätzlich benötigte Software	Creo Illustrate (Animationen) Ggf. CAD-Programm	Unity (Animationen) Ggf. CAD-Programm	Ggf. CAD-Programm
Subjektiver Gesamteindruck	Autorensystem insgesamt zu komplex	Eher für reine Informationsdarstellung von (großen) Anlagen geeignet	Für den Forschungszweck ausgereifteste Software

²⁶ <https://www.ptc.com/en/documents/policies> (zuletzt aufgerufen: 19.07.23)

²⁷ <https://3dqr.de/agb/> (zuletzt aufgerufen: 19.07.23)

²⁸ <https://www.jig.space/terms-and-conditions> (zuletzt aufgerufen: 19.07.23)

Letztendlich fiel die Entscheidung zugunsten von JigSpace aus, da dessen Funktionsumfang für die vorliegende Arbeit am besten geeignet ist.

Schlussfolgerung für die Gestaltung der folgenden DBR-Zyklen

In diesem DBR-Zyklus wurde die Grundlage für die folgenden Zyklen gelegt, indem eine geeignete Hard- und Software für das AR-System ausgewählt wurde. Mit Unterstützung dieser Hilfsmittel sollen die Teilnehmer in den nachfolgenden Versuchsreihen die Möglichkeit erhalten, ihr Wissen eigenständig in das JigSpace Autorensystem einzubringen.

5.3 DBR-Zyklus 2: Radialwellendichtring (RWD)

Der zweite DBR-Zyklus des Projekts widmet sich der Montage eines Radialwellendichtrings (RWD) in ein eigens für diese Aufgabe konstruiertes Gehäuse. Diese spezifische Montageaufgabe wurde gewählt, da sie zwar nicht übermäßig komplex, aber dennoch anspruchsvoll genug ist, um ein gewisse Menge an implizitem Wissen für eine erfolgreiche Durchführung zu erfordern (vgl. Tabelle 5.1). Die Erprobung der Montage erfolgte in Kleinstgruppen, um eine persönliche Betreuung sicherzustellen und somit eine detaillierte und qualitativ hochwertige Analyse durchführen zu können.

Das Hauptziel dieses Zyklus bestand darin, zu untersuchen, ob das Arbeitsprozesswissen der Probanden in Form von Chunks in das AR-Autorensystem übertragen werden kann. Dabei war es die Aufgabe der Probanden, diese Chunks in das AR-System zu überführen und somit ihr Fachwissen aktiv in die Weiterentwicklung der Montageanleitung einzubringen. Hierbei ergibt sich auch die Möglichkeit, die Funktionsfähigkeit des ausgewählten AR-Autorensystems in diesem neuen Montageszenario weiter zu erproben. Dafür wurde die Montageaufgabe zunächst mittels berufswissenschaftlicher Methoden (vgl. Kapitel 4.3) von dem Forscher und den Experten analysiert und gestaltet, um eine erste funktionsfähige Masterlösung zu entwickeln.

Um diese Ziele zu erreichen, muss zunächst der didaktische Rahmen für die AR-gestützte Montageaufgabe definiert werden. Hierbei werden die erforderlichen Schritte für die vollständige Arbeitshandlung der Aufgabe festgelegt. Analog zum ersten DBR-Zyklus (vgl. Kapitel 5.2) findet dieser anschließend in zwei Phasen statt. In diesen Phasen erfolgen jeweils die Entwicklung der AR-Montageanleitung, die praktische Erprobung der Anleitung durch die Probanden sowie die anschließende Analyse der gewonnenen Ergebnisse.

Schließlich findet eine abschließende Reflexion statt, in der die während dieses Zyklus gesammelten Erfahrungen und Teilergebnisse analysiert und bewertet werden. Die hier gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Gestaltung des dritten DBR-Zyklus.

5.3.1 Didaktischer Rahmen

Innerhalb des Forschungsvorhabens bildet die Definition des didaktischen Rahmens eine zentrale Säule für die erfolgreiche Umsetzung des Projekts.

Zunächst wurde das Arbeitssetting konzipiert und definiert. Hierbei wird der Versuchsaufbau sowie der Arbeitsauftrag für die Montage des RWDs festgelegt. Um eine praxisnahe Aufgabe zu konstruieren, erfolgte die Ausgestaltung des Arbeitsauftrags in enger Zusammenarbeit mit zwei Experten aus dem Kraftfahrzeug (KFZ) Bereich: einem Kraftfahrzeugtechnikermeister (im Folgenden als KFZ-Meister betitelt) und einem KFZ-Facharbeiter.

Im Rahmen dieser Zusammenarbeit wurden verschiedene Methoden zur Erhebung von Arbeitsprozesswissen angewandt, darunter die berufswissenschaftliche Arbeitsbeobachtung, handlungsorientierte Fachinterviews, lautes Denken und ein EFW (vgl. Kapitel 4.3). Diese Methodenkombination ermöglichte eine tiefgehende Analyse des Arbeitsprozesses und trug dazu bei, einen funktionsfähigen Lösungsweg für das AR-System zu entwickeln.

Das übergeordnete Ziel war es, eine handlungsorientierte Lernaufgabe zu schaffen. Diese Lernaufgabe sollte konstruktivistisches Lernen (charakterisiert durch individuelles Erleben, Erfahrung und Erprobung) unter Zuhilfenahme des AR-Systems ermöglichen (vgl. Kapitel 2.5), weshalb die Konzeption der Lernaufgabe dem Prinzip der vollständigen Handlung folgt. Dieses Prinzip, das in Abbildung 5.14 dargestellt wird, gliedert sich in die Phasen: Informieren, Planen/Entscheiden, Durchführen, Kontrollieren und Reflektieren.

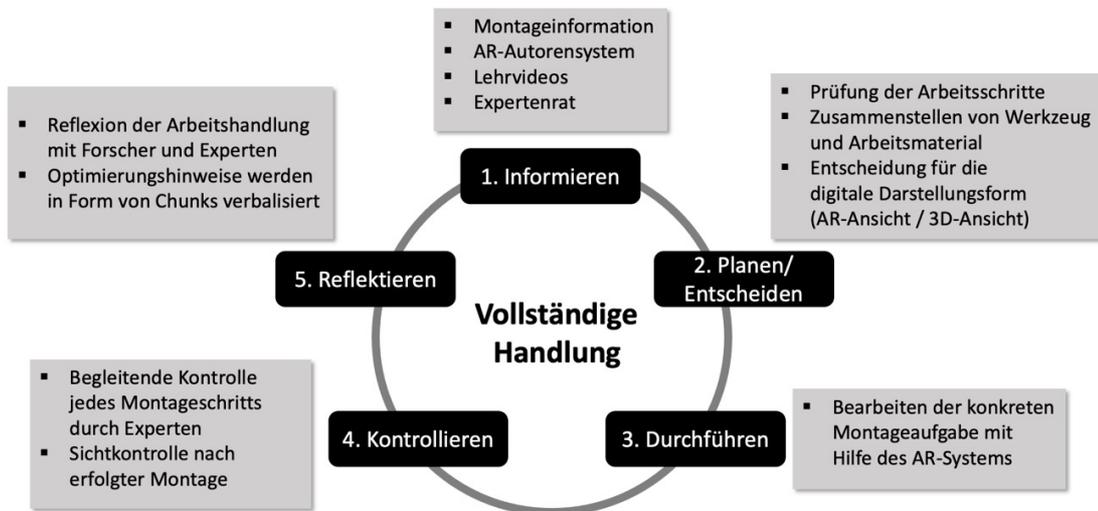


Abbildung 5.14: Kreis der vollständigen Handlung für AR-Montageaufgaben

Quelle: eigene Darstellung

1. Informieren

In der ersten Phase, die als Informationsphase bezeichnet wird, werden dem Probanden zunächst die erforderlichen Informationen für die erfolgreiche Durchführung der Montageaufgabe bereitgestellt. Dazu zählen die Bedienungsgrundlagen des AR-Systems sowie ein Verständnis für den Aufbau und die Funktionsweise der beteiligten Komponenten des Montageszenarios. Für eine detaillierte Informationsgewinnung werden dem Probanden verschiedene Ressourcen angeboten, darunter Lehrvideos oder die Möglichkeit der Expertenbefragung. Dies umfasst Informationen sowohl für das Autorentool JigSpace als auch den eigentlichen Akt der Montage des RWDs.

2. Planen und Entscheiden

In dieser Phase erfolgt die Planung des Arbeitsprozesses sowie die Entscheidungsfindung für die bevorstehende Montage. Da die Verwendung der multimedialen AR-Montageanleitung als umfängliches Hilfsmittel im Vordergrund steht, gibt es bei der Gestaltung des Arbeitsprozesses nur wenige Freiheitsgrade. Deshalb liegt der Fokus auf der Überprüfung der einzelnen Montageschritte durch den Probanden hinsichtlich ihrer Verständlichkeit. Zu diesem Schritt gehört auch die Auswahl des benötigten Montagewerkzeugs sowie die Entscheidung, ob die Montageanleitung in der AR-Ansicht oder in der 3D-Ansicht (Darstellung der rein

virtuellen Umgebung auf dem Tablet) während der Montage betrachtet werden soll.

3. Durchführen

In der Durchführungsphase tritt die konkrete Arbeitshandlung in den Vordergrund. Die zuvor geplante Montageaufgabe wird unter Verwendung des AR-Systems praktisch umgesetzt. Hierbei ergibt sich die Besonderheit, dass bei der Montage des RWDs nicht nur die technische Umsetzung, sondern auch die Handfertigkeiten der Probanden betrachtet werden können. Die AR-Montageanleitung dient dabei als visuelle Unterstützung und bietet eine Schritt-für-Schritt-Anleitung zur korrekten Ausführung der Montageschritte.

4. Kontrollieren

Die Kontrollphase unterscheidet sich von den anderen Phasen, da sie nicht nur auf die Durchführungsphase folgt, sondern auch begleitend stattfindet. Die Montage wird von Experten überwacht, die jeden Schritt kontrollieren. Wenn Fehler bei der Montage auftreten, kann jederzeit auf den Expertenrat zurückgegriffen werden. Nach der abgeschlossenen Montage erfolgt eine Sichtkontrolle des montierten RWDs, wobei die Qualität des Einbaus von den Experten beurteilt wird.

5. Reflektieren

Die abschließende Phase der vollständigen Handlung dient der Reflexion der geplanten und durchgeführten Arbeitshandlung. Diese Reflexion findet gemeinsam mit dem Forscher und den Experten statt. Hierbei liegt der Fokus auf der didaktischen Nutzung der identifizierten Fehler, die bei der Montage aufgetreten sind. Es wird überprüft, wie der gewählte AR-gestützte Arbeitsprozess optimiert werden kann. Diese Überprüfung erfolgt für jeden einzelnen Montageschritt, wobei die Optimierungshinweise in Form von Chunks offengelegt und verbalisiert werden.

Im Anschluss an die Reflexion folgt ein aktiver Teil, nämlich die Überführung der gefundenen Chunks durch die Probanden in das Autorensystem von JigSpace. Dies ermöglicht es den Probanden, ihre gewonnenen Erkenntnisse und

Optimierungen für zukünftige Montagen nutzbar zu machen, was zu einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess beiträgt.

Die Versuchsreihe des zweiten DBR-Zyklus ist so konzipiert, dass zwei Probandengruppen, bestehend aus je zwei Teilnehmern, die AR-Montageaufgabe in der Werkstatt des TVD durchführen. Die Auswahl der Teilnehmer erfolgte gezielt aufgrund ihrer beruflichen Hintergründe im gewerblich-technischen Bereich. Diese Auswahl garantierte, dass alle Teilnehmer mit der gängigen Fachsprache des Arbeitsauftrages vertraut waren. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass keiner der Probanden zuvor einen RWD montiert hatte.

5.3.2 Phase 1: Entwicklung des Montageszenarios RWD

Im Rahmen dieses Abschnitts wird die Baugruppe des RWDs vorgestellt und die Entwicklung des zweiten Montageszenarios mit Hilfe des AR-Softwaretools JigSpace beschrieben.

Vorstellung der Baugruppe

Die Baugruppe RWD fokussiert sich hauptsächlich auf die reine Montage des Dichtrings. Diese Art der Montage ist beispielsweise bei Dichtungen in Getrieben, Achsen und Hydrauliksystemen gängig. Im Vergleich zur SVR sind zwar weniger Bauteile zu montieren, jedoch ist die Montage des RWDs komplexer und erfordert implizites Wissen für eine fachgerechte Ausführung.

Zur Simulation eines kompakten und handlichen Einbaus wurde im CAD-Labor des TVD eine Einbauvorrichtung speziell für die Montage des RWDs modelliert. Sie besteht aus einer Welle und einem Wellengehäuse mit einer entsprechenden Aufnahmebohrung für den RWD. Zudem besitzt das Wellengehäuse hervorstehende Kanten für die optimale Einspannung in einen Schraubstock. Die Gesamtmaße des Wellengehäuses inklusive der montierten Welle betragen ungefähr 10cm x 8cm x 6,5cm (HxBxT). Abbildung 5.15 veranschaulicht die Einbauvorrichtung (Welle, Wellengehäuse) inklusive dem montierten RWD.

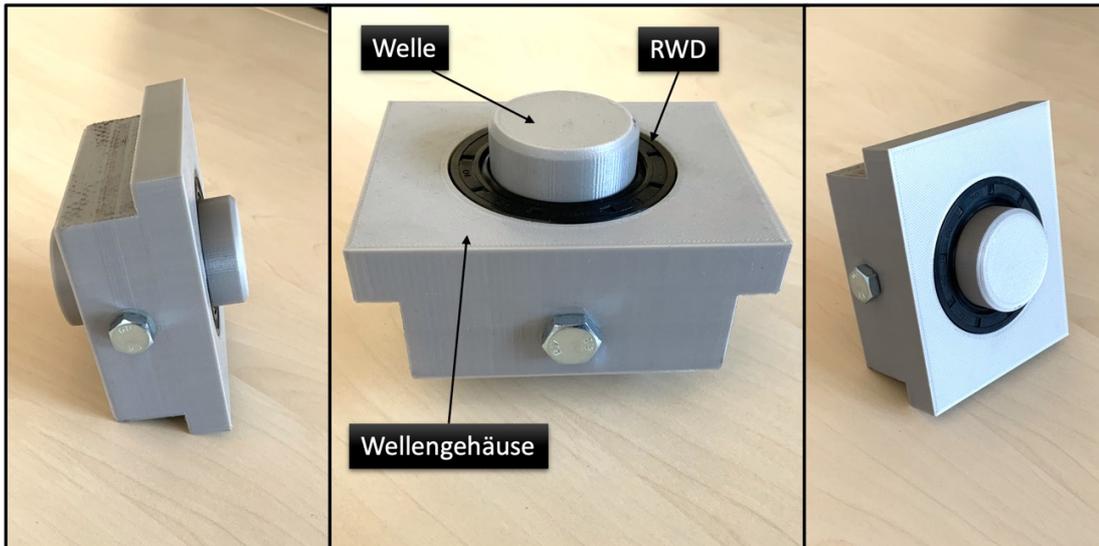


Abbildung 5.15: Einbauvorrichtung und RWD (montiert)

Fotos: Alexander Reineking (beschriftet)

Die Welle sitzt in einer provisorischen Stützlagerung (schwimmend), die durch zwei Schrauben in einer Wellennut realisiert wird²⁹. Diese Konstruktion ermöglicht die sichere Lagerung während der Montage und ermöglicht die manuelle Überprüfung der Wellendrehung, was zwei wesentliche Faktoren für die Montageaufgabe sind. Eine detaillierte Ansicht der Konstruktionszeichnung ist in Anhang A4 dargestellt.

Der zu montierende RWD ist ein Originalbauteil (40x60x10 Millimeter mit Staublippe). Ausgehend von diesem Normbauteil wurden Welle, Passung und ein passender Eintreibdorn normgerecht konstruiert und maßhaltig aus Kunststoff (PETG) gefertigt. Abbildung 5.16 zeigt die Einzelteile der Einbauvorrichtung.

²⁹ Es ist zu beachten, dass diese Art der Wellenlagerung im realen Anwendungsfall (Betrieb der Welle) aufgrund von erhöhter Reibung, Verschleiß und der Beanspruchung an den Schrauben nicht zweckmäßig ist.

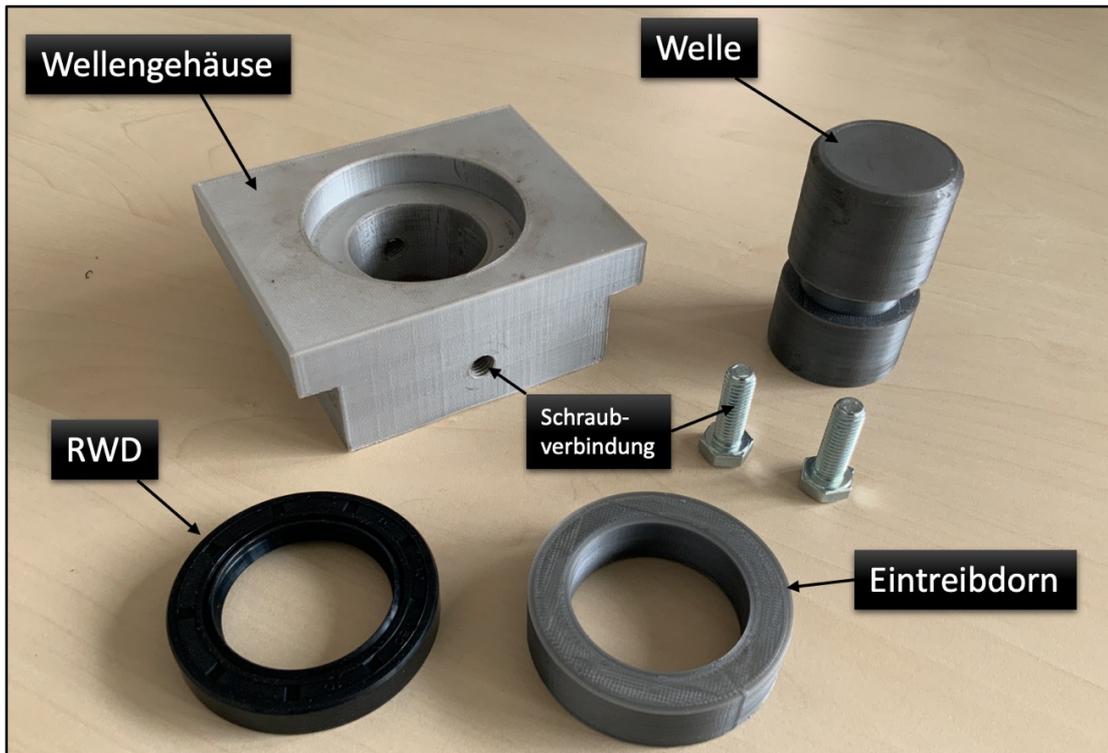


Abbildung 5.16: Einbauvorrichtung des RWD (demontiert)

Foto: Alexander Reineking (beschriftet)

Das Einbauverhalten wurde von einem Experten (KFZ-Meister) geprüft und im Vergleich zu üblichen Metallbauteilen als sehr realistisch und zweckmäßig eingestuft. Es ist zu beachten, dass die montierte Baugruppe weder praktische Funktionen aufweist noch in einem tatsächlichen System verbaut oder genutzt werden kann.

Montageablauf

Eines der kritischen Elemente bei der Handhabung von RWDs ist der Montageablauf: Eine fehlerhafte Montage gehört zu den häufigsten Ausfallursachen für Dichtringe (Dana Aftermarket, 2023; SEALWARE International Dichtungstechnik GmbH, 2019). Daher ist ein Verständnis für einen möglichst vollständigen und korrekten Montageablauf unerlässlich.

Um ein vollumfängliches Verständnis für den Montageablauf zu erlangen, wurden zunächst handlungsorientierte Fachinterviews mit zwei Experten durchgeführt. Diese Interviews dienen dazu, die Begründungszusammenhänge der einzelnen Montageschritte zu verstehen. Parallel dazu ermöglichte eine

berufswissenschaftliche Arbeitsbeobachtung, alle notwendigen Montageschritte zu erfassen. Tabelle 5.3 stellt diese notwendigen Schritte dar, die ebenfalls in der AR-Montageanleitung abgebildet werden sollten.

Tabelle 5.3: Arbeitsschritte innerhalb der AR-Anleitung

Arbeitsschritt	Notwendige Tätigkeit
1	Einspannen des Wellengehäuses
2	Einölen des Dichtrings
3	Platzierung des Dichtrings
4	Platzierung des Eintreibdorns
5	Einbau des Dichtrings mit einem Hammer
6	Entnahme des Eintreibdorns
7	Sichtprüfung des Einbaus
8	Prüfung, ob die Welle sauber dreht

Quelle: Dreher & Reineking, 2024

Um die Expertise der Fachleute optimal zu nutzen, wurde ein EFW im Anschluss an die Interviews durchgeführt. Ziel dieses EFW war es, das Arbeitsprozesswissen der Experten zu erfassen, um einen ersten funktionsfähigen Lösungsweg für die Umsetzung im AR-System zu erarbeiten. Die aus den Fachinterviews, der Arbeitsbeobachtung und dem EFW gewonnen Erkenntnisse dienten als Grundlage für die Entwicklung einer umfassenden Masterlösung für den Montageablauf. Diese Masterlösung wurde in das AR-Autorentool JigSpace integriert. Dadurch entstand eine detaillierte AR-Montageanleitung, die den vollständigen und korrekten Montageablauf des RWDs abbildet.

Darstellung der Masterlösung im AR-System

Die Umsetzung der Masterlösung in die AR-Anwendung erforderte die Bereitstellung der notwendigen CAD-Daten, um eine authentische Darstellung zu gewährleisten. Die bereits erstellten CAD-Daten der Einbauvorrichtung konnten dabei wiederverwertet werden. Zusätzlich wurden der RWD sowie das benötigte

Montagewerkzeug, bestehend aus Eintreibdorn, Schraubstock, Schonhammer und einem Öl-Kännchen, konstruiert.

Insgesamt wurden zehn Schritte für die AR-Anwendung entwickelt (vgl. Anhang A5). Neben den acht in Tabelle 5.3 genannten Montageschritten wurden zwei weitere Schritte vor dem eigentlichen Montagevorgang hinzugefügt. Der erste dieser zusätzlichen Schritte bietet eine Übersicht über das benötigte Werkzeug, während der zweite auf eine Sichtprüfung bezüglich der Sauberkeit der Montagevorrichtung hinweist. Abbildung 5.17 veranschaulicht den ersten Vorbereitungsschritt innerhalb der Autorenumgebung.

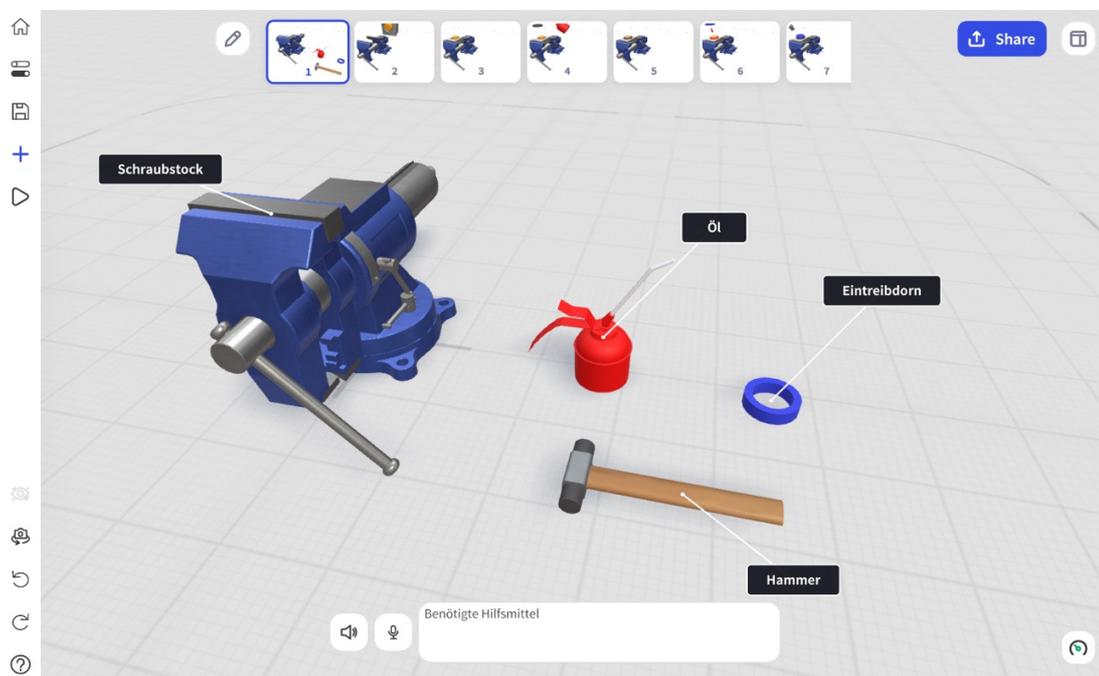


Abbildung 5.17: Montage RWD: Ansicht in der Autorenumgebung

Quelle: eigene Darstellung

Hinweise, die beim EFW identifiziert wurden und nicht grundlegend für die erfolgreiche Umsetzung der Montage waren (beispielsweise die Benetzung der Kontaktflächen mit Öl), wurden zunächst nicht in das AR-System integriert. Den Probanden wird durch diese Entscheidung ermöglicht, selbstständig auf Schwierigkeiten und Probleme bei der Montage reagieren zu können, und somit implizites Wissen zu generieren. Zudem fördert diese Herangehensweise ein

eigenständiges Problemlösungsverhalten und bietet Probanden die Gelegenheit, ihre eigenen Erkenntnisse in das AR-Autorensystem einzubringen.

5.3.3 Phase 1: Erprobung des zweiten Montageszenarios

Die Erprobung des Montageszenarios (ohne Chunks) mit dem AR-System wurde in einer kontrollierten Umgebung durchgeführt, um eine praxisnahe und reproduzierbare Durchführung sicherzustellen.

Anwendungssetting

Die AR-gestützte Montage wurde in dieser Phase von zwei Probanden durchgeführt. Tabelle 5.4 führt die Teilnehmerprofile auf und stellt die unterschiedlichen Hintergründe und Qualifikationen der Probanden dar.

Tabelle 5.4: Probanden RWD-Montage Phase 1

Proband Nr.	Beruf	Fachrichtung
1	Student / Bachelorand	Fahrzeugbau
2	Student / Masterrand	Lehramt Berufskolleg: Fachrichtungen Maschinenbau/Mathematik

Nach einer kurzen Instruktionsphase zur Nutzung der AR-Software JigSpace erhielten die Probanden den Arbeitsauftrag. Dieser wurde mündlich vermittelt und lautete sinngemäß:

„Montieren Sie den Radialwellendichtring mit Hilfe des zur Verfügung gestellten AR-Systems am TVD-Arbeitsplatz. Die Montage wird von einem Experten begleitet, der bei Bedarf Hilfestellungen geben kann.“

Um eine unabhängige Montage jedes Probanden zu gewährleisten, erfolgte die Montage nacheinander in Einzelarbeit, wobei eine räumliche Trennung der Probanden sichergestellt wurde. Das notwendige Werkzeug wurde am Montagearbeitsplatz des TVD bereitgestellt, so dass die Probanden Zugang zu allen erforderlichen Hilfsmitteln hatten.

Während des gesamten Montageprozesses wurden die Probanden sowohl vom Forscher als auch von einem Experten beobachtet. Diese Beobachtung ermöglichte eine detaillierte Analyse des Montageverhaltens und der Interaktion der Probanden mit dem AR-System. Bei Bedarf standen der Forscher und der Experte auch für eventuelle Hilfestellungen während der Montage zur Verfügung, wobei darauf geachtet wurde, die Unabhängigkeit der Probanden nicht unnötig zu beeinträchtigen.

Montage des RWD und ermittelte Chunks

Nachdem sich die Probanden über das Montagesetting informiert hatten, konnten sie frei wählen, ob die Montageanleitung in der AR- oder der 3D-Ansicht verwenden wollten. Beide Probanden haben sich vor dem eigentlichen Montagebeginn die Montageanleitung in der AR-Betrachtungsweise angeschaut, um einen Überblick zu erhalten. Während Proband 1 für die Bearbeitung des Montageauftrages die 3D-Umgebung im Tablet wählte, entschied sich Proband 2, die AR-Umgebung beizubehalten. Abbildung 5.18 zeigt einen der Probanden während der Montagetätigkeit.

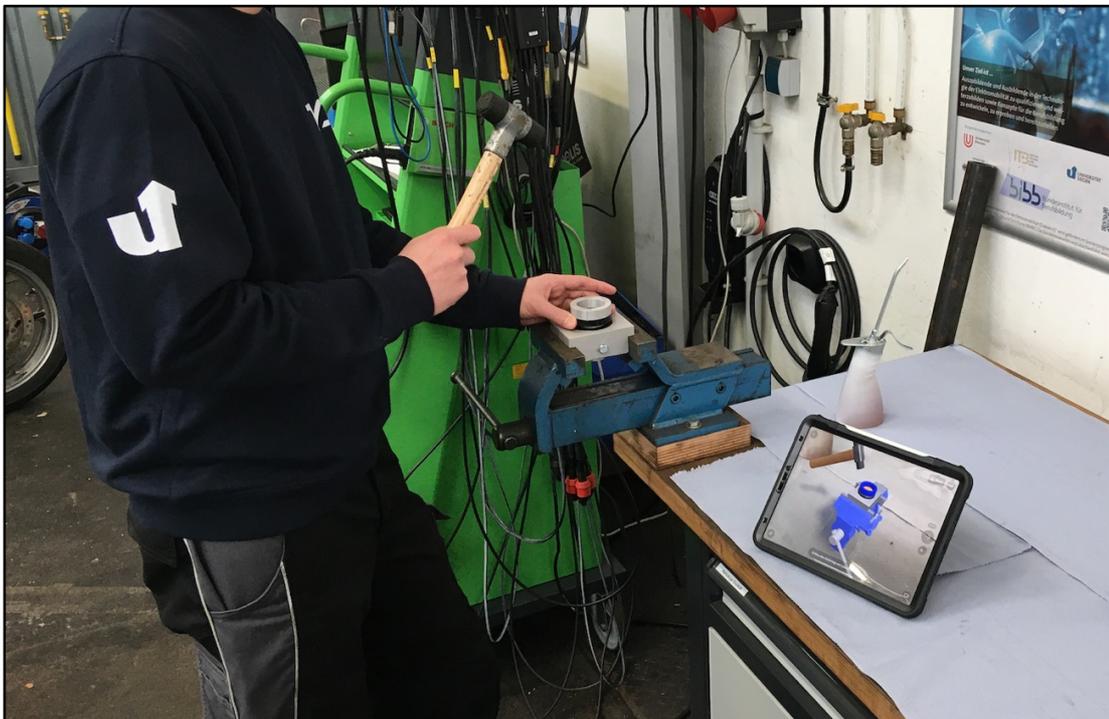


Abbildung 5.18: Proband während der Montage des RWD

Foto: Alexander Reineking (modifiziert nach Dreher & Reineking, 2024)

Bei beiden Probanden traten während der Montage Schwierigkeiten auf. Diese Herausforderungen konnten entweder durch eigenständiges Probieren oder durch Hilfestellungen des Experten gelöst werden. Zum Beispiel kam es bei beiden Probanden zu einer Verkantung des RWDs während der Montage. Dieses Problem konnte jeweils erst im zweiten Anlauf, nach entsprechender Hilfestellung des Experten, korrigiert werden. An dieser Stelle wurde von Seiten der Probanden ein Chunk erkannt, welcher als einer von insgesamt acht Chunks in das AR-System einfließen sollte (vgl. Tabelle 5.5).

Nach der abschließenden Bewertung des montierten RWDs durch den Experten erfolgte eine mündliche Evaluation mit den jeweiligen Probanden. Während diesen Evaluationsgesprächen wurden die restlichen Chunks verbalisiert, die während der Montageerfahrung erkannt wurden. Tabelle 5.5 stellt die ermittelten Chunks der Probanden für den jeweiligen Montageschritt dar.

Tabelle 5.5: Ermittelte Chunks der RDW-Montage

Arbeits-schritt	Tätigkeit	Durch die Probanden eingepflegte Chunks
1	Einspannen des Wellengehäuses	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Auf bündige Auflage auf dem Schraubstock achten ▪ Schraubstock handfest anziehen
2	Einölen des Dichtrings	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dichtring mit Nut nach unten ausrichten ▪ Einölen der Kontaktflächen des Dichtrings mit der Halterung (optimal: innere und äußere Mantelfläche des Dichtrings)
3	Platzierung des Dichtrings	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Möglichst parallel zum Bauteil platzieren
5	Einbau des Dichtrings mit einem Hammer	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Möglichste gleichmäßig und vorsichtig (rundum) aufschlagen ▪ Darauf achten, dass der Dichtring nicht verkantet
7	Sichtprüfung des Einbaus	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Obere Stirnfläche des Dichtrings sollte bündig mit der Halterung sein

Quelle: modifiziert nach Dreher & Reineking, 2024

Beim Evaluationsgespräch kamen nicht nur technische Aspekte, sondern auch die Interaktion mit dem AR-System und die subjektive Wahrnehmung der Probanden zur Sprache. Diese Aspekte werden im Folgenden genauer betrachtet.

Zwischenevaluation und Autorentätigkeit

Die Evaluierung nach der abgeschlossenen Montage hatte zum Ziel, das Verhalten der Probanden bei der Verwendung des AR-Systems zu analysieren. Die Probanden beantworteten in diesem Zusammenhang gezielte Fragen, die sich auf spezifische Aspekte des Montageprozesses und der Interaktion mit dem AR-System bezogen (auf die Analyse der Fragen wird im folgenden Unterkapitel genauer eingegangen). Zu den behandelten Fragen gehörten:

- Auf welche Probleme sind Sie beim Einbau des Dichtrings gestoßen?
- Mit welchen Hilfestellungen konnten die Schwierigkeiten überwunden werden?
- Wie intuitiv verlief die Nutzung der AR-Anleitung?
- Fühlten Sie sich vom AR-System über- oder unterfordert?

Der Fokus der Analyse lag vor allem auf den Schwierigkeiten beim Einbau und deren Bewältigung. Eben diese Schwierigkeiten legten implizites Arbeitsprozesswissen offen, welches ein Experte in der Praxis durch langjährige Erfahrung oftmals unterbewusst löst oder umgeht. Diese tiefe Einsicht ermöglichte es, praxisrelevante Chunks zu identifizieren.

Die aus diesem Evaluationsgespräch ermittelten Chunks wurden nach einer gezielten Instruktion in das Autorensystem von JigSpace von den Probanden selbst eingepflegt. Diese Modifikation des Montageprozesses mit Hilfe des Autorensystems durch die Probanden stellte sicher, dass das verbalisierte Arbeitsprozesswissen nachhaltig und authentisch erhalten bleibt.

Nach diesem Schritt wurden die Probanden auch zur Bedienung und Anpassung des Autorensystems befragt. Die Rückmeldung entsprach den Erwartungen: Die Arbeit mit dem Autorensystem wurde als unkompliziert empfunden und stellte keine nennenswerte Hürde dar.

5.3.4 Phase 1: Analyse des zweiten Montageszenarios

Das Hauptziel dieser ersten Phase war es, die Fähigkeiten der Probanden im Umgang mit dem AR-System und der Autorenumgebung zu untersuchen. Gleichzeitig wurde in diesem Stadium angestrebt, dass die Probanden aufgrund ihrer mangelnden Erfahrung bei der Montage von RWDs Fehler machten, deren Bewältigung sich später in Form von Chunks in das AR-System integrieren ließen.

Diese Fehler oder Schwierigkeiten wurden durch das bewusste Auslassen detaillierter Hinweise hervorgerufen. In der AR-Montageanleitung waren lediglich die grundlegenden Montagehandlungen hinterlegt, wohingegen spezifische Hinweise (beispielsweise durch Einbringung von Arbeitsprozesswissen der Experten) bewusst ausgelassen wurden. Dies führte dazu, dass sich die Probanden bei der Montage aktiv mit den Herausforderungen auseinandersetzen mussten. Die gefundenen Chunks, welche in Tabelle 5.5 aufgelistet sind, sind das direkte Resultat der experimentellen Montagesituation.

Auffällig war, dass Unterstützung nicht nur bei den motorischen Tätigkeiten benötigt wurde, wie zum Beispiel bei der Eintreibung des RWDs, sondern auch bei der grundlegenden Verwendung von Hilfsmitteln. So war es ohne zusätzlichen Hinweis nicht ersichtlich, wie die Montagevorrichtung in den Schraubstock gespannt werden musste. Dieser Arbeitsschritt ist im realen Anwendungsfall zwar in der Regel nicht erforderlich, jedoch zeigt er, dass Informationen zur grundlegenden Handhabung von Standardwerkzeug bei der Erstmontage durchaus relevant sein können.

Dasselbe galt für das Einölen des RWDs. Es war nicht selbstverständlich, dass nur die Kontaktflächen benetzt werden sollten, weshalb dieser spezifische Chunk aufgegriffen wurde. Die Hervorhebung solcher Details in den Montageanleitungen kann einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss für den Erfolg der Montage darstellen. In den Evaluationsgesprächen nach der Montage wurden die verbalisierten Chunks der Probanden nochmals aufgenommen und analysiert.

Zusätzlich bestätigten die Gespräche die intuitive Bedienung des AR-Systems, was angesichts der gewählten AR-Software absehbar war. Die Verwendung

gängiger Touch-Gesten, wie sie von handelsüblichen Smartphones und Tablets bekannt sind, erleichterte den Probanden den Zugang zur Technologie.

Im Hinblick auf die Arbeit in der digitalen Umgebung zeigte sich, dass Proband 1 (3D-Ansicht) keinerlei Schwierigkeiten hatte, sich in der Montageanleitung zurechtzufinden. Proband 2 (AR-Ansicht) äußerte hingegen Bedenken darüber, ob sich möglicherweise zusätzliche 3D-Elemente im nicht sichtbaren Bereich der AR-Projektion befanden. Allerdings erwiesen sich diese Bedenken als unzutreffend, da bei der Entwicklung der AR-Montageanleitung darauf geachtet wurde, dass alle 3D-Elemente im sichtbaren Bereich platziert wurden.

Beide Probanden meldeten zurück, dass sie sich weder über- noch unterfordert bei der Nutzung des AR-Systems fühlten. Proband 1, der angab, noch nie mit einem derartigen AR-System gearbeitet zu haben, empfand die kleinteilige, visuell animierte Darstellung der Montageanleitung als sehr hilfreich. Proband 2 unterstrich ebenfalls die ausgeglichene Anforderung und hob positiv hervor, dass er jederzeit einzelne Montageschritte im Voraus ansteuern konnte. Dies trug seiner Meinung nach zu einer besseren Übersicht und mehr Sicherheit bei der Montage bei.

Die größte Herausforderung bei beiden Probanden bestand darin, das richtige Gefühl für die Führung des Hammers beim Eintreiben des RWDs zu finden. Bei beiden Probanden verkantete sich der RWD beim ersten Einbauversuch und musste wieder entnommen werden. Diese Umstände waren auf zu feste und zu unkontrollierte Hammerschläge zurückzuführen. Im Falle von Proband 1 führte dies sogar zu einer Beschädigung des RWDs, die diesen unbrauchbar machte.

Insbesondere dieser Aspekt soll durch die ergänzten Chunks im AR-System in der zweiten Phase mit neuen Probanden verbessert werden. Ob dies im zweiten Durchlauf gelingen wird, zeigt die folgende Phase des Projekts.

5.3.5 Phase 2: Entwicklung (optimierte Montageanleitung)

Die Weiterentwicklung des Montageszenarios für die zweite Phase wurde von der ersten Probandengruppe geleistet, indem diese die Möglichkeit erhielten, ihre offengelegten Chunks in einer beliebigen Form – sei es auditiv, bildlich oder in

Textform – in das AR-System einzupflegen. Sie entschieden sich für eine ausschließlich textbasierte Darstellung der Chunks. Abbildung 5.19 veranschaulicht einen beschrifteten Auszug von Chunks aus dem Arbeitsschritt „Einbau des Dichtrings mit einem Hammer“ im AR-System, welche die textbasierte Herangehensweise der Probanden verdeutlicht.

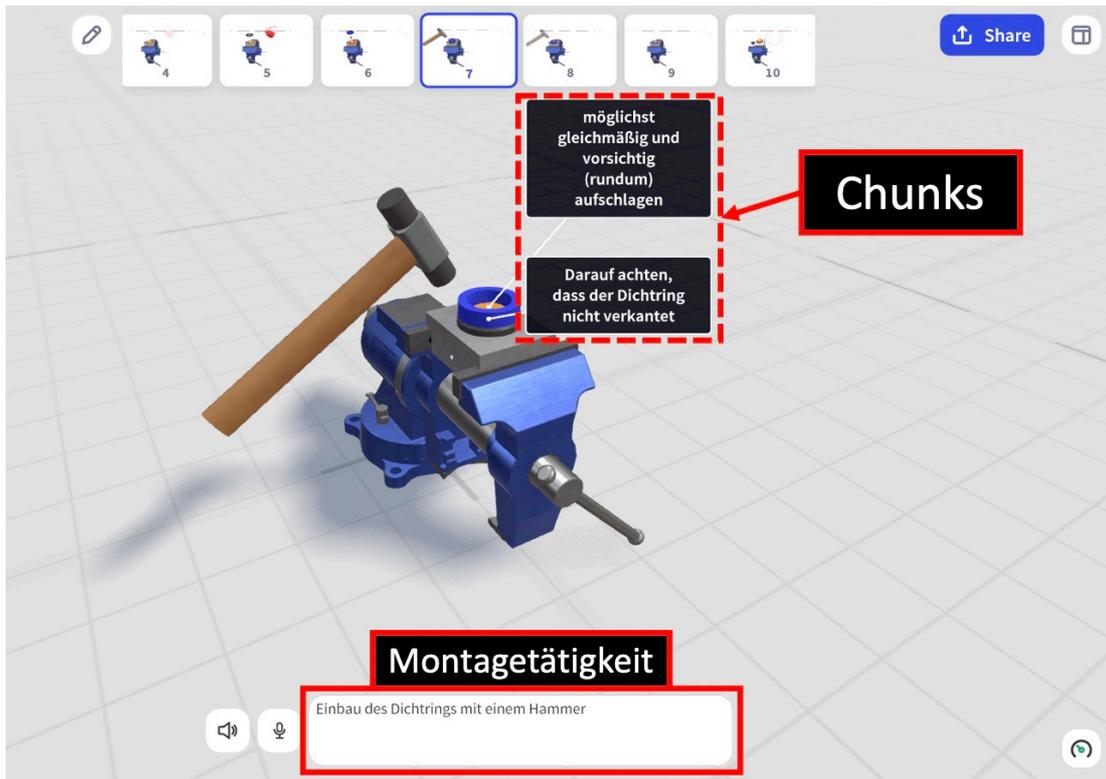


Abbildung 5.19: Chunks im Autorensystem (beschriftet)

Quelle: eigene Darstellung

Die in Phase 1 verbalisierten und dann in das AR-System übertragenen Chunks (vgl. Tabelle 5.5) wurden einem kurzen Redaktionsprozess durch den Forscher unterzogen. Dieser Schritt gewährleistete, dass die Chunks in der virtuellen Darstellung richtig positioniert waren und keine Tippfehler enthielten.

Nach dieser redaktionellen Begutachtung bedurfte es keiner weiteren Anpassung des AR-Systems. Das Ziel dieser Phase war nämlich nicht, das System umfassend zu verändern, sondern zu prüfen, ob bei gleicher Baugruppe und gleichem Montageablauf, jedoch mit Chunks bereicherter Montageanleitung, die Schwierigkeiten der ersten Gruppe behoben werden konnten.

Die entscheidende Fragestellung lautete somit: Sind die Probanden erneut auf ähnliche Probleme gestoßen oder war die durch Chunks bereicherte AR-Montageanleitung ausreichend, um erkannte Hindernisse in der Montage zu überwinden?

5.3.6 Phase 2: Erprobung (optimierte Montageanleitung)

In der zweiten Phase wurde die AR-gestützte Montage ebenfalls von zwei Probanden durchgeführt. Die folgende Tabelle 5.6 führt die Teilnehmerprofile der beiden Probanden auf und stellt ihre unterschiedlichen beruflichen Hintergründe und Qualifikationen dar.

Tabelle 5.6: Probanden RWD-Montage Phase 2

Proband Nr.	Beruf	Fachrichtung
3	Student / Bachelorand	Lehramt Berufskolleg: Fachrichtungen Maschinenbau/Theologie
4	Wissenschaftliche Mitarbeiterin / Doktorandin	Automatisierungstechnik

Das Montagesetting, die Instruktionsphase und der Versuchsablauf waren analog zur ersten Phase aufgebaut. Durch die Beibehaltung der Strukturen war es möglich, die Ergebnisse direkt mit den Erfahrungen der ersten Gruppe von Probanden zu vergleichen. Dies erlaubte es, die Effektivität der in Phase 1 verbalisierten und eingefügten Chunks im Kontext der AR-Montageanleitung zu beurteilen.

Montage des RWD und ermittelte Chunks

In der zweiten Erprobungsphase wurde der RWD von den beiden Probanden 3 und 4 ebenfalls unter Verwendung unterschiedlicher Montageansichten montiert. Proband 3 wählte die AR-Ansicht, während Probandin 4 die 3D-Ansicht für den Montageprozess verwendete.

Bei der Durchführung der Montage traten bis auf eine Ausnahme keine Verständnisprobleme auf: Ein eingefügter Chunk in Montageschritt 2, welcher besagte,

den Dichtring mit der Nut nach unten auszurichten, erwies sich als zu technisch formuliert und war Probandin 4 nicht geläufig. Um sicherzustellen, dass der betreffende Chunk auch für Laien verständlich ist, wurde er entsprechend angepasst und verallgemeinert formuliert (vgl. Tabelle 5.7).

Tabelle 5.7: Angepasster Chunk der RDW-Montage

Arbeits-schritt	Tätigkeit	Durch die Probanden eingepflegte Chunks
2	Einölen des Dichtrings	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="735 663 1370 730">▪ <u>Stirnfläche (des Dichtrings) mit flacher Seite nach oben ausrichten</u> <li data-bbox="735 741 1370 831">▪ Einfetten der Kontaktflächen des Dichtrings mit der Halterung (optimal: innere und äußere Mantelfläche des Dichtrings)

Quelle: modifiziert nach Dreher & Reineking, 2024

Abgesehen von dieser Unklarheit gab es keine Verständnisprobleme bei der Montage. Jedoch hatten beide Probanden anfängliche Schwierigkeiten beim ersten Versuch, den Dichtring einzutreiben. Trotz der klaren Anweisung des Chunks „möglichst gleichmäßig und vorsichtig (rundum)“ aufzuschlagen, war der subjektive Einfluss auf die Kraft bei den Hammerschlägen stets variabel. Ein positives Ergebnis dieser Phase war, dass im Vergleich zur ersten Gruppe die Dichtringe nach einer leichten Verkantung „gerettet“ werden konnten. Die hier vorsichtigeren Hammerschläge führten dazu, dass keine schwerwiegenden Fehler gemacht wurden und die Montage letztendlich erfolgreich abgeschlossen wurde.

Evaluation und Autorentätigkeit

Für die Evaluationsgespräche wurden die Fragestellungen in der zweiten Phase analog zur vorherigen Phase gestellt. Dabei wurde erneut deutlich, dass die einzige erforderliche Hilfestellung die bereits erwähnte Verständnisfrage zur Ausrichtung des Dichtrings war.

Des Weiteren wurde von den Probanden rückgemeldet, dass die Textfelder mit den Arbeitsanweisungen durch die prägnante Darstellung der Chunks in den Hintergrund gerieten und nicht mehr so stark beachtet wurden.

Im Anschluss nutzten die beiden Probanden das Autorensystem, um den zu technisch formulierten Chunk anzupassen. Diese geringfügige Anpassung dauerte nur wenige Minuten und verlief, ähnlich wie in der ersten Gruppe, intuitiv und ohne Komplikationen. Hierbei zeigte sich, dass die Flexibilität des AR-Systems nicht nur in der Erstellung, sondern auch in der schnellen Anpassung der Chunks bestand.

5.3.7 Phase 2: Analyse (optimierte Montageanleitung)

Die Analyse der zweiten Erprobungsphase widmet sich der Beantwortung der Fragestellung: Wurden die Schwierigkeiten der ersten Probandengruppe durch die eingebrachten Chunks in der zweiten Gruppe überwunden? Die Antwort auf diese Frage ist zweigeteilt.

Einerseits hat die Implementierung von Chunks in die AR-Montageanleitung dazu geführt, dass fast vollständig auf Hilfestellungen durch Experten während der Montage verzichtet werden konnte. Dies ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass die eingebrachten Chunks zur Klärung von Verständnisfragen und zur Erleichterung des Montageprozesses beigetragen haben. Die Verwendung von textbasierten, prägnanten Anweisungen zeigte bei diesen punktuellen Versuchen Wirkung.

Andererseits wurden trotz dieser Verbesserungen weiterhin Schwierigkeiten beim Eintreiben des RWDs festgestellt, wenn auch nicht in dem Ausmaß wie in der ersten Probandengruppe. Die Analyse legt nahe, dass eine bloße Beschreibung des Eintreibverhaltens innerhalb der AR-Montageanleitung nur bedingt ausreicht, um einen reibungslosen Montageablauf zu gewährleisten. Das Gefühl für die erforderliche Kraft beim Anschlagen, das sich in der Praxis als kritisch erwiesen hat, konnte durch die Chunks nicht präzise genug auf die AR-Anleitung übertragen werden.

Was den Umgang mit dem AR-System betrifft, offenbarte das Evaluationsgespräch eine ähnliche Erkenntnis wie bei den ersten beiden Probanden – eine intuitive Nutzung des AR-Systems und weder eine Über- noch Unterforderung

bei der Montage. Auch an dieser Stelle wird die Zugänglichkeit und Praktikabilität des AR-Systems unterstrichen.

Aus den Gesprächen ging zudem hervor, dass auch Proband 3 die Möglichkeit nutzte, sich vor der Montagehandlung die einzelnen Schritte in der Montageanleitung anzusehen. Dies unterstreicht die Vermutung der ersten Phase, dass die Vorbereitung durch das Vorabstudium der Montageschritte zur Sicherheit und Effizienz der Montage beiträgt.

Des Weiteren ist in dieser Phase im Vergleich zu den ersten beiden Probanden kein RWD zerstört worden oder musste nach dem ersten Montageversuch entnommen werden. Dies deutet auf eine verbesserte Handhabung der Montageanleitung durch die zusätzlich eingeführten Chunks hin. Die Hilfestellungen, welche die Chunks bieten, haben somit offensichtlich dazu beigetragen, potenzielle Fehlerquellen zu minimieren.

Allerdings offenbarte sich auch ein Problem, das in Zukunft adressiert werden muss. Die ungünstige Darstellung und Positionierung der Arbeitsschritt-Textfelder, welche durch die prägnante Darstellung der Chunks weiter in den Hintergrund gerieten, konnte aufgrund softwareseitiger Beschränkungen nicht behoben werden. Dieses Problem wird jedoch in der Vorbereitung für den nächsten DBR-Zyklus gemeinsam mit dem Entwicklungspartner *Jigspace* angegangen, um die Benutzerfreundlichkeit und Klarheit der Montageanleitung weiter zu optimieren.

5.3.8 Zusammenfassung und Teilergebnisse des zweiten DBR-Zyklus

Der zweite DBR-Zyklus behandelte die Baugruppe RWD und gliederte sich in zwei aufeinanderfolgende Phasen. In beiden Phasen wurde die Montage des RWD mit Hilfe eines AR-Systems von jeweils zwei Probanden unabhängig voneinander durchgeführt. Ein zentrales Merkmal aller Probanden war ihre fehlende Erfahrung im Montieren von Dichtringen, was eine neutrale Basis für die Erprobung der AR-Montageanleitung schuf.

In der ersten Phase wurden alle hinreichenden Montageschritte im Autorensystem hinterlegt. Dabei wurden bewusst spezifische Hinweise, die für die Montage

nicht zwingend erforderlich waren, ausgelassen. Dies ermöglichte es, Problem- und Fehlersituationen hervorzurufen, aus denen die Probanden eigenständig implizites Arbeitsprozesswissen ableiten konnten. Ein begleitender Experte stand für Hilfestellungen während der Montage zur Verfügung und beurteilte das Montageergebnis im Anschluss. Nach der Montage wurden die ermittelten Chunks von den Probanden selbstständig in das AR-System eingebracht (vgl. Tabelle 5.5), wobei die Implementierung in Form von Texthinweisen erfolgte, während auf audiovisuelle Hilfsmittel verzichtet wurde.

In der zweiten Phase wurde die Probandengruppe mit derselben Montageaufgabe konfrontiert, jedoch mit der angepassten AR-Montageanleitung der ersten Gruppe. Hier wurde weitestgehend auf Hilfestellungen durch den Experten verzichtet, um die Effektivität der eingebrachten Chunks im AR-System zu prüfen. Die zentrale Frage dieser Phase war also, ob diese Anpassungen zur Bewältigung von Herausforderungen und einer fehlerfreieren Montage beitragen können.

Die Versuchsreihe offenbarte wichtige Erkenntnisse über die Möglichkeiten und Grenzen des Transfers von Arbeitsprozesswissen durch ein AR-System. Fast alle Schwierigkeiten, die im gestellten Montageauftrag entstanden waren, konnten durch die Implementierung von Chunks überwunden werden. Hierbei zeigte sich, dass vor allem Verständnishindernisse im Kontext der Montagehandlung effektiv überwunden werden können.

Allerdings offenbarten sich auch Grenzen der Technologie, insbesondere bei Hindernissen, die das subjektive Verständnis des Arbeitsauftrags betrafen. Subjektive Einflüsse, wie die Kraft beim Schlagen oder das Anzugsmoment des Schraubstocks, konnten vom AR-System nicht hinreichend vermittelt werden. Als Zwischenfazit wurde daher erkannt, dass die Effektivität von Arbeitsprozesswissen in einem AR-System stark von der Art der Arbeitsaufgabe und dem Kenntnisstand des Anwenders abhängig ist. Konkret wurden Aufgaben, bei denen Routine und Feingefühl zwingend notwendig sind, als eher ungeeignet identifiziert, während generische Aufgabentypen, wie beispielsweise der Zusammenbau einer einfachen Schraubverbindung (vgl. DBR-Zyklus 1), hervorragend für den

Einsatz eines AR-Systems geeignet sind. Dies gilt insbesondere für Novizen mit wenig Vorerfahrung oder für die Unterstützung bei der Erstmontage.

Ein weiteres zentrales Ergebnis der Versuchsreihe ist die äußerst positive Bewertung des AR-Systems durch alle Probanden. Die intuitive Bedienbarkeit des Systems stellte sicher, dass keine kognitiven Überforderungen auftraten. Auch die Übertragung von eigenem Wissen in das Autorensystem gelang schnell und ohne Komplikationen. Diese positive Resonanz unterstreicht die Benutzerfreundlichkeit des Autorensystems und bestätigt dessen Eignung für die vorgesehenen Anwendungen im Rahmen des Forschungsprojekts.

Schlussfolgerungen für die Gestaltung des folgenden DBR-Zyklus

Die Probanden im RWD-Montageszenario wurden zufällig zusammengestellt und hatten, abgesehen von ihrem größtenteils technischen Hintergrund, wenig vergleichbare Qualifikationen. Für den dritten DBR-Zyklus sollten nun Gruppenzusammensetzungen aus realen Unternehmenskontexten geschaffen werden, um eine bessere Vergleichbarkeit sicherzustellen.

Beim konkreten Arbeitsauftrag im zweiten Zyklus handelte es sich hauptsächlich um eine Handlungsaufgabe und der gestalterische Aspekt (Einbringung der Chunks) wurde separat behandelt. Für die Aufgabenstellung im kommenden Zyklus soll die gestalterische Komponente explizit berücksichtigt werden.

In Bezug auf die Aufgabenstellung wurde zudem erkannt, dass die Betrachtung der AR-Ansicht vor Beginn der Montage für eine bessere Übersicht und Immersion förderlich ist. Daher wird dieser Schritt in die Aufgabenstellung des dritten Zyklus integriert. Die Entscheidung, welche Ansicht für die Montage gewählt wird, bleibt jedoch weiterhin den Probanden überlassen.

Schließlich wurden Feedback und Anregungen der Probanden aus dem zweiten Zyklus zur Verbesserung des AR-Systems berücksichtigt. Dies beinhaltet eine verbesserte Darstellung der Textfelder für die Montageanweisungen und eine Markierung für den Bereich, in dem sich die 3D-Elemente der Montage befinden.

5.4 DBR-Zyklus 3: Doppelmembranzylinder (DMZ)

Der dritte DBR-Zyklus legt den Fokus auf die Montage eines Doppelmembranzylinders (DMZ). Es handelt sich beim DMZ um eine spezielle Baugruppe, die exklusiv vom Kooperationspartner für den Einsatz in den eigenen Maschinenanlagen produziert wird. In der Position als Weltmarktführer in einem Nischensegment, sieht sich das gewerblich-technische Unternehmen mit der Notwendigkeit konfrontiert, viele seiner Maschinenkomponenten in Eigenproduktion zu realisieren. Dazu zählt auch der DMZ, der infolge seiner speziellen Konstruktion vom Unternehmen selbst entworfen wurde und nicht extern bezogen werden kann.

Berücksichtigt man die geringen benötigten Stückzahlen – konkret werden lediglich vier DMZ in einer Anlage verbaut – so wird deutlich, dass eine maschinelle Massenproduktion für dieses Bauteil nicht wirtschaftlich ist. Daher wird der DMZ von Facharbeitern manuell montiert. Zukünftig ist zudem geplant, diese Montage auch in der unternehmenseigenen Ausbildungswerkstatt durchzuführen. An dieser Stelle wurde der potenzielle Nutzen eines AR-Systems zur Unterstützung erkannt, insbesondere bei der Erstmontage durch Auszubildende.

Die Auswahl dieser speziellen Montageaufgabe für den dritten DBR-Zyklus liegt darin begründet, dass sie nicht nur komplex ist bzw. einen hohen Schwierigkeitsgrad bei der Montage aufweist, sondern auch mehr Chancen zur Modellierung von Chunks zulässt und an zahlreichen Stellen auf das Arbeitsprozesswissen der Facharbeiter zurückgreift (vgl. Tabelle 5.1). Dieses Wissen ist entscheidend, um ein einwandfreies und langlebiges Montageergebnis zu gewährleisten. Aus diesem Grund ist das Hauptziel des dritten DBR-Zyklus, analog zum vorherigen Zyklus, darauf ausgerichtet, die Übertragung des impliziten Arbeitsprozesswissens der Probanden in Form von Chunks in das Autorensystem zu untersuchen. Die Übertragung der Chunks in das AR-System wurde auch hier durch die Teilnehmer selbstständig durchgeführt. Dabei ist von zusätzlichem Interesse, welche Auswirkungen diese Integration auf die berufliche Kompetenz der Anwender haben kann.

Es ist hervorzuheben, dass die AR-gestützte Montage des DMZ, im Gegensatz zu den in den Baugruppen der ersten beiden DBR-Zyklen, das Potenzial besitzt, dauerhaft sowohl in der Ausbildungs- als auch in der Fachwerkstatt implementiert

zu werden. Folglich kristallisiert sich ein weiteres Ziel dieses DBR-Zyklus heraus: Aufbauend auf den Vorarbeiten und Erkenntnissen aus den DBR-Zyklen 1 und 2, in denen das AR-System ausgewählt und dessen Funktionsfähigkeit in einer Werkstattumgebung verifiziert wurde, steht nun in diesem dritten DBR-Zyklus die Überprüfung der Funktionsfähigkeit in einem realen Produktionsumfeld im Vordergrund. Sollte diese Erprobung erfolgreich verlaufen, so bietet sich die Möglichkeit, das AR-System nachhaltig in den Arbeitsalltag der Ausbildungs- und Fachwerkstatt zu integrieren. Dadurch wird ein greifbarer und direkter Bezug zur betrieblichen Realität geschaffen.

Wie schon im zweiten Zyklus wird zu Beginn des dritten Zyklus der didaktische Rahmen für die Montageaufgabe basierend auf dem Prinzip der vollständigen Handlung festgelegt und in zwei Phasen evaluiert. In diesen Phasen erfolgt die Entwicklung der AR-Montageanleitung, die praktische Erprobung durch die Probanden sowie die anschließende Analyse der gewonnenen Ergebnisse.

Ein wesentlicher Unterschied dieses Zyklus gegenüber den vorherigen Zyklen liegt in der Beschaffenheit der Zielgruppe. In diesem Zyklus handelt es sich um eine Zielgruppe, die nicht nur während, sondern auch nach Abschluss der Untersuchung regelmäßig mit der Montageaufgabe konfrontiert wird. Diese Gruppe kann somit die Relevanz und den Nutzen des AR-Systems (mit der Möglichkeit eigene Chunks zu implementieren) authentischer und realitätsnäher beurteilen, insbesondere im Vergleich zum vorherigen DBR-Zyklus, welcher primär zu Forschungszwecken durchgeführt wurde. Um eine tiefgreifende Evaluation der beruflichen Kompetenz der Probanden durchzuführen, wurde in diesem Zyklus das COMET-Verfahren als Messinstrument gewählt.

Abschließend werden die in diesem gesammelten Erkenntnisse und Ergebnisse aus dem dritten DBR-Zyklus zusammengefasst.

5.4.1 Arbeitssetting und didaktischer Rahmen

Der didaktische Rahmen für das Montageszenario im dritten DBR-Zyklus orientiert sich am gleichen Prinzip wie im zweiten Zyklus. Das Arbeitssetting ist jedoch umfangreicher, da die gewählte Baugruppe deutlich komplexer und schwieriger

zu montieren ist. Der Montageauftrag ergibt sich aus der Wahl der bereits festgelegten DMZ-Baugruppe. Das für den Montageauftrag notwendige Arbeitsprozesswissen musste zunächst identifiziert werden, um eine praxistaugliche AR-Anleitung zu entwickeln.

Zur Erfassung dieses Wissens wurde eine betriebliche Praxisgemeinschaft gebildet, bestehend aus dem Forscher, einem Entwicklungsingenieur, einem Ausbilder und einem Facharbeiter. Wie bereits im zweiten Zyklus wurden verschiedene Methoden zur Erhebung von Arbeitsprozesswissen angewandt, darunter berufswissenschaftliche Arbeitsbeobachtungen, handlungsorientierte Fachinterviews, lautes Denken und ein EFW (vgl. Kapitel 4.3).

Die aus dieser kollaborativen Arbeit resultierende AR-Montageanleitung bot die Grundlage zur Erstellung einer Lernaufgabe, die sich am Prinzip der vollständigen Handlung orientierte. Die Phasen Informieren, Planen/Entscheiden, Durchführen, Kontrollieren und Reflektieren wurden analog zum vorherigen Zyklus gestaltet (vgl. Abbildung 5.14). Der resultierende Arbeitsauftrag wurde mündlich vorgetragen, um die Praxis in der realen Werkstatt widerzuspiegeln. Die Reflexion über den Arbeitsprozess sowie die Übertragung der ermittelten Chunks in das AR-Autorensystem waren Teil der Aufgabenstellung.

Die Versuchsreihe im Rahmen dieses DBR-Zyklus gliedert sich in zwei Phasen. Dabei führen zwei Probandengruppen, bestehend aus jeweils drei Probanden, die Montage des DMZ in der Ausbildungswerkstatt des Campus Buschhütten durch. Es ist anzumerken, dass alle Probanden aus dem gewerblich-technischen Bereich stammen und bisher keine Erfahrung in der Montage des DMZ gesammelt haben. Allerdings handelt es sich um zwei Gruppen mit unterschiedlichen Ausgangsvoraussetzungen, sodass aufgrund der größeren praktischen Erfahrung der ersten Gruppe nicht von einem Gleichstand der Kompetenzen ausgegangen werden kann.

5.4.2 Phase 1: Entwicklung des Montageszenarios DMZ

Im folgenden Abschnitt wird die Baugruppe DMZ sowie die Entwicklung des dritten Montageszenarios mit dem AR-Softwaretool JigSpace beschrieben.

Vorstellung der Baugruppe

Die Baugruppe DMZ wurde vom Kooperationspartner Achenbach Buschhütten zur Verfügung gestellt. Diese Baugruppe findet Verwendung in Schneidemaschinen und erfüllt eine unterstützende Funktion beim Anheben und Absenken von Walzen. Die für die AR-Montageanleitung relevanten Maße des DMZ betragen ungefähr 27cm x 11,5cm x 11,5cm (HxBxT). Der DMZ setzt sich aus insgesamt 42 zu montierenden Bauteilen zusammen. Hierbei handelt es sich um 13 Hauptbauteile und 29 weitere Elemente, zu denen Schrauben, Stifte und Dichtelemente zählen. Abbildung 5.20 veranschaulicht die fertig montierte Baugruppe.

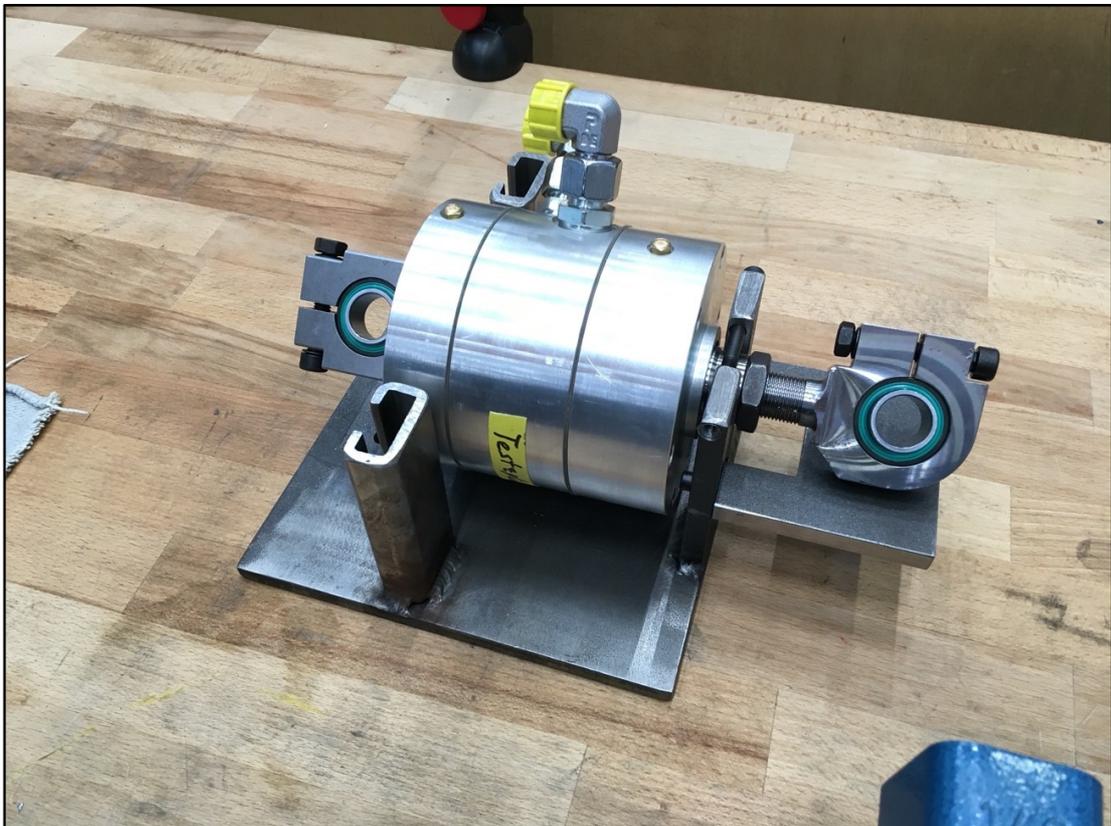


Abbildung 5.20: Baugruppe DMZ (montiert)

Foto: Alexander Reineking

Für den dritten DBR-Zyklus erweist sich der DMZ als besonders geeignet, da es für eine erfolgreiche Montage der beiden wichtigsten Aspekte aus den vorherigen DBR-Zyklen bedarf: zum einen eine klare und verständliche Montageanleitung und zum anderen implizites Arbeitsprozesswissen, um nach Aussage der

Facharbeiter und Experten ein professionelles und langlebiges Montageergebnis sicherzustellen.

In Bezug auf den Zeitaufwand wurde für die Montage des DMZ eine Zeitvorgabe von 60 Minuten angesetzt. Diese Zeitvorgabe basiert auf den Praxiserfahrungen eines Facharbeiters, der für die Erstmontage die doppelte Arbeitszeit im Vergleich zu seiner eigenen geschätzten Montagedauer von 30 Minuten veranschlagt.

Montageablauf

Der Montageablauf des DMZ wurde durch eine umfassende Arbeitsprozessanalyse im Vorfeld erarbeitet. Diese Analyse wurde in einer betrieblichen Praxisgemeinschaft durchgeführt, welche aus verschiedenen Akteuren bestand:

- Dem Forscher, der die Funktion des Mittlers und Kommunikators zwischen den Akteuren übernahm (siehe Kapitel 4.3.1)
- Einem erfahrenen Facharbeiter, welcher bereits umfangreiche Erfahrungen in der Montage des DMZ gesammelt hat
- Einem Entwicklungsingenieur, welcher die Konstruktion des DMZ verantwortete
- Einem Ausbilder, der ebenfalls mit der Montage vertraut ist und die Montageaufgabe als Teil des Ausbildungsprogramms in die Ausbildungswerkstatt integrieren möchte

Um den Montageablauf in seiner Gesamtheit zu erfassen und zu verstehen, wurden anfänglich Interviews und Gruppendiskussionen durchgeführt, um alle Akteure auf den gleichen Kenntnisstand zu bringen. Für die Erstellung einer ersten funktionsfähigen Masterlösung wurden zwei EFW durchgeführt. Dabei wurde der DMZ vom Facharbeiter unter Beobachtung aller Mitglieder der betrieblichen Praxisgemeinschaft montiert. Dies ermöglichte die Analyse der Vorgehensweise des Facharbeiters und erlaubte gleichzeitig die Möglichkeit von Anpassungen, welche beispielsweise durch den Entwicklungsingenieur vorgeschlagen wurden. Die Interviews, Diskussionen und Montageabläufe wurden mittels Audioaufnahmen, Fotografien und Videoaufnahmen dokumentiert.

Diese Datengrundlage ermöglichte die Konstruktion des ersten Prototyps einer AR-Montageanleitung, die insgesamt 45 Montageschritte enthält. Eine übersichtliche Gruppierung der Montageschritte ist in Tabelle 5.8 dargestellt³⁰.

Tabelle 5.8: Montageschritte der DMZ-Anleitung (gruppiert)

Arbeitsschritte in der AR-Montageanleitung	Montagesequenz
1-6	Montageinformationen, Stückliste und Werkzeugliste
7-14	Bauteilvorbereitung
15-18	Montage Gehäuse (vorne)
19-32	Montage Gehäuse (Mitte)
33-41	Montage Gehäuse (hinten)
42-45	Montage Anbauteile

Dieser erste Prototyp wurde in einem zweiten EFW von der betrieblichen Praxisgemeinschaft evaluiert. Hierbei führte der Forscher die Montage mit Hilfe der AR-Anleitung durch, während die anderen Mitglieder den Prozess beobachteten und die Praxistauglichkeit der Anleitung bewerteten. Während dieses Prozesses wurde der Montageablauf und die AR-Anleitung minimal mit Verbesserungsvorschlägen ergänzt, was zur Entstehung der ersten Masterlösung für die AR-Montageaufgabe führte. Die Einzelheiten dieser Konstruktion werden im Folgenden aufgeführt.

Darstellung der Masterlösung im AR-System

Die Umsetzung der entwickelten Masterlösung in die AR-Anwendung erfolgte mit Hilfe der von Achenbach Buschhütten bereitgestellten CAD-Daten des DMZ. Neben den primären Daten des DMZ waren zusätzliche Konstruktionsdaten erforderlich. Diese schließen das für den Montageprozess notwendige Werkzeug und eine für diesen Versuch im TVD-Labor angefertigte DMZ-Halterung ein (siehe Anhang A6). Die Halterung kann, neben der unterstützenden Funktion bei der

³⁰ Da die Anleitung sehr umfangreich ist und um das geistige Eigentum des Kooperationspartners zu schützen, werden die Montageschritte gruppiert aufgeführt und nicht einzeln im Detail dargelegt. Auf die Darstellung von für diese Studie nicht relevanten Montageschritten wurde verzichtet.

Montage der Anbauteile, auch für die sachgerechte Lagerung des montierten DMZ genutzt werden.

Nach einem Softwareupdate für JigSpace konnte nun auf den Verbesserungsvorschlag des zweiten DBR-Zyklus reagiert werden: Die übersichtlichere Darstellung von Textanweisung für jeden Montageschritt. Diese wurden nun als separate Textfelder direkt über den in der Montage relevanten 3D-Elementen positioniert (vgl. Abbildung 5.21). Des Weiteren wurde die AR-Anwendung um einen Einleitungsschritt ergänzt, der den Nutzern präzise zeigt, auf welcher Arbeitsfläche die Projektion vorgenommen werden sollte. An dieser Stelle soll deutlich gemacht werden, dass sich außerhalb der markierten Fläche keine 3D-Elemente mehr befinden. Dieser erste Schritt, der zur Projektion der 3D-Elemente dient, wird in Abbildung 5.21 dargestellt. Zur besseren Orientierung werden den Nutzern zudem vor Beginn der Montage relevante Montageinformationen sowie eine Stück- und Werkzeugliste angezeigt.

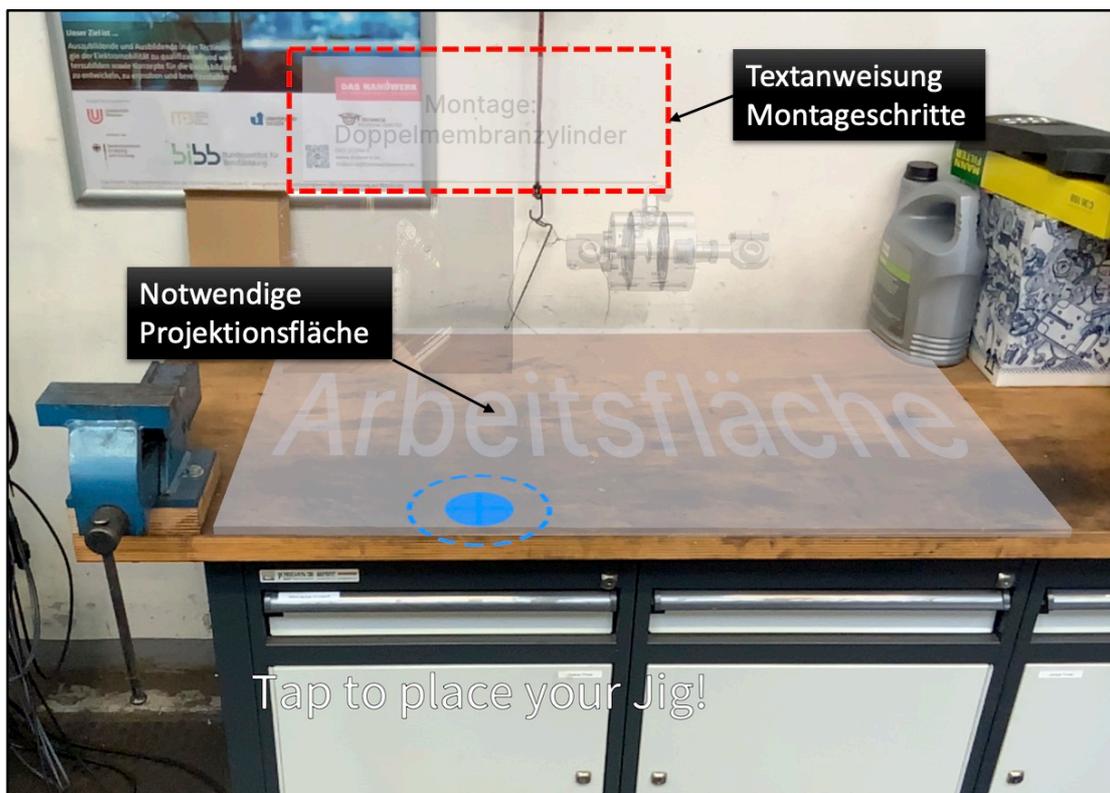


Abbildung 5.21: Einleitungsschritt zur Platzierung der 3D-Elemente (beschriftet)

Foto: Alexander Reineking (beschriftet)

Montagehinweise und Handlungsroutinen, die während der EFWs identifiziert wurden, wurden bereits als Chunks in die AR-Montageanleitung integriert. Aufgrund der Komplexität der Baugruppe war es von zentraler Bedeutung zu ermitteln, welche zusätzlichen Montagehinweise oder Chunks noch benötigt wurden, um eine reibungslose Montage des DMZ für ungeschulte Nutzer zu ermöglichen. Dieser Aspekt wurde in der ersten Phase der Versuchsreihe mit der ersten Probandengruppe getestet.

5.4.3 Phase 1: Erprobung des dritten Montageszenarios

Die Erprobung des Montageszenarios mit dem AR-System im dritten DBR-Zyklus wurde in einem für diese Aufgabe vorbereiteten Umfeld durchgeführt. Ziel war es, eine möglichst praxisnahe und reproduzierbare Umgebung für die Versuchsreihe zu gewährleisten.

Anwendungssetting

Die Montage wurde in der Ausbildungswerkstatt des Campus Buschhütten an einer für den Arbeitsauftrag vollausgestatteten Werkbank durchgeführt. Hinter dem Montagearbeitsplatz wurde ein großer Bildschirm aufgestellt, der das Livebild des Tablets darstellte. Dies ermöglichte es der beobachtenden Praxisgemeinschaft, die Montage aus sicherem Abstand zu verfolgen und gleichzeitig die AR-Montageanleitung zu betrachten. Abbildung 5.22 veranschaulicht den Montagearbeitsplatz.



Abbildung 5.22: Montagearbeitsplatz DMZ

Foto: Alexander Reineking

Für den ersten Durchlauf der Erprobung wurde eine Probandengruppe bestehend aus *erfahrenen Praktikern*³¹ mit hoher handwerklicher Expertise ausgewählt. Diese bestand aus einem Ausbilder und zwei Auszubildenden, die in Zukunft potenziell mit der Aufgabe betraut werden, den DMZ unter Aufsicht des Ausbilders zu montieren. Die beruflichen Hintergründe und Qualifikationen der drei Probanden sind in Tabelle 5.9 aufgeführt.

Tabelle 5.9: Probanden DMZ-Montage Phase 1

Proband Nr.	Beruf	Fachrichtung
1	Auszubildender, 3. Lehrjahr	Industriemechaniker
2	Auszubildender, 3. Lehrjahr	Industriemechaniker
3	Ausbilder	Werkzeugmechaniker

³¹ Diese Einstufung basiert auf den praktischen Erfahrungen in Montagearbeiten, die den Probanden im Rahmen der betrieblichen Ausbildung zum Industriemechaniker im Unternehmen vermittelt werden.

Vor Beginn der Montage wurden die Probanden über Sicherheitsaspekte in der Werkstatt informiert. Zudem erfolgte eine Instruktion in die Bedienung und den Umgang mit der AR-Software JigSpace. Anschließend wurde der Arbeitsauftrag mündlich vermittelt. In transkribierter Form lautet dieser wie folgt:

„Ihre Aufgabe besteht darin, die AR-Montage zu optimieren. Dazu soll der Doppelmembranzylinder mit Hilfe des Tablets montiert werden. Zunächst erhalten Sie eine Instruktion zur Anwendung der Software. Dabei liegt der Fokus zunächst auf dem grundlegenden Gebrauch der App, um sicherzustellen, dass keine Schwierigkeiten bei der Bedienung auftreten. Anschließend sollen Sie die Montageanleitung mit Hilfe der AR-Funktion betrachten, um sicherzustellen, dass Sie den Montageablauf verstanden haben und keine grundlegenden Fragen offen bleiben. Danach können Sie wählen, ob Sie im AR- oder im 3D-Modus weiterarbeiten möchten. Anschließend führen Sie die eigentliche Montage durch. Falls Schwierigkeiten auftreten, steht es Ihnen frei, die Experten (Ausbilder, Facharbeiter, Ingenieur) um Hilfe zu bitten. Sollten die Experten Fehler bei der Montage feststellen, werden sie Sie darauf hinweisen. Nach Abschluss der Montage wird das Ergebnis von den Experten überprüft, und gegebenenfalls sollen Anpassungen in der AR-Anleitung vorgenommen werden. Diese Anpassungen können von Ihnen individuell und nach eigener Wahl im Autorensystem gestaltet werden. Während der Montage sollten Sie Notizen über gemachte Fehler und mögliche Verbesserungen machen.“

Im Vergleich zum zweiten DBR-Zyklus wurde die Aufgabenstellung deutlich konkretisiert. Insbesondere wurde der Gestaltungsaspekt von Beginn an in die Aufgabenstellung integriert und es wurde eine ausdrückliche Betrachtung des Montageablaufs in der AR-Ansicht vor Montagebeginn gefordert, um eine umfassende Orientierung und eine immersive Erfahrung im Montagesetting zu gewährleisten. Abbildung 5.23 zeigt einen Probanden bei der Betrachtung der Montage in der AR-Ansicht.

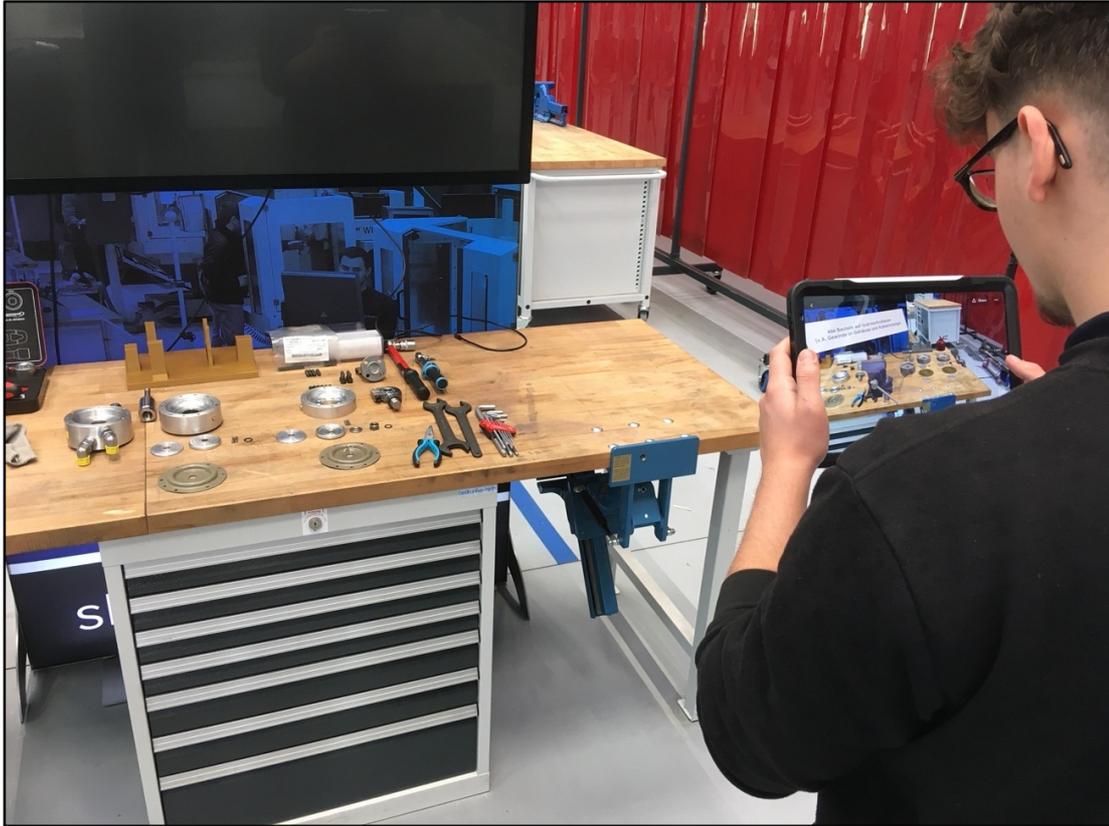


Abbildung 5.23: Betrachtung des Montageszenarios in der AR-Ansicht

Foto: Alexander Reineking

Die Montageaktivitäten der Probanden fanden nacheinander statt. Dabei wurde darauf geachtet, dass durch räumliche Trennung eine unabhängige Durchführung gewährleistet wurde. Die anwesenden Experten dienten während der Montage als Ansprechpartner bei Fragen oder Unklarheiten. Hierbei wurde darauf geachtet, die Unabhängigkeit der Probanden nicht unnötig zu beeinträchtigen.

Montage des DMZ und ermittelte Chunks

Gemäß dem Arbeitsauftrag wurde die Montageanleitung zuerst in der AR-Darstellung auf die Werkbank projiziert, um vor Montagebeginn einen ganzheitlichen Überblick über die Montage zu erhalten. Anschließend wählten die drei Probanden die 3D-Ansicht für die Durchführung der Montage. Während der Montage hatten die Probanden die Möglichkeit, sowohl das Tablet als auch den großen Bildschirm zur Anleitungsbetrachtung zu verwenden. Dabei diente das Tablet meist als Navigationsinstrument, während der Bildschirm vorwiegend zur detaillierten Ansicht während der Montage verwendet wurde. Einen Eindruck für die

Montage vermittelt Abbildung 5.24, die einen Probanden während der Bearbeitung des Arbeitsauftrages zeigt.

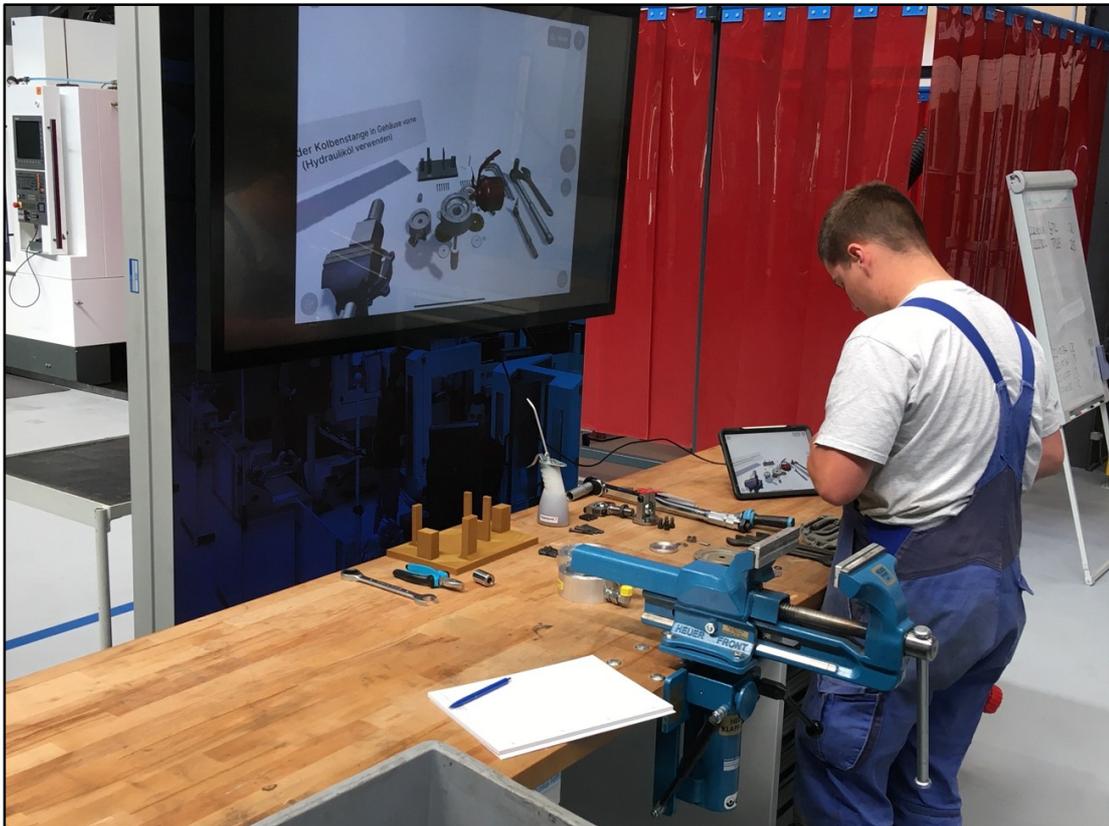


Abbildung 5.24: Proband während der Montage des DMZ

Foto: Alexander Reineking

Obwohl die Montageanleitung viele Hinweise und genaue Montageangaben enthielt, traten während der Montage Unstimmigkeiten auf, die bei der Entwicklung der Anleitung nicht berücksichtigt worden waren. Einige dieser Herausforderungen, die während der Montage identifiziert wurden, betrafen die Beachtung der Ausrichtung verschiedener Kleinteile, das zerstörungsfreie Einspannen des Wellengehäuses sowie die Positionierung der Membrane bei ihrer Befestigung. Dieses implizite Arbeitsprozesswissen, das während der Montageerfahrung gewonnen wurde, wurde von den Probanden in das AR-System eingepflegt. Insgesamt wurden hierdurch 7 neue Chunks generiert.

Die ermittelten Chunks der Probanden für die jeweiligen Arbeitsschritte sind in Tabelle 5.10 festgehalten. Es ist zu beachten, dass einige Chunks mehrfach aufgeführt sind, da sie in mehreren Montageschritten integriert wurden.

Tabelle 5.10: Ermittelte Chunks der ersten Probandengruppe (DMZ)

Montagesequenz	Arbeitsschritt	Durch die Probanden eingepflegte Chunks	Art des Chunks
Montage Gehäuse (vorne)	17	▪ Gehäuse mittig einspannen	Text
		▪ Die Sicken der Stützscheiben zeigen zur Membrane	Text
	18	▪ Kolbenstange axial auf Leichtigkeit prüfen	Text + Symbol
Montage Gehäuse (Mitte)	23	▪ Gehäuse mittig einspannen	Text
	24	▪ Hexagonal überkreuz verschrauben	Abbildung
	26	▪ Die Sicken der Stützscheiben zeigen zur Membrane	Text
	27	▪ Beschriftung der Mutter muss außen liegen	Text
	28	▪ Handfest anziehen	Text
	29	▪ Membrane eine Bohrweite gegen den Uhrzeigersinn ausrichten	Text + Symbol
Montage Gehäuse (hinten)	35	▪ Gehäuse mittig einspannen	Text
	37	▪ Hexagonal überkreuz verschrauben	Abbildung

Nach Abschluss der Montage und der anschließenden Bewertung des montierten DMZ durch die betriebliche Praxisgemeinschaft wurde, neben einer mündlichen Evaluation analog zum zweiten DBR-Zyklus, auch eine schriftliche Evaluation durchgeführt. Hier wurden nicht nur technische Aspekte, sondern auch die Interaktion mit dem AR-System und die subjektive Wahrnehmung der Probanden angesprochen. Diese Aspekte werden nachfolgend genauer betrachtet.

Zwischenevaluation und Autorentätigkeit

Als Leitfaden für die Evaluationsgespräche wurden die Fragen des zweiten DBR-Zyklus herangezogen (vgl. Kapitel 5.3.4). Diese Interviews wurden dazu genutzt,

die in Tabelle 5.10 offengelegten Chunks zu verbalisieren, damit die Probanden diese mit Hilfe des Autorensystems in die AR-Anwendung überführen konnten.

Nach Abschluss dieser Autorentätigkeit wurden die Probanden dazu angehalten, einen Evaluationsbogen auszufüllen, der sich auf folgende Themenschwerpunkte konzentrierte:

- Benutzerfreundlichkeit des AR-Systems
- Qualität der AR-Anleitung
- Lernprozess und Effektivität
- Anpassung (Modifikation) der AR-Anleitung
- Einfluss des AR-Systems auf den Nutzer
- Zukünftige Nutzung des AR-Systems

Die so gesammelten Daten und Erkenntnisse aus dieser ersten Erprobungsphase werden im folgenden Unterkapitel analysiert.

5.4.4 Phase 1: Analyse des dritten Montageszenarios

Die grundlegenden Ziele der ersten Phase unterscheiden sich nicht wesentlich von denen des zweiten DBR-Zyklus. Im Fokus stand die selbstständige Übertragung des neu erschlossenen Arbeitsprozesswissens (in Form von Chunks) in ein AR-Autorensystem. Dafür wurde eine neue AR-gestützte Baugruppenmontage konzipiert, welche erprobt werden sollte.

Ein zentrales Unterscheidungsmerkmal zum zweiten DBR-Zyklus bestand darin, dass bereits sämtliche in der vorausgehenden Arbeitsprozessanalyse identifizierten Chunks in die Montageanleitung integriert worden waren. Die zu montierende Baugruppe erwies sich als so komplex, dass es trotz der bislang von den Experten formulierten Chunks nicht sicher war, ob die Montageanleitung für die Unterstützung bei einer Erstmontage reibungslos umsetzbar ist.

Es galt nun zu ermitteln, ob und welche zusätzlichen Informationen oder Wissensbausteine aus der Perspektive einer Zielgruppe, die mit dem spezifischen Montageauftrag nicht vertraut war, noch erforderlich waren. Der Fokus in dieser Phase lag somit auf der Erkennung potenzieller Lücken oder Unklarheiten in der

AR-Anleitung, die durch die Perspektive dieser Zielgruppe aufgedeckt werden könnten.

Die Erprobung des Montageauftrags ergab, dass an einigen Stellen noch Unklarheiten bei den Probanden auftraten, aus denen weitere Chunks entstanden (vgl. Tabelle 5.10). Diese neuen Chunks wurden in Form von Textfeldern, Symbolen und einer Abbildung im AR-Autorensystem ergänzt.

Ein Chunk (Tabelle 5.10, Arbeitsschritt 24), welcher in Form einer Abbildung hinzugefügt wurde, entstand auf Empfehlung eines Probanden, um Auszubildende in den unteren Lehrjahren mit geringeren Werkzeugkenntnissen bei der Montage zu unterstützen. Des Weiteren hatten fünf der neu identifizierten Chunks (Tabelle 5.10, Arbeitsschritte 17, 18, 27, 28) das Ziel, kleinere Fehler zu vermeiden, die aus Unachtsamkeit während des Montageprozesses auftreten könnten. Es handelte sich dabei um Fehler, die zwar im Betrieb nicht sofort auffallen, aber mittel- bis langfristig die Lebensdauer der Baugruppe beeinträchtigen können. Ein weiterer Chunk (Tabelle 5.10, Arbeitsschritt 29) bezieht sich auf die korrekte Positionierung der Membrane. Dieser basiert auf einem Erfahrungswert, der während der Montage erkannt wurde und bietet einen hilfreichen Ausgangspunkt für jeden Monteur, der die AR-Montageanleitung in Zukunft verwenden wird.

Die Probanden bestätigten in den Evaluationsgesprächen erneut, dass die Nutzung des AR-Systems intuitiv war und die Übertragung der Chunks in das Autorensystem keine Schwierigkeiten darstellte. Diese Wahrnehmung wurde nicht nur von den Probanden selbst geäußert, sondern wurde auch durch die Beobachtungen der Experten bestätigt. Diese Übereinstimmung zeigte sich ebenso in den Evaluationsbögen, deren detaillierte Auswertung im Anhang A7 zu finden ist. Eine tiefergehende Untersuchung dieser Evaluationsbögen wurde in der Analyse der zweiten Phase durchgeführt, in welcher die zweite Probandengruppe die angepasste AR-Montageanleitung verwendet.

5.4.5 Phase 2: Entwicklung (optimierte Montageanleitung)

In Anlehnung an den zweiten DBR-Zyklus bildete die Arbeit der ersten Probandengruppe die Grundlage für die zweite Entwicklungsphase. Die zuvor in Tabelle

5.10 identifizierten Chunks in bildlicher, ikonischer und textbasierter Darstellung wurden einer redaktionellen Begutachtung durch den Forscher unterzogen. Hierbei wurden insbesondere eine korrekte Rechtschreibung sowie die richtige Positionierung der Chunks im AR-System überprüft. Abseits dieser redaktionellen Prüfung waren keine weiteren Anpassungen erforderlich.

Das Hauptziel dieser Phase war es zu ermitteln, ob die Montageanleitung durch die neu hinzugefügten Chunks soweit optimiert wurde, dass sie selbstständig und ohne zusätzliche Hilfen verständlich war. Falls trotz dieser Optimierung weitere Hilfestellungen oder Schwierigkeiten identifiziert würden, sollten auch diese Erkenntnisse in das Autorensystem übertragen werden.

Dafür wurde eine zweite Probandengruppe ausgewählt, deren Qualifikationsgrad unter dem der ersten Gruppe lag. Dies erhöhte die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten potenzieller Schwierigkeiten oder Unklarheiten bei der Benutzung der Montageanleitung.

5.4.6 Phase 2: Erprobung (optimierte Montageanleitung)

In der zweiten Phase erfolgte die AR-gestützte Montage erneut durch drei ausgewählte Probanden. Die Auswahl der Probanden war bewusst so getroffen, dass ihre technische Qualifikation niedriger war als die der Probanden der ersten Phase. Ziel dieses Ansatzes war es zu beobachten, inwieweit die als *fortgeschrittene Anfänger*³² eingestuften Probanden in der Lage sind, die Montageanleitung zu nutzen und ob sie trotz ihres unterschiedlichen beruflichen Hintergrunds mit der optimierten Montageanleitung ähnliche Ergebnisse erzielen können wie die erste Probandengruppe. Ein Überblick der Teilnehmerprofile ist in Tabelle 5.11 dargestellt. Diese Tabelle verdeutlicht die unterschiedlichen beruflichen Hintergründe und Qualifikationen der teilnehmenden Probanden und bietet so eine Grundlage für den Vergleich der Montageergebnisse.

³² Diese Einstufung basiert ebenfalls auf den praktischen Erfahrungen in Montagearbeiten, die den Probanden im Rahmen der betrieblichen Ausbildung vermittelt werden. Im Betrieb des Kooperationspartners durchlaufen auch die technischen Produktdesigner eine Praxisphase in der Werkstatt, welche jedoch nicht so umfangreich wie die eines Industriemechanikers ist.

Tabelle 5.11: Probanden DMZ-Montage Phase 2

Proband Nr.	Beruf	Fachrichtung
4	Auszubildende, 3. Lehrjahr	Technische Produktdesignerin
5	Auszubildender, 2. Lehrjahr	Industriemechaniker
6	Auszubildender, 3. Lehrjahr	Technischer Produktdesigner

Das Setting für die Montage sowie der allgemeine Versuchsablauf blieben gegenüber der ersten Phase unverändert. Durch die Beibehaltung dieser Strukturen konnte eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen beiden Probandengruppen sichergestellt werden. Zudem erlaubte dieses Vorgehen eine klare Bewertung der Effektivität der in der ersten Phase identifizierten und in die AR-Montageanleitung integrierten Chunks.

Der kommunizierte Arbeitsauftrag an die Probanden der zweiten Gruppe blieb ebenfalls unverändert (vgl. Kapitel 5.4.3).

Montage des DMZ und ermittelte Chunks

In Bezug auf die verwendete Darstellungsform der digitalen Inhalte gab es verglichen mit der ersten Probandengruppe keine Unterschiede. Zunächst wurde die AR-Ansicht zur Begutachtung des Montageprozesses verwendet, jedoch zogen alle Probanden für die eigentliche Montageaktivität die 3D-Ansicht vor.

Trotz der Optimierungen der ersten Probandengruppe traten bei dieser zweiten Gruppe immer noch Schwierigkeiten an bestimmten Stellen auf. Diese Schwierigkeiten können hauptsächlich auf die geringere Expertise der Probanden (verglichen mit der ersten Gruppe) im Umgang mit dem vorgegebenen Arbeitssetting zurückgeführt werden. Dabei ist wichtig zu betonen, dass diese Hindernisse nicht so schwerwiegend waren, dass die Montage hätte scheitern können. Stattdessen handelte es sich um Punkte, bei denen durch geeignete Handlungsanweisungen Optimierungsmöglichkeiten für die Montageanleitung erkannt wurden.

Während der Montage konnten insgesamt fünf weitere Chunks identifiziert werden. Zusätzlich wurden zwei Chunks der vorherigen Probandengruppe angepasst, da einige technische Formulierungen für diese Gruppe nicht geläufig

waren. Eine Übersicht aller in dieser Phase identifizierten und modifizierten Chunks ist in Tabelle 5.12 aufgelistet³³.

Tabelle 5.12: Ermittelte und angepasste Chunks der zweiten Probandengruppe (DMZ)

Montagesequenz	Arbeitsschritt	Durch die Probanden eingepflegte Chunks	Art des Chunks
Montage Gehäuse (vorne)	15	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einführen der Kolbenstange 	Animation + Symbol
	18	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Stifte nur locker einsetzen 	Text
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kolbenstange axial auf Leichtigkeit prüfen 	Symbol
Montage Gehäuse (Mitte)	23	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Membrane nicht in den Schraubstock klemmen 	Text + Symbol
	26	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kolbenstange an den abgeflachten Flächen einspannen 	Text
	28	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Von Hand</u> anziehen 	Text
	29	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Membrane einen <u>Bohrdurchmesser</u> gegen den Uhrzeigersinn ausrichten 	Text
Montage Gehäuse (hinten)	35	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Membrane nicht in den Schraubstock klemmen 	Text + Symbol

Die konkrete Verbalisierung dieser Chunks fand, nach erfolgreicher Montage, in den anschließenden Evaluationsgesprächen statt, was nachfolgend genauer erläutert wird.

Evaluation und Autorentätigkeit

In den Evaluationsgesprächen der zweiten Probandengruppe wurden dieselben Fragen gestellt wie in der ersten Phase. Durch diese Gespräche gelang es, die während der Montage identifizierten Chunks zu verbalisieren und genauer zu charakterisieren.

Probandin 4 identifizierte einen Chunk, der auf grundlegende Verständnisschwierigkeiten während der Montage hinwies. Konkret ging es darum, wie die Kolbenstange des DMZ im Schraubstock eingespannt werden sollte. An dieser Stelle

³³ Eine bildliche Darstellung aller im dritten DBR-Zyklus gefundenen Chunks ist in Anhang A8 hinterlegt.

wurde ein Chunk in Form eines Textfelds in der Montageanleitung eingefügt, der auf die abgeflachten Flächen der Kolbenstange hinwies, welche für das korrekte Einsetzen relevant sind.

Weiterhin ergaben die Gespräche, dass zwei Chunks aus der vorherigen Phase in ihrer Formulierung technische Unklarheiten aufwiesen. In Arbeitsschritt 28 wurde die Formulierung „handfest anziehen“ zu „von Hand anziehen“ korrigiert. Dies geschah, da es in Facharbeiterkreisen unterschiedliche Auffassungen des Begriffs „handfest“ gibt. Ein weiterer angepasster Chunk ist der in Arbeitsschritt 29 verwendete Begriff „Bohrweite“, der für ein besseres Verständnis vereinfacht formuliert wurde.

Proband 5 identifizierte drei Chunks: Einer betraf das korrekte Einsetzen von Zylinderstiften in Schritt 18, während die zwei anderen Chunks durch Pfeilsymbole auf bestimmte Montagedetails in den Schritten 18 und 23/35 hinwiesen.

Von Proband 6 kam der Vorschlag, die Montage in Schritt 15 zu optimieren. Dies äußerte sich in einer veränderten Einbaurichtung der Kolbenstange. Als Konsequenz wurde die Montageanimation entsprechend angepasst und die neue Richtung mit Hilfe eines roten Pfeilsymbols verdeutlicht.

Die gefundenen und überarbeiteten Chunks wurden von den Probanden selbstständig in das Autorensystem übertragen. Zum Abschluss der Phase füllten alle Probanden den Evaluationsbogen (vgl. Anhang A1) aus. Die kumulative Auswertung dieser Bögen und weiterführende Analysen werden im nachfolgenden Unterkapitel vorgestellt.

5.4.7 Phase 2: Analyse (optimierte Montageanleitung)

Die Nutzung der optimierten Montageanleitung zeigte einen erwarteten Effekt in der zweiten Probandengruppe: Die kritischen Stellen, an denen bei der ersten Probandengruppe Hindernisse auftraten, konnten durch die implementierten Chunks vermieden werden. Dies zeigt erneut die Effektivität und den Mehrwert des AR-Systems im Montageprozess.

Dennoch traten bei der zweiten Probandengruppe vereinzelt Unstimmigkeiten auf, aus denen weitere Chunks generiert wurden (vgl. Tabelle 5.12). Dies

bedeutet jedoch auch, dass die Probanden in einigen Fällen auf die Hilfestellungen der Experten angewiesen waren. Es ist jedoch zu betonen, dass diese Hilfestellungen nicht so bedeutend waren, dass die Montage hätte scheitern können. Vielmehr handelte es sich um Anweisungen, welche die Qualität der Montage weiter optimierten, um die Zuverlässigkeit und Langlebigkeit der montierten Baugruppe zu gewährleisten. Beispielsweise wirken diese kleinen Anpassungen, laut Aussage des Kooperationspartners, einem vorzeitigen Verschleiß entgegen. Dies verhindert frühzeitige Maschinenstillstände und reduziert Wartungs- oder Reparaturkosten.

Im Gegensatz zur Montage des RWD im zweiten DBR-Zyklus spielten motorische Fähigkeiten bei der Montage des DMZ keine entscheidende Rolle. Daher traten in diesem Szenario keine motorischen Hindernisse auf, aus denen weitere Chunks hätten entstehen können.

Hinsichtlich der Übersichtlichkeit der Textanweisungsfelder gab es in diesem Montageszenario keine kritischen Rückmeldungen. Dies ist ein deutliches Indiz dafür, dass die überarbeitete Positionierung der Textanweisungsfelder im Hintergrund des Montagegeschehens sowohl praktisch als auch benutzerfreundlich war.

Die Evaluationsgespräche der beiden Probandengruppen zeichneten ein ähnliches Bild wie in den vorherigen DBR-Zyklen: Die Nutzung des AR-Systems verlief intuitiv und auch die Autorentätigkeit im Anschluss an die Montage stellte kein Hindernis dar. Dieser Eindruck wurde durch die Auswertung der Evaluationsbögen untermauert.

Das wesentliche Ziel des Evaluationsbogens war es, ein detailliertes Bild der Meinungen der Probanden zum Montageszenario und dem Autorenprozess zu erfassen. Dies war für die Zielgruppe des dritten DBR-Zyklus von besonderem Interesse, da genau diese Gruppe in ihrem Arbeitsalltag durch das AR-System unterstützt und potenziell bereichert werden könnte.

Da keiner der teilnehmenden Probanden zuvor mit dem Tablet-basierten AR-System gearbeitet hatte und auch die Montage des DMZ für alle eine Neuerung darstellte, wurde der Mittelwert (Median) aller Umfrageergebnisse ermittelt.

Hierbei repräsentiert jede Frage eine separate Ordinalskala. Die Ergebnisse sind in Anhang A7 ausführlich dargestellt und werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

Ergebnisübersicht der Evaluationsbögen

Zusammenfassend wird die Benutzerfreundlichkeit als positiv bewertet und auch der Umfang an dargestellten Informationen in der AR-Anleitung wurde als angemessen eingestuft. Die Qualität der AR-Anleitung wurde ebenfalls durchweg positiv bewertet.

In Bezug auf den Arbeitsauftrag gaben die Probanden an, dass sie während der Montage größtenteils auf die AR-Anleitung angewiesen waren. Trotzdem sahen sich die Probanden nach eigener Einschätzung in der Lage, eine erneute Montage ohne externe Hilfe durchzuführen. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass diese Einschätzungen stark vom jeweiligen Arbeitsauftrag und dem subjektiven Schwierigkeitsempfinden der Probanden abhängig sind.

In Bezug auf das Autorensystem wurde dessen Anpassbarkeit als unkompliziert und intuitiv beschrieben. Die Möglichkeit, eigenständige Anpassungen vorzunehmen, wurde als vorteilhaft angesehen.

Die Antworten der Probanden bezüglich des Einflusses des AR-Systems auf den Nutzer stimmten mit den während der Studie gemachten Beobachtungen überein. Die Probanden gaben an, dass das Arbeiten mit dem AR-System eher motivierend wirkt und ihre Selbstständigkeit während der Montage verbessert hat. Zudem wurde rückgemeldet, dass das System als weder ablenkend noch überfordernd empfunden wurde. Die Frage, ob das AR-System als hilfreiche Ergänzung zur traditionellen Ausbildung betrachtet wird, wurde als eher neutral beantwortet. Dennoch betrachten die Probanden die Implementierung der AR-Technologie in Montage- und andere Aufgabenbereiche als mögliche Option, halten diese aber für weder wahrscheinlich noch unwahrscheinlich.

Die Auswertung der Evaluationsbögen ist aufgrund der begrenzten Teilnehmerzahl und der nur teilweise heterogenen Probandengruppen nur eingeschränkt repräsentativ, vermittelt aber dennoch einen guten Eindruck von der aktuellen Haltung gegenüber der eingesetzten Technologie in dem untersuchten Betrieb.

Zusammenfassend zeichnet sich ein positives Bild bezüglich der Akzeptanz der AR-Montageanleitung ab, was den Weg für ihren Einsatz in zukünftige betriebliche Aufgaben bereitet. Von besonderer Relevanz für diese Untersuchung ist jedoch, dass die Überführung von Arbeitsprozesswissen in Form von Chunks in das Autorensystem bei allen Probanden problemlos erfolgte.

Abschließend wurde im Rahmen des dritten DBR-Zyklus auch die Kompetenz der Probanden, bei der Bearbeitung des Arbeitsauftrags, mit Hilfe des COMET-Verfahrens bewertet. Die Anwendung und Ergebnisse dieses Verfahrens werden im nächsten Unterkapitel behandelt.

5.4.8 Kompetenzmessung mit COMET

Das Ziel der Kompetenzmessung in der dritten DBR-Phase besteht darin, einen Vergleich zwischen den beiden Probandengruppen hinsichtlich ihrer Fähigkeit die AR-Montage zu optimieren durchzuführen. Dabei wird insbesondere die Qualität des eingebrachten Arbeitsprozesswissens (Chunks) berücksichtigt.

Von entscheidender Bedeutung ist hier vor allem die Reihenfolge der jeweils homogenen Probandengruppen: Die erste Gruppe verfügt über das Niveau *erfahrener Praktiker*, während sich die zweite Gruppe auf dem Niveau *fortgeschrittener Anfänger* befindet.

In diesem Zusammenhang wird untersucht, ob potenzielle Wissenslücken der zweiten Gruppe durch die implementierten Chunks der ersten Gruppe so weit kompensiert werden konnten, dass sich bei beiden Gruppen ein ähnliches Kompetenzniveau einstellt. Hierbei findet das COMET-Kompetenzmessmodell Anwendung, das die berufliche Handlungskompetenz misst (vgl. Kapitel 4.4.3).

Die Anwendung des COMET-Verfahrens erfordert eine ganzheitliche Arbeitshandlung mit Raum für die individuelle Gestaltung durch den Probanden. Diese Voraussetzungen sind im Rahmen des dritten DBR-Zyklus erfüllt. Der Arbeitsauftrag für diesen Zyklus orientiert sich an den Leitlinien für COMET-Testaufgaben (vgl. Kapitel 4.4.3, Tabelle 4.6), wobei die Lesekompetenz aufgrund der mündlichen Aufgabenstellung nicht relevant war.

Der Montageauftrag spiegelt gleichzeitig eine Aufgabe aus dem realen Facharbeiteralltag wider, und ist dementsprechend auf den realen Einsatz übertragbar. Diese Umstände schaffen die grundlegenden Voraussetzungen für den Einsatz der COMET-Kompetenzmessmethode: Die Arbeitssituation ist authentisch und findet in einem realen Setting statt.

Die Bewertung des Arbeitsauftrages erfolgt durch geschulte Rater, die zuvor ein spezifisches Ratertraining absolviert haben. Dieses standardisierte Training zielt darauf ab, eine hohe „Interraterreliabilität“ sicherzustellen. Das bedeutet, dass alle Rater ein vergleichbares Verständnis der zu bewertenden Kriterien haben und somit eine hohe Objektivität gewährleistet wird. Zudem dient das Ratertraining dazu, mögliche Missverständnisse bei den Bewertungskriterien zu minimieren und extreme Abweichungen in den Bewertungen zu verhindern. Die Bewertung des COMET-Test im dritten DBR-Zyklus wurde von drei geschulten Ratern durchgeführt.

Als Grundlage für die Bewertung diente ein vom Forscher definierter Lösungsraum der Montageaufgabe³⁴, welcher die Lösungsaspekte beschreibt, die von den Probanden erwartet werden. Dieser Lösungsraum deckte die acht zentralen Kriterien Anschaulichkeit/Präsentation, Funktionalität, Gebrauchswertorientierung, Wirtschaftlichkeit, Geschäfts- und Arbeitsprozessorientierung, Sozialverträglichkeit, Umweltverträglichkeit und Kreativität (vgl. Kapitel 4.4.3, Tabelle 4.5) für die Montageaufgabe ab. Eine umfassende Darstellung dieses Lösungsraumes ist in Anhang A9 hinterlegt.

Die Bewertung erfolgte anhand von insgesamt 40 Anforderungen (Items), die von jedem Rater beurteilt wurden (vgl. Anhang A2). Der Bewertungsspielraum für die einzelnen Anforderungen ist in Tabelle 5.13 dargestellt.

³⁴ Der Lösungsraum einer COMET-Testaufgabe kann lediglich die Struktur möglicher Aufgabenlösungen beispielhaft veranschaulichen. Daher ist der Lösungsraum auch für unerwartete Lösungsansätze offen (Rauner, 2017, S. 99).

Tabelle 5.13: Bewertungsspielraum für die COMET-Items

Punkte	Anforderung
3	Voll erfüllt
2	Eher erfüllt
1	Eher nicht erfüllt
0	Keineswegs erfüllt

Der Fokus dieser Untersuchung lag auf dem Vergleich der beiden Probandengruppen. Die COMET-Testergebnisse für diese beiden Gruppen werden in Abbildung 5.25 grafisch gegenübergestellt³⁵.

COMET-Testergebnisse: Montage Doppelmembranzylinder

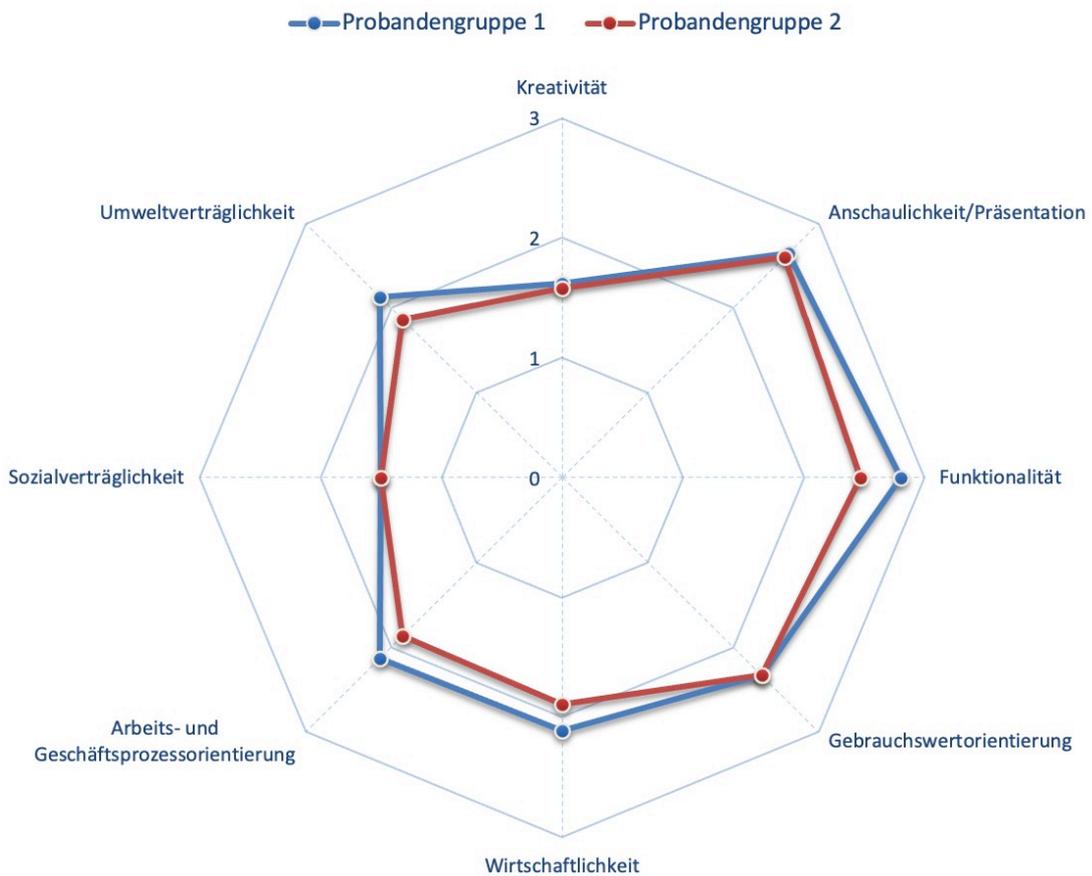


Abbildung 5.25: Übersicht der COMET-Testergebnisse

Quelle: eigene Darstellung

³⁵ Die individuellen Einzelratings der Probanden können in Anhang A10 eingesehen werden.

Die Analyse der Kompetenzprofile beider Probandengruppen zeigt anhand von Abbildung 5.25, dass die Kompetenzprofile ähnlich ausfallen, wobei Probandengruppe 2 in einigen Kriterien minimal hinter Probandengruppe 1 zurückbleibt. Dieses Ergebnis legt nahe, dass die zweite Probandengruppe mit Hilfe der implementierten Chunks der ersten Gruppe in der Lage war, sich dem Niveau der ersten Gruppe anzunähern, jedoch nicht in allen Kriterien aufschließen konnte.

Die acht zentralen Kriterien, die im Lösungsraum für die COMET-Aufgabe festgelegt wurden (siehe hierfür Anhang A9), wurden von beiden Gruppen abgedeckt. Dies wird in der folgenden Auflistung zusammenfassend für beide Gruppen dargestellt:

1. *Anschaulichkeit/Präsentation*

Alle Probanden beider Gruppen haben Chunks identifiziert, die nach Abschluss der Montagearbeit hinsichtlich ihrer Anschaulichkeit bewertet werden konnten.

2. *Funktionalität*

Alle multimedialen Elemente sind funktionsfähig. Es ist jedoch anzumerken, dass die von der zweiten Gruppe integrierten Chunks qualitativ auf einem niedrigeren Niveau liegen als die der ersten Gruppe.

3. *Gebrauchswertorientierung*

Beide Gruppen haben Elemente eingefügt, die einen Mehrwert für den Montageprozess darstellten.

4. *Wirtschaftlichkeit*

Die Montageanleitung und die implementierten Chunks haben potenziell positive Auswirkungen auf die Fehlerquoten, wobei diese nicht explizit gemessen werden können.

5. *Geschäfts- und Arbeitsprozessorientierung*

Die eingebrachten Chunks der ersten Gruppe basierten stärker auf implizitem Arbeitsprozesswissen, während Gruppe 2 eher beschreibende Hinweise eingebracht und bestehende Chunks verallgemeinerter formuliert hat.

6. *Sozialverträglichkeit*

Aspekte der Arbeitssicherheit und des Gesundheitsschutzes wurden von beiden Gruppen berücksichtigt. Die Werkstattregeln wurden eingehalten.

7. *Umweltverträglichkeit*

Aspekte des Umweltschutzes wurden von beiden Gruppen berücksichtigt. Entstandene Abfälle wurden in Übereinstimmung mit vorherrschenden Umweltstandards ordnungsgemäß beseitigt.

8. *Kreativität*

Beide Gruppen nutzten neben Textfeldern auch andere multimediale Elemente, darunter Bilder, Symbole und Animationen, um die Montageanleitung zu erweitern. Weitere Möglichkeiten wie Audio- oder Videoelemente wurden jedoch nicht in Betracht gezogen.

Die Unterschiede in den Ergebnissen zwischen den beiden Probandengruppen können primär auf die Differenzen im Vorwissen und in den Qualifikationsniveaus zurückgeführt werden. Im Vergleich zur zweiten Gruppe wiesen die eingebrachten Chunks der ersten Gruppe ein tiefergehendes Arbeitsprozesswissen auf. Auf der anderen Seite ist anzumerken, dass einige der eingebrachten Chunks der zweiten Gruppe für die Probanden der ersten Gruppe als gegeben oder selbstverständlich angesehen wurden, wodurch sie für diese in der Montage erfahrenere Gruppe einen geringeren Wert besaßen.

Zusammenfassend bestätigt die Kompetenzmessung mit der COMET-Methode den bereits gewonnenen Eindruck, dass der Einstieg in die Nutzung der AR-Montageanleitung für die Zielgruppe in realen Arbeitsumgebungen keine Hürde darstellt und auch die Nutzung des Autorensystems schnell und unkompliziert erfolgt. Das liegt insbesondere daran, dass die erforderlichen Kompetenzen zur Bedienung des AR-Systems schnell erworben werden können.

5.4.9 Zusammenfassung und Teilergebnisse des dritten DBR-Zyklus

Der dritte DBR-Zyklus konzentrierte sich auf die Baugruppe DMZ und gliederte sich in zwei aufeinanderfolgende Phasen. Die Montage des DMZ erfolgte mit

Hilfe eines AR-Systems, wobei jeweils drei Probanden pro Phase beteiligt waren. Keiner der Probanden verfügte über Vorkenntnisse in Bezug auf das AR-System oder die spezifische Baugruppe.

Alle notwendigen Montageschritte waren im AR-Autorensystem hinterlegt. Das Arbeitsprozesswissen der Experten, das zuvor durch eine umfassende Arbeitsprozessanalyse erhoben wurde, war bereits in Form von Chunks im AR-System integriert. Angesichts der hohen Schwierigkeit und Komplexität der Montageaufgabe war es von Interesse zu prüfen, ob die detaillierte Montageanleitung ausreichte, um auch Probanden mit einem niedrigeren Kompetenzlevel durch den Montageprozess zu führen. Um dies zu testen, wurde die erste Probandengruppe aus *erfahrenen Praktikern* zusammengestellt, während die zweite Gruppe aus *fortgeschrittenen Anfängern* bestand.

Es stellte sich heraus, dass in beiden Gruppen während der Montage Anpassungsbedarfe für die AR-Montageanleitung identifiziert werden konnten. Dafür wurden die Baugruppenmontagen durch Experten begleitet, welche auf Nachfrage bei Schwierigkeiten Unterstützung leisten konnten. In solchen Situationen konnten die Probanden selbstständig Arbeitsprozesswissen erschließen und es anschließend in Form von Chunks (in bildlicher, textlicher oder ikonischer Form) in das AR-System integrieren (vgl. Tabelle 5.10; Tabelle 5.12).

Ein wesentliches Moment der Versuchsreihe war, dass die während der ersten Phase von den *erfahrenen Praktikern* offengelegten Chunks in der zweiten Phase den *fortgeschrittenen Anfängern* zur Verfügung standen. Dabei wurde festgestellt, dass bei den durch diese Chunks verbesserten Montageschritten, bis auf zwei Missverständnisse bei der Formulierung, keine Schwierigkeiten mehr auftraten. Dennoch wurden vereinzelt noch Hindernisse entdeckt, die aber eher dazu dienten, das Verständnis während der Montage zu verbessern. Auch in diesen Fällen wurden die identifizierten Chunks von den Probanden in das AR-System übertragen.

Im Anschluss an die Montageversuche wurde eine Kompetenzmessung mit Hilfe des COMET-Verfahrens durchgeführt, um zu untersuchen, inwieweit sich die unterschiedlichen Kompetenzniveaus der beiden Probandengruppen durch den Einsatz eines AR-Systems angleichen können. Die Auswertung verdeutlichte,

dass die Gruppe der *fortgeschrittenen Anfänger* durch das optimierte AR-System nahezu das Kompetenzniveau der *erfahrenen Praktiker* erreichen konnte (vgl. Abbildung 5.25).

Die Versuchsreihe des dritten DBR-Zyklus unterstreicht, dass der Einsatz eines AR-Systems in einem realen, betriebsnahen Arbeitsumfeld auch bei anspruchsvollen Arbeitsaufträgen erfolgreich eingesetzt werden kann. Zudem konnte aufgezeigt werden, dass die Probanden im Betrieb innerhalb kurzer Zeit die erforderlichen Kompetenzen zur Nutzung des AR-Systems erwerben konnten.

Eine weitere wesentliche Erkenntnis, die durch die Auswertung des Montageszenarios DMZ hervorgehoben wurde, stammt aus den durchgeführten Interviews und Fragebögen. Diese Evaluationsinstrumente verdeutlichen, dass die Probanden in der Lage sind, ihr eigenes Arbeitsprozesswissen effektiv in Form von Chunks in das AR-Autorensystem zu übertragen. Diese Fähigkeit zur Integration von Arbeitsprozesswissen in das AR-System zeigt sich als besonders wertvoll, da eine Umsetzung in Ausbildungsumgebungen oder Facharbeiterwerkstätten leicht realisierbar ist und zudem dazu beiträgt, das Arbeitsprozesswissen der Nutzer nachhaltig zu sichern.

5.5 Zusammenfassung des Kapitels

Innerhalb des vorliegenden Forschungsprojekts wurde der DBR-Ansatz als methodischer Rahmen ausgewählt. DBR zeichnet sich durch einen integrativen, reflexiven und kooperativen Prozess aus, der die Entwicklung, Erprobung und Analyse von erstellten Forschungsdesigns in der praktischen Anwendung miteinander verbindet. Hierbei steht im Vordergrund, dass durch die fortlaufende Entwicklung und Anwendung von Designs in der Praxis neue wissenschaftliche Erkenntnisse generiert werden können. Die Zusammenarbeit zwischen Forschenden und Praktizierenden steht im Mittelpunkt, um effektive Lernumgebungen zu schaffen und gleichzeitig theoriebasiertes Wissen über Lern- und Arbeitsprozesse zu gewinnen.

Für das vorliegende Forschungsprojekt bedeutete dies, den Fokus systematisch und praxisorientiert auf die Offenlegung und Vermittlung von implizitem

Arbeitsprozesswissen mit Hilfe eines AR-Autorensystems zu legen. Insgesamt wurden drei DBR-Zyklen durchlaufen, wobei jeder Zyklus in zwei Phasen unterteilt wurde.

Im ersten DBR-Zyklus stand die Baugruppe „Sickenvorrichtung“ (SVR) im Fokus. Diese Baugruppe wies eine geringe Komplexität auf und das für die Montage notwendige implizite Wissen war von geringer Bedeutung. Daher erwies sich die SVR als einfach zu montieren, wodurch sie sich für die Erprobung verschiedener AR-Autorensysteme und AR-Endgeräte eignete. Im Zuge dieser Erprobung wurde die AR-Software „JigSpace“ für die weitere Forschung ausgewählt. Diese Software erwies sich als besonders anpassbar, wies potenziell die geringsten Einstiegshürden für den betrieblichen Einsatz auf und bot den am besten geeigneten Funktionsumfang für die Erreichung der Forschungsziele. Bezüglich der Hardware wurde das Tablet als geeignetstes AR-Endgerät identifiziert. Die Entscheidung basierte primär auf seiner weiten Verbreitung und dem häufig bereits bestehenden Vorwissen potenzieller Anwender in Bezug auf die Nutzung solcher Geräte. Dieses Vorwissen trug dazu bei, die Einarbeitungszeit in die Bedienung des AR-Systems zu minimieren und somit einen reibungslosen Einstieg in die Forschungsaktivitäten zu gewährleisten. Die ausgewählte AR-Software und Hardware bildeten die Basis für die folgenden DBR-Zyklen.

Der zweite DBR-Zyklus widmete sich der Montage eines Radialwellendichtrings (RWD). Im Vergleich zur SVR des ersten Zyklus war die Montage komplexer und es musste auf implizites Wissen zurückgegriffen werden, um den Montageprozess erfolgreich abzuschließen. In diesem Zyklus wurde die Funktionsfähigkeit des AR-Systems von zwei Kleingruppen mit Probanden, die einen gewerblich-technischen Hintergrund hatten, erprobt. Das Ziel war es, dass diese Probanden ihr Arbeitsprozesswissen in Form von Chunks in das AR-System übertragen. Das Design des AR-Systems wurde zu diesem Zweck so modifiziert, dass die erste Gruppe von Probanden zwangsläufig auf Hindernisse im Montageprozess stieß. Das erforderliche Arbeitsprozesswissen zur Überwindung dieser Hindernisse wurde von den Probanden der ersten Gruppe verbalisiert und in das AR-System überführt. Die Aufgabe der zweiten Probandengruppe war es, die Montage unter Nutzung des durch die erste Gruppe optimierten AR-Systems durchzuführen. Hierbei zeigte sich, dass die von der ersten Gruppe erstellten Chunks eine

fehlerfreie Montage mit dem optimierten AR-System nicht vollständig gewährleisten konnten. Arbeitsaufgaben, die ein hohes Maß an Taktilität und Routine erforderten, ließen sich durch das AR-System nur unzureichend vermitteln.

Die Ergebnisse des Montageszenarios zeigten, dass die Wirksamkeit des AR-Systems maßgeblich von der Art der vorliegenden Arbeitsaufgabe und dem Kenntnisstand des Nutzers abhängt. Während das System für generische Aufgaben durchaus Vorteile bietet, zeigt es Grenzen bei spezifischen, taktilen Tätigkeiten. Dennoch wurde deutlich, dass selbst ungelernete Probanden schnell dazu in der Lage sind, Chunks in das AR-System zu übertragen. Dies führt generell zu einer Erleichterung des Montageprozesses und kommt insbesondere nachfolgenden Monteuren zugute, da potenzielle Fehlerquellen durch die Chunks minimiert werden.

Der dritte DBR-Zyklus konzentrierte sich auf die Baugruppe „Doppelmembranzylinder“ (DMZ). Hierbei handelte es sich um eine äußerst komplexe Baugruppe, welche umfangreiches implizites Wissen für eine haltbare und qualitativ hochwertige Montage benötigt. Die Erprobung dieses Montageszenarios fand in einer betrieblichen Ausbildungswerkstatt statt und wurde ebenfalls von zwei Probandengruppen durchgeführt. Der Fokus dieses Zyklus lag erneut darauf, das implizite Wissen der Probanden im AR-System zu verankern und somit für nachfolgende Montagen zugänglich zu machen. Mit Hilfe einer umfangreichen Arbeitsprozessanalyse wurde wesentliches Arbeitsprozesswissen im Vorfeld von einer betrieblichen Praxisgemeinschaft erfasst und in die AR-Montageanleitung integriert. Anschließend wurde überprüft, ob die erste Probandengruppe, welche aus *erfahrenen Praktikern* bestand, die Montage mit Hilfe der AR-Anleitung ohne Schwierigkeiten durchführen konnte. Es zeigte sich, dass an einigen Stellen noch Unklarheiten bestanden. Dies führte zur Identifikation von fehlendem Arbeitsprozesswissen, das von den Probanden nachträglich in das AR-System in Form von Chunks integriert wurde. So entstand eine optimierte AR-Montageanleitung. Die zweite Probandengruppe, welche aus *fortgeschrittenen Anfängern* mit geringerer handwerklicher Vorerfahrung bestand, nutzte diese AR-Montageanleitung für ihre Montage. Auch hier wurden weiterhin Optimierungspotenziale entdeckt, welche ebenfalls als Chunks im AR-System verankert wurden. Zudem wurden einige

Chunks der ersten Gruppe für eine allgemein bessere Verständlichkeit angepasst.

Ein besonderer Aspekt des dritten Zyklus war die Nutzung des Kompetenzmessinstruments COMET. Es wurde festgestellt, dass trotz unterschiedlicher handwerklicher Vorerfahrung beide Gruppen ein vergleichbares Kompetenzniveau bei der Montage erreichten. Dieser Befund unterstreicht die schnelle Kompetenzentwicklung im Umgang mit dem AR-System und das Potenzial für einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess durch die Chunks der Probanden.

6 Bewertung der Forschungsfrage und Ergebnisdarstellung

6.1 Beantwortung der Forschungsfrage

Die Forschungsfrage der vorliegenden Arbeit, ob die AR-Autorentätigkeit in der beruflichen Bildung die Offenlegung und Weitergabe von impliziten Wissensinhalten ermöglicht (vgl. Kapitel 3), kann auf Grundlage der durchgeführten DBR-Zyklen und den daraus gewonnenen Erkenntnissen wie folgt beantwortet werden.

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Studien haben klar veranschaulicht, dass die Nutzung eines AR-Autorensystems eine Plattform zur Entschlüsselung und Weitergabe von implizitem Arbeitsprozesswissen³⁶ darstellt. Es ist hierbei wichtig zu betonen, dass ein Teil dieses impliziten Wissens bereits durch vorangegangene berufswissenschaftliche Arbeitsprozessanalysen (vgl. Becker & Spöttl, 2008) offengelegt werden konnte, während der andere (für die Qualität von Montageprozessen als relevant erkannte) Teil während der Nutzung des AR-Systems von den Versuchsteilnehmern identifiziert und offengelegt wurde. Diese Offenlegung von Wissensinhalten erfolgte durch die Artikulation von implizitem Wissen beim Editieren von AR-Anwendungen.

Ein zentraler Aspekt dieser Forschung ist die Art und Weise, wie dieses Wissen beschrieben wird, nämlich in Form von Chunks (vgl. Miller, 1956), welche als handlungsleitende Wissensinhalte während eines Arbeitsprozesses auftreten. Durch die Reflexion des Arbeitsprozesswissens seitens der Probanden kann implizites Wissen verbalisiert und in Chunks strukturiert werden. Das Autorensystem dient dabei als Plattform für die anschauliche Darstellung dieser Chunks, welche in der vorliegenden Studie in erster Linie durch textuelle, bildliche und ikonische Darstellungsformen im System hinterlegt wurden, um es für nachfolgenden Anwender zu optimieren.

³⁶ Gemäß der Definition von *Neuweg* (2005), welche hier als Basis verwendet wurde (vgl. Kapitel 2.4)

Durch diesen kontinuierlichen Verbesserungsprozess innerhalb des AR-Systems konnte eine einheitliche Plattform für Chunks geschaffen werden, auf der sowohl *erfahrene Praktiker* als auch *fortgeschrittene Anfänger* auf einem vergleichbaren Kompetenzniveau (vgl. Dreyfus & Dreyfus, 1992) operieren können. Das AR-System kann somit als Brücke zwischen den unterschiedlichen Kompetenzebenen fungieren.

Im Verlauf der Versuchsreihe wurde zudem festgestellt, dass die Nutzung von AR-Darstellungen die räumliche Vorstellung der Montageprozesse verbessert, motivierend wirkt und subjektiv auch die Sicherheit bei der Montage erhöht. Jedoch wurde ebenfalls deutlich, dass die Nutzung der AR-Ansicht für den konkreten Handlungsakt nicht unbedingt ausschlaggebend für die erzielten Erkenntnisse ist, sondern vielmehr das Autorensystem und die Option einer interaktiven Darstellungsform, welche alternativ zur AR-Ansicht auch durch eine 3D-Ansicht auf dem Endgerät gelöst werden kann.

Zudem wurde auch deutlich, dass der erfolgreiche Transfer von Arbeitsprozesswissen stark von dem spezifischen Montageszenario, dem Vorwissen der Anwender und dem jeweiligen Aufgabentyp abhängt. Hierbei zeigte sich, dass „schwaches“ implizites Wissen (vgl. Kapitel 2.4), wie es bei generischen Aufgabentypen vorausgesetzt wird (vgl. DBR-Zyklen 1 und 3), sich wesentlich besser im AR-System vermitteln lässt, im Vergleich zu Aufgaben, die ein „starkes“ implizites Wissen erfordern (vgl. DBR-Zyklus 2).

Somit bestätigt diese Untersuchung für die genannten Szenarien die Alternativhypothese, dass AR-Autorensysteme erfolgreich als Mittel zur Offenlegung und nachhaltigen Implementierung von implizitem Wissen in Form von Chunks genutzt werden können, was letztlich zu einer effektiveren und effizienteren beruflichen Bildung beiträgt.

6.2 Theoriebestätigung

Die vorliegende Forschung stützte sich auf eine breite theoretische Grundlage, um die komplexe Frage zu beantworten, ob die AR-Autorentätigkeit in der beruflichen Bildung die Offenlegung und Weitergabe von impliziten Wissensinhalten

ermöglicht. Insbesondere wurden die ACT-Theorie von *Anderson* (1996), die Chunk-Theorie von *Miller* (1956) und das Sender-Empfänger-Modell von *Shannon* und *Weaver* (1976) in den Untersuchungskontext integriert.

ACT-Theorie und Performanzmomente in den DBR-Zyklen

Die ACT-Theorie liefert den Rahmen, um die verschiedenen Phasen des Wissenserwerbs und dessen Anwendung im Arbeits- und Lernprozess zu verstehen. Die Erwerbsphase, die Kompilationsphase und die Tuning-Phase bilden die grundlegenden Etappen, in denen Wissen erworben, kompiliert und optimiert wird (vgl. Kapitel 4.1.1). Im zweiten und dritten DBR-Zyklus wurden insbesondere während der Kompilations- und Tuning-Phasen des Arbeitsprozesses die Performanzmomente der Probanden beobachtet. Durch die Interaktion mit dem AR-System in der Kompilationsphase konnten die Probanden mit dem hinterlegten Wissen interagieren und durch die Bewältigung von Problemsituationen Verbindungen zu neuem Wissen knüpfen. Das AR-System unterstützt diesen Prozess, indem es eine Plattform bietet, auf der die Probanden als Autoren ihr Wissen, das sie in ihren Performanzmomenten erlangt haben, hinterlegen können. Dieses modifizierte AR-System birgt ein Potenzial zur Kompetenzerweiterung, wie es beispielsweise im dritten DBR-Zyklus mit Hilfe des COMET-Verfahrens dokumentiert werden konnte. Die Bedeutung der Autorentätigkeit zeigte sich vor allem in der Tuning-Phase, da das AR-System die Möglichkeit für stetige Reflexion und Anpassung bietet. Dies führt zu einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess, der für die Folgeanwender des Systems aufgrund der implementierten Chunks performanzkorrigierend wirken kann und negativem Tuning vorbeugt.

Die Rolle der Chunk-Theorie im Kontext des Wissenstransfers

In der vorliegenden Studie nimmt die Chunk-Theorie eine zentrale Rolle ein, vor allem im Kontext der Offenlegung und Weitergabe von implizitem Wissen. Die Theorie legt dar, dass Personen Informationen effektiver speichern und abrufen, indem sie diese in Wissensseinheiten (Chunks) organisieren (Seel & Hanke, 2015, S. 319). Dieses als Chunking bezeichnete Prinzip ermöglicht eine effiziente Strukturierung und Übertragung von Wissen, insbesondere in Problemsituationen, wie sie während der Arbeitsprozesse im zweiten und dritten DBR-Zyklus auftraten. Hier ermöglichte das AR-System nicht nur die Identifizierung von

implizitem Wissen, sondern auch dessen Dokumentation in handhabbare Chunks durch die Autorentätigkeit. Dadurch wird die Basis für einen künftigen, effizienteren Wissenstransfer geschaffen.

In den DBR-Zyklen zeigte sich, dass Chunks vorwiegend durch textliche, bildliche und ikonische Darstellungsformen als effektives Instrument zur Repräsentation von Arbeitsprozesswissen dienen. Abbildung 6.1 illustriert jeweils ein Beispiel der genannten Darstellungsformen.

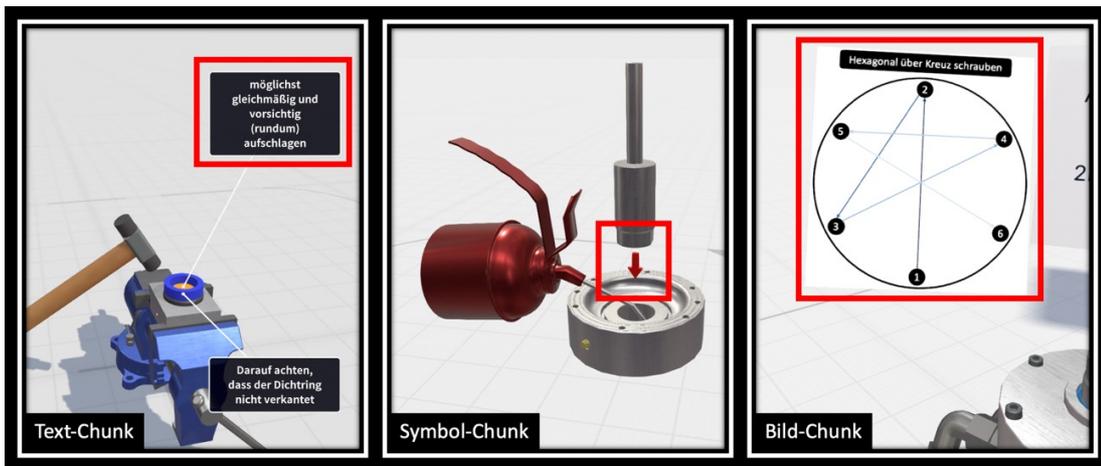


Abbildung 6.1: Arten der Chunks im Autorensystem

Quelle: eigene Darstellung

Die Montageszenarien haben gezeigt, dass die Anwendung der Chunk-Theorie als funktionales Werkzeug zur Optimierung des Wissenstrfers mit Hilfe eines AR-Autorensystems dient, was das generelle Potenzial dieser Technologie in der beruflichen Bildung weiter betont. Für die Praxis führt dieser Ansatz auch an dieser Stelle zu einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess, bei dem das AR-System laufend durch neues, reflektiertes Wissen aufgewertet wird.

Integration des modifizierten Sender-Empfänger-Modells

Das Sender-Empfänger-Modell diente als Grundlage für das Verständnis der Kommunikation von implizitem Wissen in Form von Chunks. Dafür wurde das Modell im Rahmen dieser Studie neu interpretiert, um den Wissenstransfer durch AR-Autorensysteme besser zu erfassen. Die „Nachricht“ im klassischen Modell wird hier durch einen Chunk ersetzt (vgl. Abbildung 4.5), also einer strukturierten

Einheit von Informationen, die eine klare und präzise Übertragung von implizitem Wissen begünstigen soll. Diese Modifikation soll sicherstellen, dass das implizite Wissen effektiv beim Empfänger ankommt, wobei die Chunks sowohl verbale als auch non-verbale Elemente enthalten können.

Im Verlauf der DBR-Zyklen wurde gezeigt, dass den Nutzern durch die Codierung ihrer Chunks im AR-System eine Möglichkeit zur Kommunikation ihres Arbeitsprozesses gegeben wird. Hierbei erwies sich die Kommunikation über ikonische und bildliche Chunks als stets erfolgreich, während textbasierte Chunks an einigen Stellen nicht immer eindeutig waren. Hier zeigt sich der Vorteil der Autorentätigkeit, da bereits existierende Chunks angepasst werden können, um die Decodierung der Informationen für den Empfänger so einfach wie möglich zu gestalten. Es ist wichtig zu beachten, dass eine reibungslose Kommunikation am wahrscheinlichsten ist, wenn Sender und Empfänger aus dem gleichen beruflichen Umfeld stammen und somit eine ähnliche Fachsprache verwenden (Drescher, 1996, S. 30). In diesem Kontext wird nicht nur die Übertragung von implizitem Wissen erleichtert, sondern auch der Nutzen der Technologie als effektives Instrument für die berufliche Bildung hervorgehoben.

Überwindung des Polanyi-Paradoxons

Die Darstellung des modifizierten Sender-Empfänger-Modells im Kontext des AR-Autorensystems stellt einen entscheidenden Schritt zur Überwindung des Polanyi-Paradoxons dar. Nach *Polanyi* kann eine unbestimmte Menge an implizitem Wissen, das Menschen besitzen, nicht explizit artikuliert oder verbalisiert werden (Polanyi, 1966). Allerdings zeigt die Anwendung des modifizierten Sender-Empfänger-Modells, dass implizites Wissen durch die Integration von Chunks als Nachrichtenelemente erfolgreich kodiert und vermittelt werden kann, wodurch die Grenzen der verbalen Kommunikation überschritten werden. Vor allem während des dritten DBR-Zyklus konnte festgestellt werden, dass das Polanyi-Paradoxon durch die kontextspezifische Darstellung von implizitem Wissen mittels bildlicher oder ikonischer Chunks im Autorensystem (vgl. Abbildung 6.1) entkräftet werden konnte. Somit wird eine Möglichkeit aufgezeigt, den Transfer von implizitem Wissen mit Hilfe eines AR-Systems zu erleichtern, ohne dass umfangreiche verbale Erläuterungen erforderlich sind.

Insgesamt zeigt die Reflexion der Theoriebestätigung, dass die gewählten theoretischen Grundlagen effektiv genutzt wurden, um die Forschungsfrage zu beantworten. Die Theorien ermöglichten es, die Prozesse des impliziten Wissenserwerbs, der Chunk-Bildung und der Wissensvermittlung durch das verwendete AR-System zu verstehen und praktisch anzuwenden. Die Studie trägt somit nicht nur zur Relativierung des Polanyi-Paradoxons bei, sondern auch zur Weiterentwicklung der beruflichen Bildung, indem das Potenzial von AR-Autorensystemen als innovativer Weg zur effektiven Kommunikation und Übertragung von implizitem Wissen aufgezeigt wird.

6.3 Analyse der offengelegten Chunks

Im Folgenden soll der potenzielle Mehrwert der in dieser Studie offengelegten Chunks für Folgearbeitsprozesse dargelegt werden. Bei den von den Probanden aus den DBR-Zyklen 2 und 3 identifizierten Chunks handelt es sich hauptsächlich um Handlungsrouinen, welche in der AR-Montageanleitung hinterlegt wurden. Auf kognitiver Ebene repräsentieren diese Chunks eine Aktion für den jeweiligen Handlungsakt im Rahmen der Montageaufgabe wider. Jedoch repräsentieren diese Chunks auch eine metakognitive Ebene, auf der implizites Wissen für grundlegendes Arbeitshandeln verankert ist.³⁷ Eine verallgemeinerte Übersetzung der Chunks in die Metaebene ist in der folgenden Tabelle 6.1 dargestellt.

³⁷ Diese Metaebene repräsentiert einen Interpretationsansatz des Forschers, der die ermittelten Chunks in eine generalisierte Form überführt.

Tabelle 6.1: Metaebene der identifizierten Chunks

Chunks: Montage Radialwellendichtring	Metaebene:
Auf bündige Auflage auf dem Schraubstock achten	⇒ Sichererer Halt bei Einspannung größerer Klemmfläche
Schraubstock handfest anziehen	⇒ Vermeidung von Oberflächenbeschädigung und plastischer Verformung, trotzdem feste Lage
Stirnfläche (des Dichtrings) mit flacher Seite nach oben ausrichten	⇒ Kontrolle der Einbaurichtung bei variablen Einbaumöglichkeiten
Einölen der Kontaktflächen des Dichtrings mit der Halterung (optimal: innere und äußere Mantelfläche des Dichtrings)	⇒ Verringerung des Reibungskoeffizienten durch Schmierwirkung an Kontaktflächen
Möglichst parallel zum Bauteil platzieren	⇒ Korrekte Positionierung reduziert Folgeprobleme beim Einbau
Möglichst gleichmäßig und vorsichtig (rundum) aufschlagen	⇒ Gleichmäßige Kräfteverteilung reduziert die Wahrscheinlichkeit von Verkantung
Darauf achten, dass der Dichtring nicht verkantet	⇒ Geringere Lebensdauer durch ungleichmäßige Pressung oder Beschädigung
Obere Stirnfläche des Dichtrings sollte bündig mit der Halterung sein	⇒ Korrekte Passung und Sitz des Bauteils durch Sichtprüfung
Chunks: Montage Doppelmembranzylinder	Metaebene:
Einführen der Kolbenstange (durch Animation dargestellt)	⇒ Minimale Belastung von Dichtelementen ist anzustreben
Gehäuse mittig einspannen	⇒ Sicherer halt für die Montage durch zentrale Kräfteverteilung
Die Sicken der Stützscheiben zeigen zur Membrane	⇒ Nach Möglichkeit ist ein Formschluss anzustreben
Stifte nur locker einsetzen	⇒ Leichtgängigkeit als Indikator für korrekten Sitz der Baugruppe (Membrane)
Kolbenstange axial auf Leichtigkeit prüfen	⇒ Zwischenprüfung auf Gängigkeit als Indikator für Funktion der Baugruppe

Membrane nicht in den Schraubstock klemmen	⇒ Bauteilbeschädigung beim Aufspannen vermeiden
Hexagonal überkreuz verschrauben (durch Bild dargestellt)	⇒ Gleichmäßige Flächenpressung wird überkreuz erzielt
Kolbenstange an den abgeflachten Flächen einspannen	⇒ Sichererer Halt bei Einspannung größerer Klemmfläche
Beschriftung der Mutter muss außen liegen	⇒ Verschraubung auf Ausstanzungen sorgt für ungleichmäßige Flächenpressung
Von Hand anziehen	⇒ Vermeidung von Oberflächenbeschädigung und plastischer Verformung, trotzdem feste Lage
Membrane einen Bohrdurchmesser gegen den Uhrzeigersinn ausrichten	⇒ Berücksichtigung des Reibungskoeffizienten bei Verschraubung von glatten Oberflächen

Die Betrachtung der Metaebene zeigt, dass den ermittelten Chunks ein Lerneffekt innewohnt, der Potenzial für Transferleistungen bietet. Dies legt nahe, dass die Offenlegung eines Chunks während eines Arbeitsprozesses eine effektive Handlungsregulierung in Montageszenarien mit vergleichbaren Handlungsrou-tinen bewirken kann.

Bei der Betrachtung der Probandengruppen des dritten DBR-Zyklus wurde deutlich, dass die Fähigkeit, Chunks zu identifizieren, tendenziell von der Erfahrung des Anwenders abhängig ist. Konkret konnte beobachtet werden, dass je erfahrener der Anwender war, desto schwieriger wurde es für ihn neue Chunks offenzulegen. Dies kann auf die Tatsache zurückgeführt werden, dass Handlungsrou-tinen bei erfahrenen Anwendern bereits (unterbewusst) kognitiv verankert sind, womit an dieser Stelle die Grenzen der Offenlegung von Chunks aufgezeigt werden. Vor diesem Hintergrund kann es vorteilhaft sein, Jungfacharbeiter oder fortgeschrittene Auszubildende in den Entwicklungsprozess einer AR-Montageanleitung mit einzubeziehen. Ihre möglicherweise weniger etablierten Handlungsrou-tinen könnten dazu beitragen, den Prozess der Chunk-Identifikation zu erleichtern und zu verbessern.

Schließlich hat die Studie aufgezeigt, dass sich für die Bewertung der Qualität der eingebrachten Chunks das COMET-Verfahren als zusätzliches Instrument zur Evaluation anbietet.

6.4 Handlungsempfehlungen

In diesem Abschnitt werden auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse, die während dieser Studie durch den iterativen Entwicklungsprozess des AR-Systems und die Anwendung berufswissenschaftlicher Methoden zur Offenlegung von implizitem Arbeitsprozesswissen in manuellen Montageszenarien gewonnen wurden, verschiedene Empfehlungen zur Offenlegung von Arbeitsprozesswissen mit Hilfe eines AR-Systems dargelegt. Es ist zu beachten, dass sich diese Empfehlungen speziell auf die in der Untersuchung angewandte AR-Projektionstechnik für kleinere, manuell zu montierende Baugruppen bezieht.

Das Montageszenario

Für jedes Montageszenario muss individuell geprüft werden, ob der Einsatz eines AR-Systems sinnvoll ist. Eine zentrale Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz eines solchen Systems ist, dass der Montageprozess in klar abzugrenzende Arbeitsschritte unterteilt werden kann, die dann mit Hilfe des AR-Endgeräts visualisiert werden können. Hierbei ist die Komplexität des Aufbaus der Baugruppen nicht ausschlaggebend, wie sich aus den Erfahrungen mit den Baugruppen SVR und DMZ zeigt. Vielmehr sollte der Einsatz bei Montageaufgaben, bei denen einzelne Schritte Übung und Erfahrung erfordern, wie es beispielsweise bei der Montage des RWD der Fall ist, kritisch geprüft werden. Insbesondere für die Erstmontage solcher Montageszenarien (wie dem RWD aus DBR-Zyklus 2) ist der Einsatz eines AR-Systems möglicherweise aufgrund schwer zu vermittelnder motorischer Fähigkeiten nicht ideal, allerdings kann es für erfahrene Nutzer unterstützend sein. In diesem Zusammenhang ist es von hoher Relevanz, dass der Montageauftrag zielgruppenspezifisch erfolgt. Dabei sollte eine Kohärenz zwischen der Aufgabe und dem Tätigkeitsfeld des Nutzers bestehen. Das bedeutet, dass bei komplexeren Aufgaben der berufliche Hintergrund des Nutzers stärker mit der jeweiligen Aufgabe verknüpft sein sollte (vgl. DMZ-Szenario), während bei weniger komplexen Aufgaben der beruflichen Hintergrund eine untergeordnete Rolle spielt (vgl. SVR-Szenario). Dennoch sollten Grundkenntnisse im Umgang mit Standardwerkzeugen und Werkstattausrüstung für die Nutzer keinesfalls eine Hürde darstellen. Ein AR-System sollte primär darauf abzielen, die Erstmontage von Baugruppen zu erleichtern und nachfolgende Nutzer durch

kontinuierliche Anpassungsmöglichkeiten zu entlasten. Letztlich kann dies durch eine Verringerung von Montagefehlern zu einer Qualitätsverbesserung beitragen.

Die Methodenwahl

Die Methodenwahl für die Offenlegung von implizitem Arbeitsprozesswissen mittels eines AR-Systems orientiert sich an berufswissenschaftlichen Verfahren, wie sie in den DBR-Zyklen zum Einsatz kamen. Die Evaluation passender Montagezenarien sollte idealerweise von betrieblichen Praxisgemeinschaften innerhalb der spezifischen Anwendungsdomäne durchgeführt werden. Dabei dienen Methoden wie Experten-Facharbeiter-Workshops, teilnehmende Beobachtungen, handlungsorientierte Fachinterviews und die Erstellung von Masterlösungen als Grundlagen für diese Evaluierung. Des Weiteren wird empfohlen, die Entwicklung von Use-Cases möglichst unternehmensintern durchzuführen, da die Mitarbeiter eher mit den spezifischen Herausforderungen und Anforderungen des Unternehmens vertraut sind und eine höhere Akzeptanz durch die frühe Einbindung bewirkt werden kann. Zudem sollte der Erprobungsprozess mit potenziellen Nutzern durchgeführt werden, um relevante Rückmeldungen und Einsichten für eine praxisnahe Weiterentwicklung zu erhalten. So können auch Fehler und Unstimmigkeiten in der AR-Anwendung effizienter erkannt und korrigiert werden. In diesem Zusammenhang haben sich technische Auszubildende als geeignete Testpersonen erwiesen, da sie tendenziell noch wenig Praxiserfahrung bei Montagearbeiten besitzen, aber dennoch mit der Arbeitsumgebung vertraut sind und somit wertvolle Rückmeldungen zur Verbesserung der Anwendung liefern können. Zuletzt kann festgehalten werden, dass das berufswissenschaftliche Instrumentarium durch ein AR-System ergänzt wird.

Die Gestaltung

Aufgrund der Erfahrungen, die im Rahmen verschiedener Systemevaluationen gesammelt wurden (vgl. Kapitel 5.2.8), ist es ratsam, ein AR-System auszuwählen, das den in Kapitel 4.2 beschriebenen Anforderungen an das Interaktionsdesign, Multimediadesign und die Implementierung entspricht. Um eine breite Akzeptanz für das gewählte System bei den Anwendern zu erreichen, ist es jedoch entscheidend, dass das AR-System leicht bedienbar und schnell erlernbar ist. Darüber hinaus ist es vorteilhaft, wenn die Benutzer bereits ein grundlegendes

Verständnis für die Bedienung und Steuerung des Systems haben. In diesem Zusammenhang sind Tablets eine optimale Wahl, da sie weit verbreitet und mit dem Bedienungskonzept von Smartphones identisch sind. Gleichzeitig sollte die Benutzeroberfläche des AR-Systems einfach gestaltet sein, um den Einstieg für die Anwender zu erleichtern.

Das übergeordnete Ziel sollte darin bestehen, ein System einzusetzen, welches eine Bottom-up-Lösung ermöglichen kann. Dies würde Fachkräften und Auszubildenden die Möglichkeit geben, aktiv an der Gestaltung des Systems teilzunehmen. Eine solche Herangehensweise kann das Innovationspotenzial und die Eigeninitiative der Nutzer potenziell fördern.

Um eine effiziente Implementierung zu gewährleisten, bietet sich die Nutzung von Drittanbietersoftware mit integrierter Cloud-Lösung an. Dies kann nicht nur den Bedarf an IT-Ressourcen für potenziell notwendige Serverinfrastrukturen reduzieren, sondern auch die Skalierbarkeit und Flexibilität des Systems erhöhen. In diesem Kontext haben sich die in dieser Arbeit verwendeten AR-Autorentools als eine mögliche Option herausgestellt, um ein solches zielgerichtetes und benutzerorientiertes AR-System zu realisieren.

Die Unternehmenskultur

Die Etablierung einer Unternehmenskultur, welche die Integration von AR-Systemen zur Offenlegung von Arbeitsprozesswissen fördert, ist ausschlaggebend für den langfristigen Erfolg dieser Technologie im Unternehmen. Sie schafft die notwendigen Rahmenbedingungen für eine reibungslose Implementierung und Nutzung. Hierzu sollte seitens des Unternehmens eine Kultur der kontinuierlichen Verbesserung und Technologieoffenheit gelebt und gefördert werden. Dies ist insbesondere für „Industrie 4.0“-Technologien relevant, die bereits auf der untersten Ebene des Unternehmens eingesetzt werden können. Für die nachhaltige Etablierung der AR-Systeme bedeutet dies, dass diese bereits in die Schulung von Praktikanten und Lehrlingen als berufliche Lernsituationen eingebunden werden sollten. Dadurch entstehen frühzeitig Berührungspunkte mit der Technologie, was wiederum die Akzeptanz dieser Werkzeuge zur Speicherung von Arbeitsprozesswissen fördert.

Für die Entwicklung und Wartung von AR-Anwendungen sind personelle Ressourcen erforderlich. Eine effektive Lösung wäre, diese Aufgabe denjenigen zu übertragen, die bereits für die Erstellung der CAD-Daten verantwortlich sind. Darunter fallen beispielsweise technische Produktdesigner, denen die Wartung von bereits erstellten AR-Montageanleitungen anvertraut werden kann. In Bezug auf den Redaktionsprozess kann ähnlich verfahren werden. Als Alternative könnte in Erwägung gezogen werden, einem Experten für die jeweilige Baugruppe die redaktionelle Verantwortung zu übertragen. Die Wahl hängt von den Ressourcen und der Organisationskultur des Unternehmens ab.

Die technische Ausrüstung

Bei der Anwendung von AR-Montageanleitungen mit der in dieser Studie verwendeten Projektionsmethode wurde, nach einer Analyse und Bewertung verschiedener verfügbarer Alternativen, die Tablet-Lösung einer Brillen-Lösung für kleine manuell zu montierende Baugruppen vorgezogen (vgl. Kapitel 5.2.4). Der Hauptgrund hierfür liegt in der im Vergleich deutlich geringere Einstiegshürde von Tablets, sowohl hinsichtlich der Benutzerfreundlichkeit als auch aus wirtschaftlicher Perspektive.

Zum Zeitpunkt der Studie weisen die marktüblichen AR-Brillen noch einige Defizite auf, vor allem in Bezug auf die Einfachheit der Bedienung, die Ergonomie³⁸ und den Softwaresupport. Im direkten Vergleich zu Tablets und Smartphones waren sie noch nicht ausgereift genug, um eine uneingeschränkte Empfehlung auszusprechen. Zudem sind Tablets und Smartphones in der Bevölkerung weit verbreitet. Dies bietet die Möglichkeit, Fernschulungen für die Nutzung der AR-Software durchzuführen und ermöglicht beispielsweise Blended-Learning Konzepte, bei denen digitales und Präsenzlernen kombiniert wird.

³⁸ Ergonomische Aspekte umfassen Faktoren wie den Tragekomfort, das Gewicht, die Größe oder Form der Brille, visuelle Ermüdung und Übelkeit, die Bildqualität und die Begrenzung des Sichtfeldes für Darstellung virtueller Inhalte.

7 Fazit und Ausblick

7.1 Fazit

Das vorliegende Forschungsprojekt unterstreicht den Nutzen eines AR-Autorensystems für die berufliche Bildung. Im Rahmen der Studie gelang es, mit Hilfe des AR-Autorensystems implizite Wissensinhalte der teilnehmenden Probanden gemäß der Chunk-Theorie zu verbalisieren und im AR-System zu verankern. Die Anwendung dieses Systems in einem realen industriellen Kontext hat dessen Wert für den unterstützenden Einsatz bei anspruchsvollen Montageaufgaben hervorgehoben. Neben der grundlegenden Funktionalität des Systems bei der Montage kleiner Baugruppen oder firmenspezifischer Unikate, fungierte das System für Folgeanwender vor allem als Brücke zur Vermittlung von implizitem Wissen.

Ein entscheidendes Element für die Entwicklung und Implementierung solcher Montage-Lernszenarien ist die enge Zusammenarbeit mit dem betrieblichen Bildungspersonal. Ihre Partizipation ist ein wichtiges Erfolgskriterium für den Einzug moderner Technologien in die Unternehmen. Daher sollten potenzielle Anwendergruppen frühzeitig in den Entwicklungsprozess eingebunden werden.

Die Erfahrungen und Erkenntnisse, die im Rahmen dieser Forschungsarbeit gewonnen wurden, zeigen grundsätzliche Strategien zur Implementierung solcher AR-Autorensysteme in betrieblichen Bildungskontexten auf. Dies eröffnet vielversprechende Perspektiven für zukünftige Entwicklungen auf dem Gebiet der beruflichen Bildung und der Arbeitsprozessoptimierung.

7.2 Ausblick

Die vorliegende Forschungsarbeit hat verdeutlicht, dass die Technologie der AR-Systeme für den Einsatz im Bildungsbereich ausgereift ist, insbesondere wenn Smartphones und Tablets als Endgeräte zur Darstellung digitaler Inhalte verwendet werden. Während diese Geräte bereits in der breiten Masse angekommen sind und eine hohe Akzeptanz erfahren, steht der große technologische Sprung

für Brillen-Lösungen in dieser Hinsicht noch aus – Die Entwicklung hin zu kompakteren, erschwinglicheren und technisch ausgereiften Produkten wird in der Zukunft erwartet.

Neben den in dieser Arbeit verwendeten Autorensystemen befinden sich derzeit weitere Softwaretools von Drittanbietern in Entwicklung³⁹, die wenig bis keine Programmierkenntnisse für die Erstellung von Assistenzlösungen erfordern und somit von einer breiten Nutzerbasis eingesetzt werden könnten. Angesichts des wachsenden Markts für digitale Assistenzsysteme ist zu erwarten, dass zukünftig weitere Anbieter entsprechende Softwarelösungen entwickeln und anbieten werden. Hierbei ist zu betonen, dass es nun an den Bildungseinrichtungen und Unternehmen liegt, aus diesem wachsenden Angebot eigene Bedarfe abzuleiten, um so zielgerichtete Nutzungsszenarien zu entwickeln. Dann könnten digitale Assistenzsysteme, wie das in dieser Arbeit verwendete AR-System, nicht nur als Zusatzqualifikation für Facharbeiter dienen, sondern auch in bereits bestehende Strukturen der Berufsausbildung integriert werden. Die Rahmenlehrpläne der meisten gängigen gewerblich-technischen Ausbildungsberufe bieten bereits jetzt die Flexibilität und den Raum, um solche modernen Systeme in die Ausbildung zu integrieren. Beispielsweise sind technische Produktdesigner für die Aufgabe prädestiniert, neben der Erstellung der für die digitalen Assistenzsysteme notwendigen 3D-Daten, auch die Moderationsverantwortung für diese Systeme zu übernehmen (vgl. Kultusministerkonferenz, 2011).

Für Unternehmen, die über mehrere Standorte oder Ausbildungsstätten verfügen, bieten digitale Assistenzsysteme die Möglichkeit, diese Standorte zu vernetzen. Systeme wie das in dieser Arbeit verwendete Autorentool können in diesem Fall als lernortübergreifendes Wissensmanagementsystem genutzt werden. Dies ermöglicht eine effiziente Verteilung von Wissen und stellt sicher, dass alle Standorte auf aktuelle Datenbestände zugreifen können. Besonders im Kontext internationaler Vernetzung eröffnen diese Systeme die Möglichkeit, Textinhalte schnell zu übersetzen und gleichzeitig durch die Nutzung einer einheitlichen Ikonographie eine hohe Verständlichkeit zu gewährleisten. Die Herausforderung besteht jedoch darin, eine Ikonographie für Montageprozesse zu entwickeln, die

³⁹ An dieser Stelle seien beispielhaft zwei deutsche Projekte erwähnt: „Figments.nrw“ (Universität Wuppertal) und „3spin Learning“ (3spin Learning GmbH & Co. KG, Darmstadt)

über gängige ISO-Normen hinausgeht. In diesem Bereich zeigt sich ein weiterer Forschungsbedarf, um Standards zu setzen, die international verständlich sind.

Des Weiteren stellt sich die Frage, ob die Anwender des Autorensystems in der Lage sind, nach der Offenlegung von Chunks eigenständig auf die Metaebene (vgl. Tabelle 6.1) des impliziten Wissens zuzugreifen und somit einen Lerneffekt zu erlangen, der über die ursprüngliche Montageaufgabe hinausgeht. Um diese Fähigkeit zum Wissenstransfer zu beurteilen, bedarf es einer umfangreichen wissenschaftlichen Begleitung bei der Erprobung ähnlicher Folgemontageaufgaben in den Betrieben, bei denen jedoch keine Unterstützung durch ein digitales Assistenzsystem vorhanden ist, um einen Vergleich herstellen zu können. Diese Forschungsaufgabe geht über die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit hinaus, welche sich auf die Offenlegung von implizitem Wissen fokussiert.

Systeme wie das in dieser Forschungsarbeit verwendete Autorentool können zudem einen Beitrag zur Bewältigung aktueller Herausforderungen wie dem demographischen Wandel und dem Fachkräftemangel in Unternehmen des deutschen Mittelstandes leisten (vgl. Sames & Maibach, 2023). Das Potenzial liegt darin, sowohl explizites als auch implizites Wissen, welches sich erfahrene Mitarbeiter über Jahre angeeignet haben, digital zu verankern und für kommende Generationen zugänglich zu machen. Einer Wissensabwanderung kann somit proaktiv entgegengewirkt werden.

Trotz der vielversprechenden Perspektiven wird es letztlich von der Adaptionsbereitschaft der Unternehmen abhängen, ob sie sich für moderne digitale Systeme öffnen und diese in ihre Arbeitsprozesse integrieren. Die technologischen Möglichkeiten sind vorhanden, aber die erfolgreiche Implementierung erfordert eine proaktive Haltung und Bereitschaft zur Veränderung seitens der Unternehmen.

Literaturverzeichnis

- Abele, N. D. und Kluth, K. (2020), „Beanspruchungsbezogene Evaluierung AR-basierter versus papierunterstützter Rüstinstruktionen zur Einrichtung von Industriemaschinen“, *Digitale Arbeit, digitaler Wandel, digitaler Mensch? Proceedings des 66. Frühjahrskongresses der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft*, GfA-Press, Dortmund, No. B.2.1, S. 1–6.
- Anderson, J. R. (1996), *The Architecture of Cognition*, Psychology Press, New York.
- Arth, C., Grasset, R., Gruber, L., Langlotz, T., Mulloni, A. und Wagner, D. (2015), „The history of mobile augmented reality“, *arXiv preprint arXiv:1505.01319*, Graz.
- Atanasyan, A., Kobelt, D., Goppold, M., Cichon, T. und Schluse, M. (2020), „The FeDiNAR Project: Using Augmented Reality to Turn Mistakes into Learning Opportunities“, in Geroimenko, V. (Hrsg.), *Augmented Reality in Education: A New Technology for Teaching and Learning*, Springer International Publishing, Cham, S. 71–86.
- Autor, D. (2014), „Polanyi’s Paradox and the Shape of Employment Growth“, *NBER Working Paper Series*, Cambridge, verfügbar unter: <https://doi.org/10.3386/w20485>.
- Azuma, R. (1997), „A Survey of Augmented Reality“, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 6, S. 355–385.
- Azuma, R., Bailiot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S. und MacIntyre, B. (2001), „Recent Advances in Augmented Reality“, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 21 No. 6, S. 34–47.
- Bacca, J., Baldiris, S., Fabregat, R., Kinshuk und Graf, S. (2015), „Mobile Augmented Reality in Vocational Education and Training“, *Procedia Computer Science*, Bd. 75, Elsevier B.V., S. 49–58.

- Barthelmäs, N., Flad, D., Haußmann, T., Kupke, T., Schneider, S. und Selbach, K. (2017), „Industrie 4.0 – eine industrielle Revolution?“, in Andelfinger, V. P. und Hänisch, T. (Hrsg.), *Industrie 4.0: Wie cyber-physische Systeme die Arbeitswelt verändern*, Springer Gabler, Wiesbaden, S. 33–56.
- Becker, M. (2018a), „Beobachtungsverfahren“, in Rauner, F. (Hrsg.), *Handbuch Berufsbildungsforschung*, 3. Auflage, wbv Media, Bielefeld, S. 758–763.
- Becker, M. (2018b), „Handlungsorientierte Fachinterviews“, in Rauner, F. (Hrsg.), *Handbuch Berufsbildungsforschung*, 3. Auflage, wbv Media, Bielefeld, S. 730–735.
- Becker, M. und Spöttl, G. (2008), *Berufswissenschaftliche Forschung: Ein Arbeitsbuch für Studium und Praxis*, Peter Lang (Hrsg.), Frankfurt am Main.
- Berns, F., Weber, M.-A. und Strauß, H. (2023), „Physische Belastungen und Beanspruchungen von Augmented-Reality-Brillen“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Walter de Gruyter, Berlin/Boston, Vol. 118 No. 6, S. 443–447.
- Berryman, D. R. (2012), „Augmented Reality: A Review“, *Medical Reference Services Quarterly*, Routledge, Vol. 31 No. 2, S. 212–218.
- Bezmalinovic, T. (2022), „Augmented Reality: So steht es um die Zukunftstechnologie“, *Mixed.de by Deep Content GbR*, verfügbar unter: <https://mixed.de/augmented-reality-hardware-definitionen/> (letzter Zugriff: 01.03.2023).
- Biene, R., Bodtländer, M., Bollinger, L., Buchholz, T., Ebert, J., Eckertz, D., Evers, D., *et al.* (2021), „Augmented und Virtual Reality – Potenziale und praktische Anwendung immersiver Technologien“, Bitkom e. V., Berlin, verfügbar unter: https://www.bitkom.org/sites/default/files/2021-04/210330_if_ar_vr.pdf (letzter Zugriff: 01.03.2023).
- Billie, G. (2011), „Microsoft Kinect Sensor Evaluation“, *NASA USRP – Internship Final Report*, Houston.

- Bornwasser, M. (2020), „Montage und Komplexität“, in Bornwasser, M. und Hinrichsen, S. (Hrsg.), *Informatorische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage: Theorie und Praxis*, Springer, Berlin/Heidelberg, S. 43–64.
- Bortz, J. und Döring, N. (2006), *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*, 4. Auflage, Springer Medizin Verlag, Heidelberg.
- Bretschneider, M. und Schwarz, H. (2015), „Ordnung in der Verordnung - Eine Heuristik zur Strukturierung von Ausbildungsberufen“, *Berufsbildung in Wissenschaft und Praxis*, Franz Steiner Verlag, Vol. 44 No. 4, S. 48–52.
- Buchner, J., Buntins, K. und Kerres, M. (2021), „The impact of augmented reality on cognitive load and performance: A systematic review“, *Journal of Computer Assisted Learning*, John Wiley and Sons Inc, Vol. 38(1), S. 285–303.
- Carmigniani, J. und Furht, B. (2011), „Augmented Reality: An Overview“, in Furht, B. (Hrsg.), *Handbook of Augmented Reality*, Springer Science & Business Media, S. 3–46.
- Carmigniani, J., Furht, B., Anisetti, M., Ceravolo, P., Damiani, E. und Ivkovic, M. (2011), „Augmented reality technologies, systems and applications“, *Multimedia Tools and Applications*, Springer Science & Business Media, Vol. 51 No. 1, S. 341–377.
- Caudell, T. P. und Mizell, D. W. (1992), „Augmented Reality: An Application of Heads-Up Display Technology to Manual Manufacturing Processes“, *Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences*, Bd. 2, IEEE, S. 659–669.
- Culler, J. (1986), *Ferdinand de Saussure*, Cornell University Press, New York.
- Dana Aftermarket. (2023), *Tipps und Informationen für die Praxis: Expertenwissen rund um die Motorabdichtung*, verfügbar unter: <https://www.victorreinz.com/DE/Service-Downloads/Praxisinformationen/PTFE-Radial-Wellendichtringe-und-Montage.aspx?region> (letzter Zugriff: 14.08.2023).

- Dehnbostel, P. (1998), „Lernorte, Lernprozesse und Lernkonzepte im lernenden Unternehmen aus berufspädagogischer Sicht“, in Dehnbostel, P., Erbe, H.-H. und Novak, H. (Hrsg.), *Berufliche Bildung im lernenden Unternehmen. Zum Zusammenhang von betrieblicher Reorganisation, neuen Lernkonzepten und Persönlichkeitsentwicklung*, Edition Sigma, Berlin, S. 115–134.
- Dehnbostel, P. (2018), „Lernen im Prozess der Arbeit als Kompetenzentwicklung“, in Rauner, F. (Hrsg.), *Handbuch Berufsbildungsforschung*, 3. Auflage, wbv Media, Bielefeld, S. 392–399.
- Dehnbostel, P. und Lindemann, H.-J. (2007), „Kompetenzen und Bildungsstandards in der schulischen und betrieblichen Berufsbildung“, in Dehnbostel, P., Lindemann, H.-J. und Ludwig, C. (Hrsg.), *Lernen im Prozess der Arbeit in Schule und Betrieb*, Waxmann Verlag, Münster, S. 179–197.
- Destatis. (2023), „Kleine und mittlere Unternehmen - Anteile Kleine und Mittlere Unternehmen 2021 nach Größenklassen in %“, *Statistisches Bundesamt (Destatis)*, verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Unternehmen/Kleine-Unternehmen-Mittlere-Unternehmen/Tabellen/wirtschaftsabschnitte-insgesamt.html> (letzter Zugriff: 27.09.2023).
- Dombrowski, U., Riechel, C. und Evers, M. (2014), „Industrie 4.0 – Die Rolle des Menschen in der vierten industriellen Revolution“, in Kersten, W., Koller, H. und Lödding, H. (Hrsg.), *Industrie 4.0. Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern*, GITO mbh Verlag, Berlin, Vol. 4, S. 129–153.
- Dreher, R. (2015), „A Benchmark for Curricula in Engineering Education: The Leonardic Oath“, *2015 International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL)*, IEEE, Florenz, S. 722–724.
- Dreher, R. (2020), „Handlung oder Handling? Zur Bedeutung von Berufsbildung innerhalb digitalisierter Wertschöpfungsketten“, *Digitalisierung über berufliche Bildung gestalten*, W. Bertelsmann Verlag, Bielefeld, S. 181–193.

- Dreher, R. und Reineking, A. (2024), „Augmented Reality in der Instandhaltung – Eine neue berufliche Gestaltungsaufgabe?“, in Grimm, A., Herkner, V., Karges, T. und Schlausch, R. (Hrsg.), *Dekarbonisierung, Digitalisierung, Demographie – Gestaltungsanspruch für gewerblich-technische Facharbeit und Bildung. Tagungsband zur 22. gtw-Konferenz anlässlich 25 Jahre biat*, Peter Lang Verlag, Berlin, S. 213-225.
- Drescher, E. (1996), *Was Facharbeiter können müssen: Elektroinstandhaltung in der vernetzten Produktion*, Donat, Bremen.
- Dreyfus, H. L. und Dreyfus, S. E. (1987), *Künstliche Intelligenz: Von den Grenzen der Denkmachine und dem Wert der Intuition*, Rowohlt Verlag, Hamburg.
- Dreyfus, H. L. und Dreyfus, S. E. (1992), „What Artificial Experts Can and Cannot Do“, *AI & society*, Springer Verlag, London, Vol. 6, S. 18–26.
- Dubs, R. (1995), „Konstruktivismus: einige Überlegungen aus der Sicht der Unterrichtsgestaltung“, *Zeitschrift für Pädagogik*, Vol. 41 No. 6, S. 889–903.
- Engeström, Y. (1987), „Learning by Expanding: An Activity-Theoretical Approach to Developmental Research“, Cambridge University Press, Helsinki: Orienta-Konsultit.
- Euler, D. und Sloane, P. (2018), „Design-Based Research“, in Rauner, F. (Hrsg.), *Handbuch Berufsbildungsforschung*, 3. Auflage, wbv Media, Bielefeld, S. 782–790.
- Fehling, C. D. (2017), „Erweiterte Lernwelten für die berufliche Bildung. Augmented Reality als Perspektive“, *Lernen in virtuellen Räumen*, De Gruyter, S. 125–142.
- Fehling, C. D., Goertz, L. und Hagenhofer, T. (2015), „Didaktisches Konzept des Projektes Social Augmented Learning“, verfügbar unter: https://www.social-augmented-learning.de/wp-content/uploads/2015/04/SAL_Didaktisches_Konzept_20150409.pdf (letzter Zugriff: 25.02.2023).
- Fischer, M. (2018), „Arbeitsprozesswissen“, in Rauner, F. (Hrsg.), *Handbuch Berufsbildungsforschung*, 3. Auflage, wbv Media, Bielefeld, S. 413–428.

- Fischer, M. und Spöttl, G. (2008), *Forschungsperspektiven in Facharbeit und Berufsbildung: Strategien und Methoden der Berufsbildungsforschung*, Peter Lang Internationaler Verlag der Wissenschaft, Frankfurt am Main.
- Fischer, P. (2007), *Berufserfahrung älterer Führungskräfte als Ressource*, Deutscher Universitäts-Verlag | GWV Fachverlage, Wiesbaden.
- Franz, J. und Wehnert, C. (2020), „Digitale Lernumwelten in produzierenden Betrieben“, *Hessische Blätter für Volksbildung: Digitalisierung in der Erwachsenenbildung*, Hessischer Volkshochschulverband e.V. (hvv) (Hrsg.), No. 3, S. 34–43.
- Fredrich, H., Dick, M. und Haase, T. (2021), „Zur Passung von Arbeitsanforderungen und digitalen Assistenztechnologien in handwerklichen und industriellen Montageprozessen“, *Arbeit HUMAINE gestalten*, GfA, Dortmund (Hrsg.), Bochum, Vol. 67 No. B.17.2.
- Friedewald, A., Halata, P. S., Meluzov, N. und Lödding, H. (2016), „Die Produktivitätswirkung von Augmented Reality in der Unikatfertigung“, *Megatrend Digitalisierung-Potenziale der Arbeits- und Betriebsorganisation*, GITO Berlin, S. 141–162.
- Funk, M., Kosch, T., Kettner, R., Korn, O. und Schmidt, A. (2016), „motionEAP: An Overview of 4 Years of Combining Industrial Assembly with Augmented Reality for Industry 4.0“, *Proceedings of the 16th International Conference on Knowledge Technologies and Data-driven Business*, Hochschule Offenburg.
- Gartner. (2022), „Gartner Hype Cycle“, verfügbar unter: <https://www.gartner.de/de/methoden/hype-cycle> (letzter Zugriff: 03.09.2022).

- Goppold, M., Kreischer, S., Klatt, M., Dunsche, L., Döhring, T., Tackenberg, S., Frenz, M., *et al.* (2021), „Leitidee Ökologie als Nachhaltigkeitsdimension in Lernprozessen für zukünftige Fachkräfte in der Kunststofftechnik – Beispielhafte Lern- und Arbeitsaufgabe zur Wahl von Fertigungsparametern mit einem Augmented Reality Lernsystem“, 26. *Interdisziplinäre Wissenschaftliche Konferenz Mittweida*, Hochschule Mittweida, Mittweida, S. 100–104.
- Günzel, A. und Yamen, M. (2020), „Digital Taylorism as an Answer to the Requirements of the New Era“, in Akkaya, B. (Hrsg.), *Agile Business Leadership Methods for Industry 4.0*, Emerald Publishing Limited, S. 103–119.
- Haase, T., Keller, A., Radde, J., Berndt, D., Fredrich, H. und Dick, M. (2020), „Anforderungen an die lerntheoretische Gestaltung arbeitsplatzintegrierter VR-/AR-Anwendungen“, *Digitaler Wandel, digitale Arbeit, digitaler Mensch*, GfA, Dortmund (Hrsg.), Berlin, No. B.16.1, S. 1–6.
- Hahn, H.-W. (2011), *Die Industrielle Revolution in Deutschland*, 3. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, verfügbar unter: <https://doi.org/doi:10.1524/9783486702491>.
- Hegenberg, J. und Schmidt, L. (2021), „Augmented-Reality-basierte Assistenz für das Anlernen manueller und roboterunterstützter Montageprozesse“, *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, Springer Verlag, Vol. 75 No. 4, S. 367–387.
- Herdina, M. (2020), „Augmented Reality Disappeared From Gartner’s Hype Cycle - What’s Next?“, *ARPost | Augmented Reality & Virtual Reality News*, verfügbar unter: <https://arpost.co/2020/09/25/augmented-reality-gartners-hype-cycle/> (letzter Zugriff: 03.09.2022).
- Herkner, V. (2008), „Zum einhundertsten Jahrestag der Gründung des DATSCH“, *Lernen & Lehren: Elektrotechnik-Informatik und Metalltechnik*, Heckner Druck- und Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, Wolfenbüttel, Vol. 92, S. 172–177.

- Hirsch-Kreinsen, H. und ten Hompel, M. (2017), „Digitalisierung industrieller Arbeit: Entwicklungsperspektiven und Gestaltungsansätze“, in Vogel-Heuser, B., Bauernhansl, T. und ten Hompel, M. (Hrsg.), *Handbuch Industrie 4.0 Bd.3: Logistik*, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, S. 357–376.
- Hirsch-Kreinsen, H. und Itterman, P. (2017), „Drei Thesen zu Arbeit und Qualifikation in Industrie 4.0“, in Jenewein, K., Friese, M. und Spöttl, G. (Hrsg.), *Industrie 4.0: Risiken und Chancen für die Berufsbildung*, W. Bertelsmann Verlag, Bielefeld, Vol. 44, S. 131–151.
- Hirsch-Kreinsen, H. und Weyer, J. (2014), „Wandel von Produktionsarbeit - ,Industrie 4.0‘“, in Hirsch-Kreinsen, H. und Weyer, J. (Hrsg.), *Soziologisches Arbeitspapier Nr. 38/2014*, Technische Universität Dortmund, Dortmund.
- Hořejší, P. (2015), „Augmented Reality System for Virtual Training of Parts Assembly“, *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd., Vol. 100, S. 699–706.
- Ittermann, P. und Niehaus, J. (2018), „Industrie 4.0 und Wandel von Industriearbeit – revisited. Forschungsstand und Trendbestimmungen“, *Digitalisierung industrieller Arbeit*, Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, S. 33–60.
- Kagermann, H. (2014), „Chancen von Industrie 4.0 nutzen“, in Bauernhansl, T., ten Hompel, M. und Vogel-Heuser, B. (Hrsg.), *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung · Technologien · Migration*, Springer Vieweg, Wiesbaden, S. 603–614.
- Karges, T. (2017), „*Wissensmanagement und Kommunikationsprozesse im Kfz-Service: Bedeutung und Perspektiven für die Facharbeit in Kfz-Werkstätten*“, Bd. 48, W. Bertelsmann Verlag, Bielefeld.
- Kirschner, P. A. (2002), „Cognitive load theory: implications of cognitive load theory on the design of learning“, *Learning and Instruction*, Elsevier Science Ltd., Vol. 12 No. 1, S. 1–10.
- Kleiner, M. (2004), „Berufswissenschaftliche Qualifikationsforschung im Kontext der Curriculumentwicklung“, *Dissertation*, Universität Bremen.

- Kosch, T., Kettner, R., Funk, M. und Schmidt, A. (2016), *MotionEAP-Ein System zur Effizienzsteigerung und Assistenz bei Produktionsprozessen in Unternehmen auf Basis von Bewegungserkennung und Projektion.*, Universität Stuttgart.
- Krauß, M. (2022), „Ranking - Das sind die 100 größten deutschen Weltmarktführer“, *Vogel Communications Group*, verfügbar unter: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/das-sind-die-100-groessten-deutschen-weltmarktfuehrer-a-7ba2686d0f4ec5f9721a11ada6cfae70/> (letzter Zugriff: 27.09.2023).
- Van Krevelen, D. W. F. und Poelman, R. (2010), „A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations“, *International Journal of Virtual Reality*, Delft University of Technology, Vol. 9 No. 2, S. 1–20.
- Kruse, W. (1986), „Von der Notwendigkeit des Arbeitsprozess-Wissens“, in Schweizer, J. (Hrsg.), *Bildung für eine menschliche Zukunft*, Juventa Verlag, Weinheim, S. 188–193.
- Kuda, E., Strauß, J., Spöttl, G. und Kaßbaum, B. (2012), „Akademisierung als Herausforderung für berufliche Bildung“, in Kuda, E., Strauß, J., Spöttl, G. und Kaßbaum, B. (Hrsg.), *Akademisierung der Arbeitswelt? Zur Zukunft der beruflichen Bildung*, VSA: Verlag, Hamburg, S. 10–18.
- Kultusministerkonferenz. (2011), „Rahmenlehrplan für den Ausbildungsberuf Technischer Produktdesigner/Technische Produktdesignerin“, *Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 27.05.2011*, verfügbar unter: https://www.kmk.org/fileadmin/pdf/Bildung/BeruflicheBildung/rlp/Technische_rProduktDesigner11-05-27-E.pdf (letzter Zugriff: 23.09.2023).
- Lehberger, J. (2013), *Arbeitsprozesswissen - didaktisches Zentrum für Bildung und Qualifizierung*, Bd. 25, LIT Verlag, Münster.
- Lehberger, J. (2018), „Gestaltung und Evaluation beruflicher Bildungsprozesse“, in Rauner, F. (Hrsg.), *Handbuch Berufsbildungsforschung*, 3. Auflage, wbv Media, Bielefeld, S. 472–481.

- Lehberger, J. und Rauner, F. (2017), „Berufliches Lernen in Lernfeldern: Ein Leitfaden für die Gestaltung und Organisation projektförmigen Lernens in berufsbildenden Schulen“, *A + B PRAXIS Forschungsberichte*, FG Berufsbildungsforschung (I:BB), Bremen, No. 1.
- Mandl, H., Friedrich, H. F. und Hron, A. (1988), „Theoretische Ansätze zum Wissenserwerb“, in Mandl, H. und Spada, H. (Hrsg.), *Wissenspsychologie*, Psychologie Verlags Union München, Weinheim, S. 123–160.
- Mehler-Bicher, A. und Steiger, L. (2014), *Augmented reality: Theorie und Praxis*, 2. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München.
- Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A. und Kishino, F. (1995), „Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum“, *Telemanipulator and telepresence technologies*, Bd. 2351, International Society for Optics and Photonics, S. 282–292.
- Miller, G. A. (1956), „The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information“, *The Psychological Review*, American Psychological Association, Vol. 63 No. 2, S. 81–96.
- Minor, J. (2021), „Google Glass vor Comeback? Neun Jahre später – ist die Zeit nun endlich reif für Googles Datenbrille?“, *googlewatchblog.de*, verfügbar unter: <https://www.googlewatchblog.de/2021/06/google-glass-comeback-neun/> (letzter Zugriff: 01.03.2023).
- Muñoz-Saavedra, L., Miró-Amarante, L. und Domínguez-Morales, M. (2020), „Augmented and Virtual Reality Evolution and Future Tendency“, *Applied Sciences (Switzerland)*, MDPI AG, Vol. 10 No. 1, verfügbar unter: <https://doi.org/10.3390/app10010322>.
- Munz, C., Rainer, M. und Elisabeth, P.-S. (2012), „Berufsbiografische Gestaltungsfähigkeit als neue Schlüsselkompetenz“, in Westhoff, G., Jenewein, K. und Ernst, H. (Hrsg.), *Kompetenzentwicklung in der flexiblen und gestaltungsoffenen Aus- und Weiterbildung*, W. Bertelsmann Verlag, Bielefeld, S. 141–150.

- Neuweg, G. H. (2021), „Was ist implizites Wissen? Vortrag am 20. Juni 2021 am 7. Festival der Philosophie in Hannover.“, Hannover, verfügbar unter: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31790.43847>.
- Neuweg, G. H. (2005), „Emergenzbedingungen pädagogischer Könnerschaft“, in Heid, H. und Harteis, C. (Hrsg.), *Verwertbarkeit: Ein Qualitätskriterium (erziehungs-) wissenschaftlichen Wissens?*, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, S. 205–228.
- Neuweg, G. H. (2018), „Implizites Wissen als Forschungsgegenstand“, in Rauner, F. (Hrsg.), *Handbuch Berufsbildungsforschung*, 3. Auflage, wbv Media, Bielefeld, S. 713–720.
- Niegemann, H. (2020), „Instructional Design“, in Niegemann, H. und Weinberger, A. (Hrsg.), *Handbuch Bildungstechnologie: Konzeption und Einsatz digitaler Lernumgebungen*, Springer Verlag, Berlin, S. 95–152.
- Niegemann, H., Domagk, S., Hessel, S., Hein, A., Hupfer, M. und Zobel, A. (2008), *Kompendium multimediales Lernen*, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg.
- Nonaka, I. und Takeuchi, H. (1997), *Die Organisation des Wissens: Wie japanische Unternehmen eine brachliegende Ressource nutzbar machen*, Campus Verlag, Frankfurt/Main.
- Pahl, J.-P. (2015), *Lexikon Berufsbildung: Ein Nachschlagewerk für die nicht-akademischen und akademischen Bereiche*, herausgegeben von Pahl, J.-P., W. Bertelsmann Verlag, Bielefeld.
- Pfeifroth, T., Dietsch, M. und Mahlandt, R. (2021), „Werkerassistenz in der manuellen Montage“, *wt Werkstattstechnik online*, Vol. 111 No. 03, S. 102–106.
- Polanyi, M. (1966), *The Tacit Dimension*, Routledge, New York.
- Polanyi, M. (1985), *Implizites Wissen*, Suhrkamp, Frankfurt am Main.
- Putz-Osterloh, W. (1988), „Wissen und Problemlösen“, *Wissenspsychologie*, München Psychologie Verlags Union, München, S. 247–263.

- Rat für deutsche Rechtschreibung. (2023), „Amtliches Regelwerk der deutschen Rechtschreibung: Ergänzungspassus Sonderzeichen“, *Pressemitteilung vom 14.07.2023*.
- Rauner, F. (2004), „Praktisches Wissen und berufliche Handlungskompetenz“, *Europäische Zeitschrift für Berufsbildung*, Cedefop – Europäisches Zentrum für die Förderung der Berufsbildung, Thessaloniki, Vol. 40 No. 1, S. 57–72.
- Rauner, F. (2005), „Berufswissenschaftliche Arbeitsstudien: Zum Gegenstand und zu den Methoden der empirischen Untersuchung berufsförmig organisierter Facharbeit“, *ITB-Arbeitspapiere Nr. 58*, Institut Technik und Bildung (ITB), Universität Bremen.
- Rauner, F. (2013), „Multiple Kompetenz: Die Fähigkeit der holistischen Lösung beruflicher Aufgaben“, *A + B PRAXIS Forschungsberichte*, FG Berufsbildungsforschung (I:BB), Bremen, No. 10.
- Rauner, F. (2017a), *Grundlagen beruflicher Bildung: Mitgestalten der Arbeitswelt*, wbv Media, Bielefeld.
- Rauner, F. (2017b), *Methodenhandbuch: Messen und Entwickeln beruflicher Kompetenzen (COMET)*, wbv Media, Bielefeld.
- Rauner, F. (2021), *Gestaltungskompetenz - Die Leitidee der modernen Berufsbildung*, Springer Nature, Wiesbaden.
- Rauner, F., Heinemann, L., Maurer, A., Ji, L. und Zhao, Z. (2011), *Messen beruflicher Kompetenzen Band III: Drei Jahre KOMET-Testerfahrung*, herausgegeben von Arnold, R., Gonon, P. und Rauner, F., Bd. 24, LIT Verlag, Münster.
- Rauner, F. und Zhao, Z. (2018), „Aus KOMET wird COMET: Kompetenz(Competence)diagnostik in der beruflichen Bildung“, in Rauner, F. (Hrsg.), *Handbuch Berufsbildungsforschung*, 3. Auflage, wbv Media, Bielefeld, S. 667–673.
- Reineking, A. (2022a), „Von der Überbetrieblichen in die betriebliche Ausbildung: Der Weg von Augmented Reality in die Industrie von morgen“, *Lernen & Lehren*, Vol. 37 No. 147, S. 130–134.

- Reineking, A. (2022b), „Projekt ARiBB: Augmented Reality als Teil der beruflichen Bildung von morgen“, in Frye, S., Haertel, T. und Kammasch, G. (Hrsg.), *Technische Bildung für eine Nachhaltige Entwicklung - Wege zu technischer Bildung - Referate der 16. Ingenieurpädagogischen Regionaltagung 2022*, Ingenieur-Pädagogische Wissenschaftsgesellschaft, Dortmund, S. 329–332.
- Reinmann, G. (2005), „Innovation ohne Forschung? Ein Plädoyer für den Design-Based Research-Ansatz in der Lehr-Lernforschung“, *Unterrichtswissenschaft: Zeitschrift für Lernforschung*, Deutsches Institut für Internationale Pädagogische Forschung (DIPF), Frankfurt am Main, Vol. 33 No. 1, S. 52–69.
- Reinmann, G. (2007), „Innovationskrise in der Bildungsforschung: Von Interessenkämpfen und ungenutzten Chancen einer Hard-to-do-Science“, in Reinmann, G. und Kahlert, J. (Hrsg.), *Der Nutzen wird vertagt.... Bildungswissenschaften im Spannungsfeld zwischen wissenschaftlicher Profilbildung und praktischem Mehrwert*, Pabst Science Publishers, Lengerich, S. 198–220.
- Reinmann, G. (2019), „Die Selbstbezüglichkeit der hochschuldidaktischen Forschung und ihre Folgen für die Möglichkeiten des Erkennens“, in Jenert, T., Reinmann, G. und Schmohl, T. (Hrsg.), *Hochschulbildungsforschung: Theoretische, methodologische und methodische Denkanstöße für die Hochschuldidaktik*, Springer Verlag, Wiesbaden, S. 125–148.
- Reinmann, G. (2021), *Reader zu Design-Based Research (DBR)*, Hamburg, verfügbar unter: https://gabi-reinmann.de/wp-content/uploads/2020/12/Reader_DBR_Jan-2021.pdf (letzter Zugriff: 01.03.2023).
- Reinmann, G. und Sesink, W. (2011), „Entwicklungsorientierte Bildungsforschung“, *Diskussionspapier: Vorge stellt auf der Herbsttagung der Sektion Medienpädagogik der DGfE*, Universität Leipzig.
- Röben, P. (2017), „Industrie 4.0: Eine Revolution mit Ankündigung“, in Spöttl, G. und Windelband, L. (Hrsg.), *Industrie 4.0: Risiken und Chancen für die Berufsbildung*, wbv Media, Bielefeld, Vol. 44, S. 23–47.

- Röhner, J. und Schütz, A. (2012), *Psychologie der Kommunikation*, 3. Auflage, Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- Rosenberger, M., Fellmann, M., Lambusch, F., Poppe, M. und Spitzer, M. (2020), „Zur Messung des Einflusses von ‚Augmented Reality‘ auf die individuelle Produktivität bei Montagearbeiten“, *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, Springer Nature, Vol. 57 No. 3, S. 451–464.
- Ryle, G. und Baier, K. (1969), *Der Begriff des Geistes*, Reclam Stuttgart.
- Sachse, U. und Graeb, F. (2019), „Potentiale von Augmented Reality in der beruflichen Aus- und Weiterbildung – Entwicklung und Prototyping AR App Robotik“, *Berufsbildung International - Digitalisierung*, Bonn, S. 32–37.
- Sames, G. und Maibach, T. (2023), „Vergleich der Digitalisierung von Geschäftsprozessen und Geschäftsmodellen in Japan und Deutschland“, *THM-Hochschulschriften*, Technische Hochschule Mittelhessen, Gießen, Vol. 26.
- de Saussure, F. (2011), *Course in General Linguistics*, herausgegeben von Meisel, P. und Saussy, H., Columbia University Press, New York.
- Schwartz, D. L., Chang, J. und Martin, L. (2005), „Instrumentation and Innovation in Design Experiments: Taking the Turn towards Efficiency“, *Internal Paper*, Stanford University, verfügbar unter: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=f20d940f10c2de6b99170eab30fbe5db4034e369> (letzter Zugriff: 06.07.2023).
- SEALWARE International Dichtungstechnik GmbH. (2019), „Radial-Wellendichtringe / Simmerringe (RWDR/WEDI), Montage und Demontage“, verfügbar unter: <https://sealware.de/dichtungen/wellen-und-lagerabdichtungen/simmerringe-radial-wellendichtringe/rwdr-montage-und-demontage/> (letzter Zugriff: 14.08.2023).
- Seel, N. M. und Hanke, U. (2015), *Erziehungswissenschaft*, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg.
- Severing, E. und Teichler, U. (2013), „Akademisierung der Berufswelt? Verberuflichung der Hochschulen?“, *Akademisierung der Berufswelt*, W. Bertelsmann Verlag, Bielefeld, Vol. 13, S. 7–18.

- Shannon, C. und Weaver, W. (1976), „Mathematische Grundlagen der Informationstheorie“, *Scientia nova*, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München.
- Spöttl, G. (2018), „Experten-Facharbeiter-Workshops“, in Rauner, F. (Hrsg.), *Handbuch Berufsbildungsforschung*, 3. Auflage, wbv Media, Bielefeld, S. 740–745.
- Spöttl, G. und Dreher, R. (2009), „Gestaltungsorientierung als didaktische Konzeption in der Berufsbildung“, in Bonz, B. (Hrsg.), *Didaktik und Methodik der Berufsbildung*, Bd. 10, Baltmannsweiler, S. 217-229.
- The Design-Based Research Collective. (2003), „Design-Based Research: An Emerging Paradigm for Educational Inquiry“, *Educational Researcher*, American Educational Research Association, Vol. 32 No. 1, S. 5–8.
- Vaughan-Nichols, S. J. (2009), „Augmented Reality: No Longer a Novelty?“, *Computer*, IEEE, Vol. 42 No. 12, S. 19–22.
- Watzlawick, P., Beavin, J. und Jackson, D. (1969), *Menschliche Kommunikation: Formen, Störungen, Paradoxien*, Hogrefe AG, Bern.
- Wentura, D. und Frings, C. (2012), *Kognitive Psychologie*, Springer Verlag, Wiesbaden.
- Wiemer, C. (2015), „Autorenlernen als Form des Tutoriums - Tablet-Einsatz mit System“, *Fachtagung Ernährung und Hauswirtschaft – Herausforderungen und Chancen zwischen Heterogenität, Inklusion und Profilbildung*, Berufs- und Wirtschaftspädagogik - online, Vol. 9, S. 1–14.
- Wille, M. (2016), „Head-Mounted Displays - Bedingungen des sicheren und beanspruchungsoptimalen Einsatzes: Psychische Beanspruchung beim Einsatz von HMDs“, *Forschung Projekt F 2288*, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund.

Anhang

A1 Fragebogen zur Montage des Doppelmembranzyllinders



Fragebogen zur AR-Montage des Doppelmembranzyllinders

1. Beruflicher Hintergrund

Datum: _____

Fachgebiet: _____

Position: _____

2. Fragen zur Benutzerfreundlichkeit des AR-Systems

	Sehr einfach zu bedienen	Einfach zu bedienen	Weder einfach noch schwierig	Schwierig zu bedienen	Sehr schwierig zu bedienen
Wie bewerten Sie die Benutzerfreundlichkeit des AR-Systems auf dem Tablet	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wie gut hat das AR-System auf Ihre Interaktionen reagiert (z.B. Berührung, Gesten, Bewegungen)?	Sehr gut <input type="checkbox"/>	Ziemlich gut <input type="checkbox"/>	Durchschnittlich <input type="checkbox"/>	Nicht sehr gut <input type="checkbox"/>	Überhaupt nicht gut <input type="checkbox"/>
Wie angemessen empfanden Sie den Informationsumfang im AR-System?	Deutlich überinformiert <input type="checkbox"/>	Etwas zu viele Informationen <input type="checkbox"/>	Angemessener Umfang <input type="checkbox"/>	Teilweise lückenhaft <input type="checkbox"/>	Zu wenig Informationen <input type="checkbox"/>

3. Fragen zur Qualität der AR-Anleitung

	Sehr hilfreich	Ziemlich hilfreich	Weder hilfreich noch hinderlich	Eher hinderlich	Sehr hinderlich
Wie hilfreich fanden Sie die AR-Anleitung bei der Montage der Baugruppe?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wie würden Sie den Mehrwert der AR-Anleitung im Vergleich zu traditionellen schriftlichen oder bildlichen Anleitungen bewerten?	Sehr viel besser <input type="checkbox"/>	Etwas besser <input type="checkbox"/>	Ungefähr gleich <input type="checkbox"/>	Etwas schlechter <input type="checkbox"/>	Viel schlechter <input type="checkbox"/>
Wie empfanden Sie die visuelle Qualität der AR-Darstellungen?	Sehr gut <input type="checkbox"/>	Ziemlich gut <input type="checkbox"/>	Durchschnittlich <input type="checkbox"/>	Nicht sehr gut <input type="checkbox"/>	Schlecht <input type="checkbox"/>
Wie klar und verständlich waren die Text- und/oder Sprachanweisungen in der AR-Anleitung?	Sehr klar <input type="checkbox"/>	Ziemlich klar <input type="checkbox"/>	Weder klar noch unklar <input type="checkbox"/>	Eher unklar <input type="checkbox"/>	Sehr unklar <input type="checkbox"/>
Wie einfach war es, mit der AR-Anleitung die richtigen Werkzeuge und Komponenten für die Montage der Baugruppe zu identifizieren?	Sehr einfach <input type="checkbox"/>	Ziemlich einfach <input type="checkbox"/>	Weder einfach noch schwierig <input type="checkbox"/>	Eher schwierig <input type="checkbox"/>	Sehr schwierig <input type="checkbox"/>

4. Fragen zum Lernprozess und zur Effektivität

Wie sehr haben Sie sich auf die AR-Anleitung verlassen müssen, um die Baugruppe zu montieren?	Vollständig auf die Anleitung angewiesen <input type="checkbox"/>	Überwiegend auf die Anleitung angewiesen <input type="checkbox"/>	Teils teils <input type="checkbox"/>	Überwiegend unabhängig von der Anleitung <input type="checkbox"/>	Vollständig unabhängig von der Anleitung <input type="checkbox"/>
	Ja, absolut	Wahrscheinlich ja	Unsicher	Wahrscheinlich nein	Definitiv nein
Haben Sie nach dem Durchlaufen der AR-Anleitung das Gefühl, dass Sie die Aufgabe selbstständig erledigen könnten?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

5. Fragen zur Anpassung der AR-Anleitung

Wie beurteilen Sie ihre Fähigkeit, die AR-Anleitung anzupassen?	Sehr einfach <input type="checkbox"/>	Ziemlich einfach <input type="checkbox"/>	Weder einfach noch schwierig <input type="checkbox"/>	Eher schwierig <input type="checkbox"/>	Sehr schwierig <input type="checkbox"/>
Wie intuitiv war die Bearbeitungsfunktion des AR-Autorensystems?	Sehr intuitiv <input type="checkbox"/>	Ziemlich intuitiv <input type="checkbox"/>	Weder intuitiv noch verwirrend <input type="checkbox"/>	Eher verwirrend <input type="checkbox"/>	Sehr verwirrend <input type="checkbox"/>
Würden Sie die Möglichkeit, die AR-Anleitung selbst anzupassen, als vorteilhaft ansehen?	Ja, sehr <input type="checkbox"/>	Ja, ein wenig <input type="checkbox"/>	Neutral <input type="checkbox"/>	Eher nicht <input type="checkbox"/>	Überhaupt nicht <input type="checkbox"/>

6. Fragen zum Einfluss auf den Nutzer

Fanden Sie die AR-Anleitung motivierend und ansprechend für die Aufgabe?	Sehr motivierend <input type="checkbox"/>	Ziemlich motivierend <input type="checkbox"/>	Neutral <input type="checkbox"/>	Eher demotivierend <input type="checkbox"/>	Sehr demotivierend <input type="checkbox"/>
Wie hat sich die Nutzung der AR-Anleitung auf Ihre Selbstsicherheit bei der Montage der Baugruppe ausgewirkt?	Stark verbessert <input type="checkbox"/>	Etwas verbessert <input type="checkbox"/>	Keinen Unterschied bemerkt <input type="checkbox"/>	Etwas verschlechtert <input type="checkbox"/>	Stark verschlechtert <input type="checkbox"/>
Fühlten Sie sich durch das AR-System in irgendeiner Weise abgelenkt oder überfordert?	Sehr abgelenkt/überfordert <input type="checkbox"/>	Etwas abgelenkt/überfordert <input type="checkbox"/>	Weder abgelenkt noch überfordert <input type="checkbox"/>	Etwas fokussierter <input type="checkbox"/>	Deutlich fokussierter <input type="checkbox"/>
Haben Sie das AR-System als hilfreiche Ergänzung zu Ihrer traditionellen Ausbildung erlebt?	Ja, sehr <input type="checkbox"/>	Ja, ein wenig <input type="checkbox"/>	Neutral <input type="checkbox"/>	Eher nicht <input type="checkbox"/>	Überhaupt nicht <input type="checkbox"/>

7. Fragen zur zukünftigen Nutzung

Wie wahrscheinlich würden Sie AR-Anleitungen für zukünftige Montageaufgaben verwenden?	Sehr wahrscheinlich <input type="checkbox"/>	Wahrscheinlich <input type="checkbox"/>	Vielleicht <input type="checkbox"/>	Eher unwahrscheinlich <input type="checkbox"/>	Sehr unwahrscheinlich <input type="checkbox"/>
Wie wahrscheinlich ist es, dass Sie das AR-System zur Anleitung in anderen Bereichen oder Aufgaben verwenden würden?	Sehr wahrscheinlich <input type="checkbox"/>	Wahrscheinlich <input type="checkbox"/>	Vielleicht <input type="checkbox"/>	Eher unwahrscheinlich <input type="checkbox"/>	Sehr unwahrscheinlich <input type="checkbox"/>

A2 Bewertungsbogen COMET (gewerblich-technische Berufe)

KOMET Bewertungsbogen; i:BB, Uni Bremen, Prof. Dr. Dr.h.c. Rauner

Bewertungsbogen (gewerblich-technische Berufe)

Proband (Code):

Bewerterin/Bewerter:

Aufgabe:

Die Anforderung ist ...				
voll erfüllt	eher erfüllt	eher nicht erfüllt	keineswegs erfüllt	
3	2	1	0	

(1) Anschaulichkeit/Präsentation

1	Ist die Darstellungsform der Lösung geeignet, um sie mit dem Auftraggeber zu besprechen?	<input type="checkbox"/>				
2	Ist die Lösung für Fachleute angemessen dargestellt?	<input type="checkbox"/>				
3	Wird die Lösung der Aufgabe veranschaulicht (z. B. grafisch/zeichnerisch)?	<input type="checkbox"/>				
4	Wird die Lösung der Aufgabe strukturiert und übersichtlich dargestellt?	<input type="checkbox"/>				
5	Ist die Darstellung der Lösung für den Sachverhalt angemessen (z. B. fachtheor., fachprakt., zeichn., mathem., sprachlich-begründend)?	<input type="checkbox"/>				

(2) Funktionalität

6	Ist die Lösung funktionsfähig?	<input type="checkbox"/>				
7	Wird der "Stand der Technik" berücksichtigt?	<input type="checkbox"/>				
8	Wird die praktische Realisierbarkeit berücksichtigt?	<input type="checkbox"/>				
9	Werden die berufsfachlichen Zusammenhänge angemessen dargestellt und begründet?	<input type="checkbox"/>				
10	Sind die Darstellungen und Erläuterungen richtig?	<input type="checkbox"/>				

(3) Gebrauchswertorientierung

1	Ist die Wartungs- und Reparaturfreundlichkeit im Lösungsvorschlag erfüllt?	<input type="checkbox"/>				
2	Werden Aspekte der längerfristigen Verwendbarkeit und Erweiterungsmöglichkeiten in der Lösung berücksichtigt und begründet?	<input type="checkbox"/>				
3	Wird der Aspekt der Vermeidung der Störanfälligkeit in der Lösung berücksichtigt und begründet?	<input type="checkbox"/>				
4	Wie groß ist die Nutzerfreundlichkeit der Lösung für die unmittelbaren Nutzer/Anwender/Bediener?	<input type="checkbox"/>				
5	Wie hoch ist der Gebrauchswert der Lösung für den Auftraggeber/Kunden?	<input type="checkbox"/>				

(4) Wirtschaftlichkeit

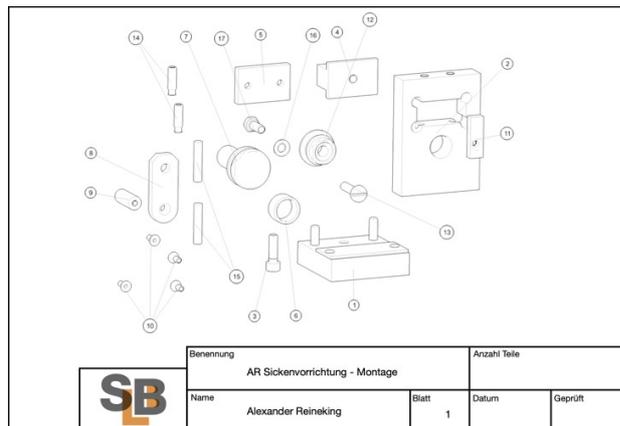
6	Ist die Realisierung der Lösung unter dem Aspekt der sächlichen Kosten wirtschaftlich?	<input type="checkbox"/>				
7	Ist die Realisierung der Lösung in Bezug auf die zeitlichen und personellen Ressourcen angemessen (begründet)?	<input type="checkbox"/>				
8	Wird das Verhältnis zwischen Aufwand und betrieblichem Nutzen berücksichtigt und begründet?	<input type="checkbox"/>				
9	Werden die Folgekosten der Realisierung der Lösungsvariante berücksichtigt und begründet?	<input type="checkbox"/>				
10	Ist die Vorgehensweise bei der Lösung der Aufgabe (Arbeitsprozess) effizient?	<input type="checkbox"/>				

		Die Anforderung ist ...			
		voll erfüllt	eher erfüllt	eher nicht erfüllt	keineswegs erfüllt
		3	2	1	0
	(5) Arbeits- und Geschäftsprozessorientierung				
21	Wird die Lösung in die betriebliche Ablauf- und Aufbauorganisation eingebettet (im eigenen Betrieb/beim Kunden)?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
22	Basieren die Lösungen auf beruflichem Arbeitsprozesswissen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
23	Werden bei der Lösung die vor- und nachgelagerten Prozesse berücksichtigt und begründet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
24	Kommen in den Lösungen berufstypische arbeitsprozessbezogene Fähigkeiten zum Ausdruck?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
25	Werden bei der Lösung Aspekte berücksichtigt, die die Grenzen der eigenen Berufsarbeit überschreiten?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	(6) Sozialverträglichkeit				
26	In wie weit berücksichtigt der Lösungsvorschlag Aspekte humaner Arbeits- und Organisationsgestaltung?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
27	Werden Aspekte des Gesundheitsschutzes berücksichtigt und begründet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
28	Werden ergonomische Gestaltungsaspekte im Lösungsvorschlag berücksichtigt und begründet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
29	Werden die einschlägigen Regelungen und Vorschriften zur Arbeitssicherheit und Unfallverütung beachtet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
30	In wie weit werden in der Lösung auch soziale/gesellschaftliche Folgewirkungen bedacht?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	(7) Umweltverträglichkeit				
31	Werden die einschlägigen Bestimmungen des Umweltschutzes berücksichtigt und begründet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
32	Werden bei der Lösung Materialien verwendet, die den Kriterien der Umweltverträglichkeit genügen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
33	In wie weit berücksichtigt die Lösung eine umweltgerechte Arbeitsgestaltung?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
34	Werden im Lösungsvorschlag die Aspekte Recycling, Wiederverwendung und Nachhaltigkeit berücksichtigt und begründet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
35	Wird den Aspekten der Energieeinsparung und Steigerung der Energieeffizienz Rechnung getragen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	(8) Kreativität				
36	Enthält die Lösung Elemente, die über den erwarteten Lösungsraum hinausreichen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
37	Wird eine ungewöhnliche und zugleich sinnvolle Lösung entwickelt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
38	Hat die Lösung eine gestalterische (z.B. ästhetische) Qualität?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
39	Zeigt die Lösung Problemsensitivität?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
40	Wird der Gestaltungsspielraum, den die Aufgabe bietet, in der Lösung ausgeschöpft?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Quelle: entnommen aus Lehberger & Rauner, 2017, S. 80f.

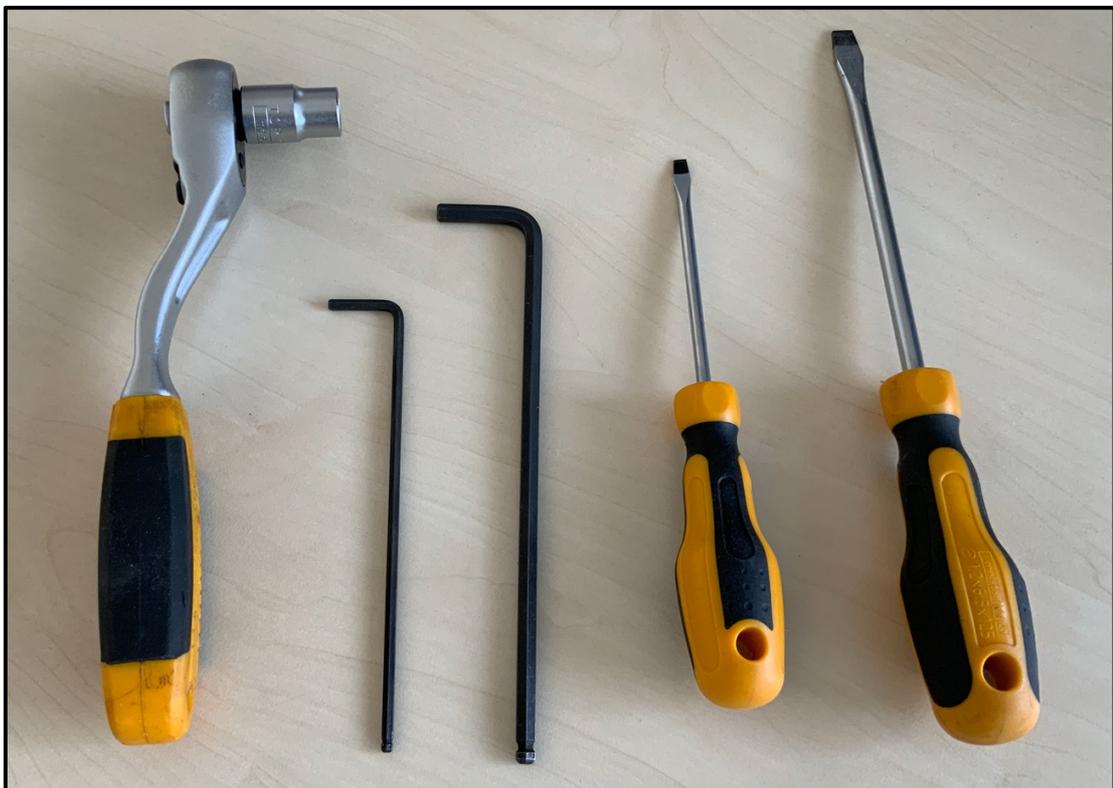
A3 Montageanleitung Sickenvorrichtung (Hololens 2)

Marker:

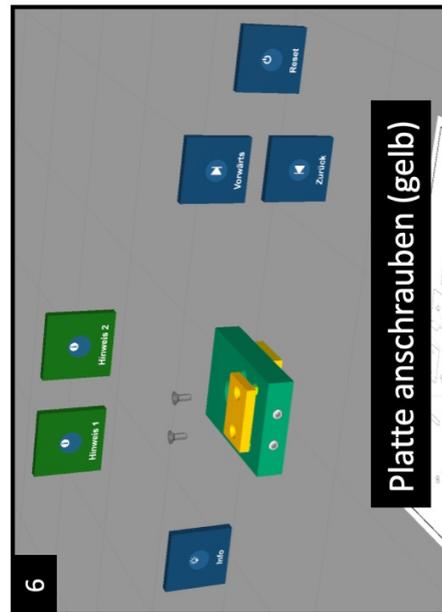
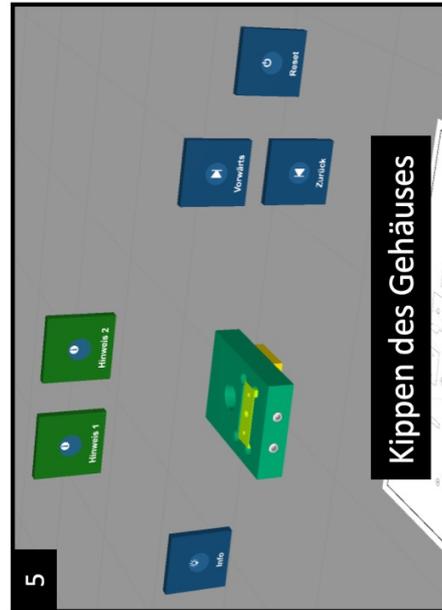
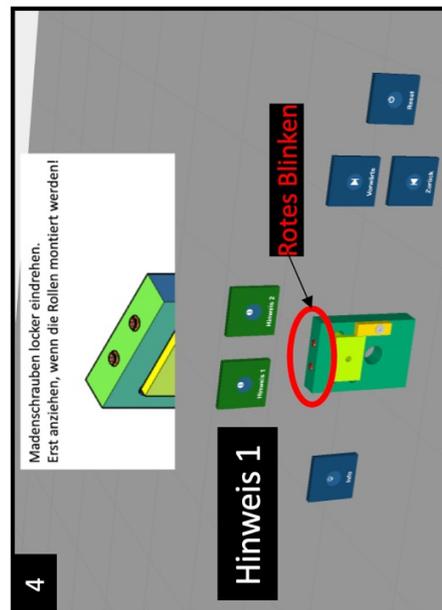
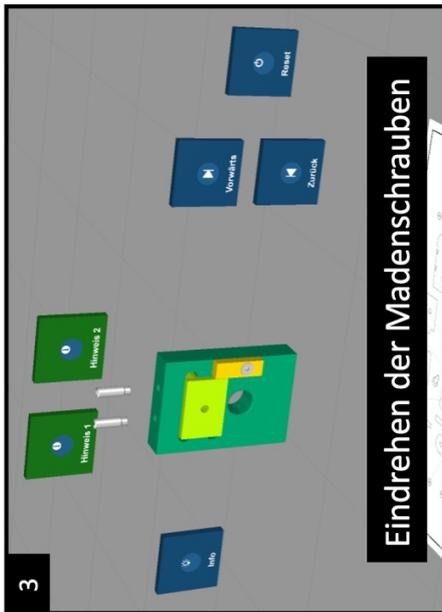
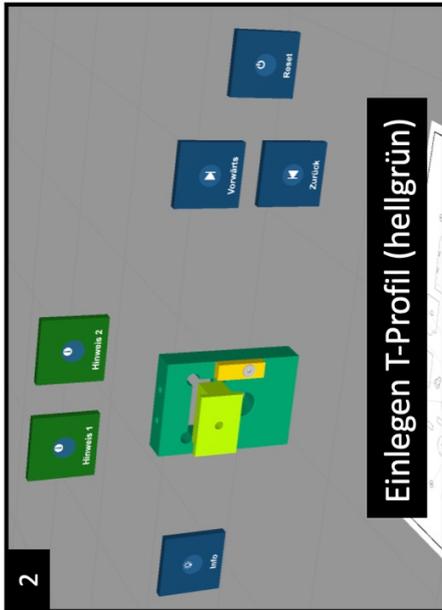
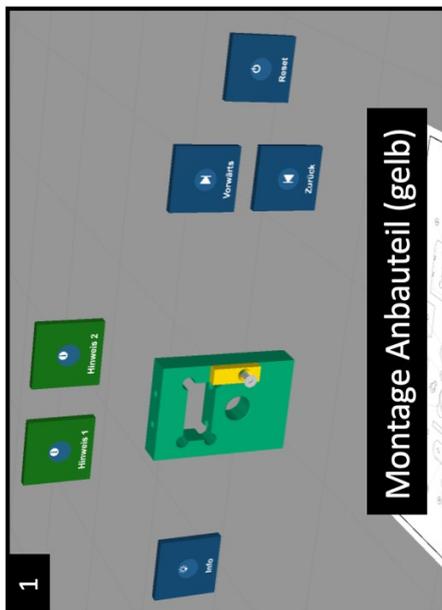


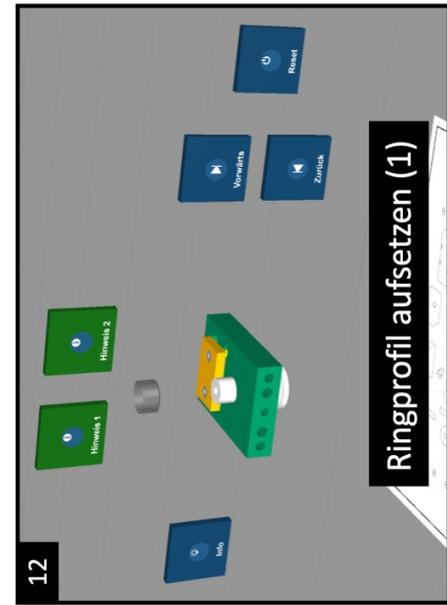
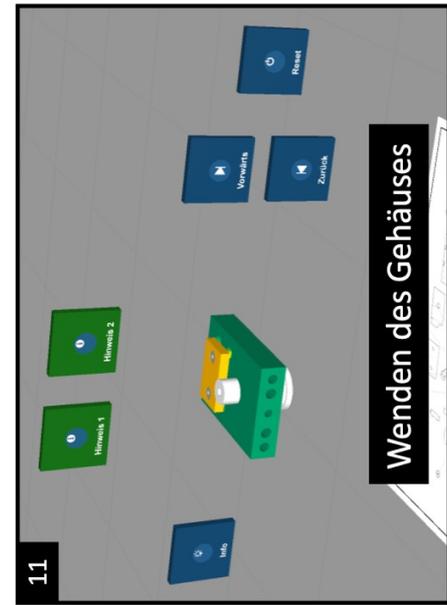
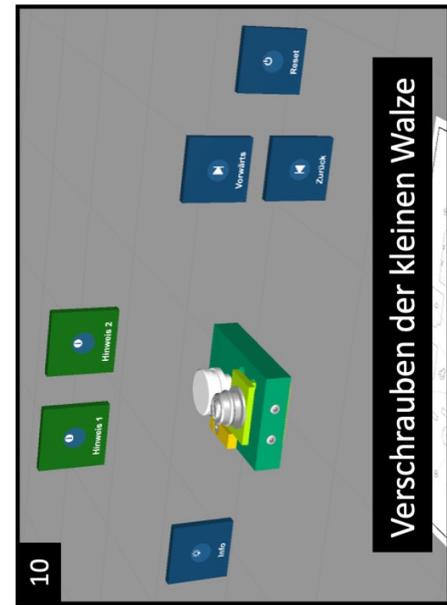
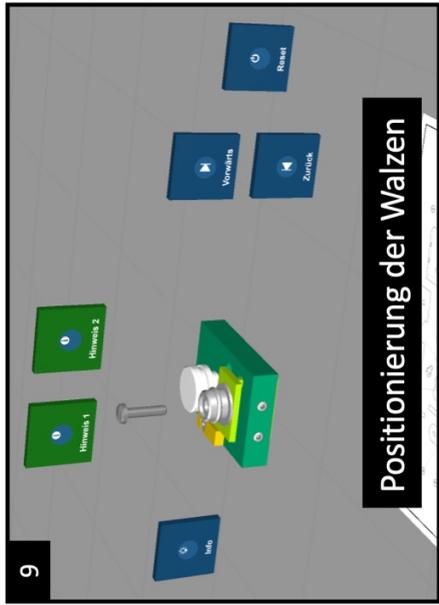
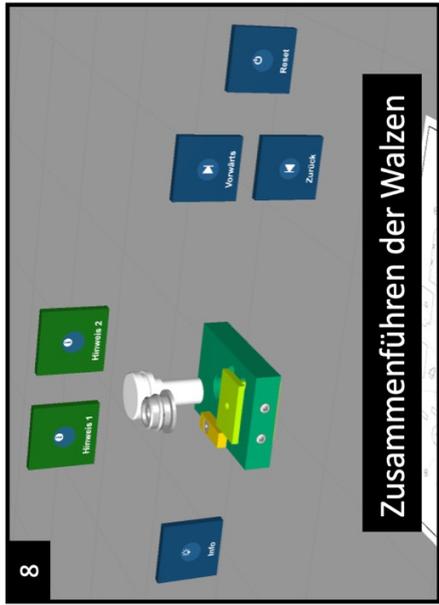
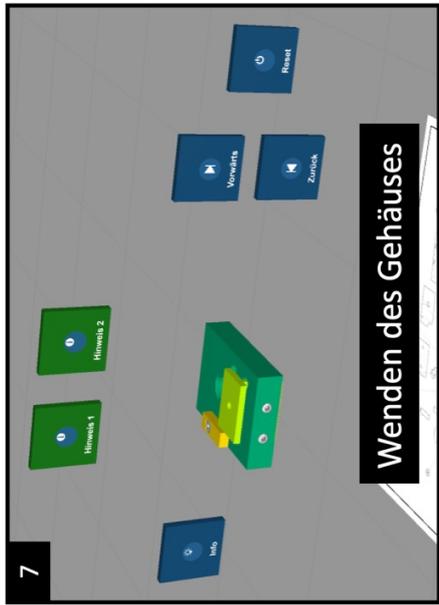
Werkzeugliste:

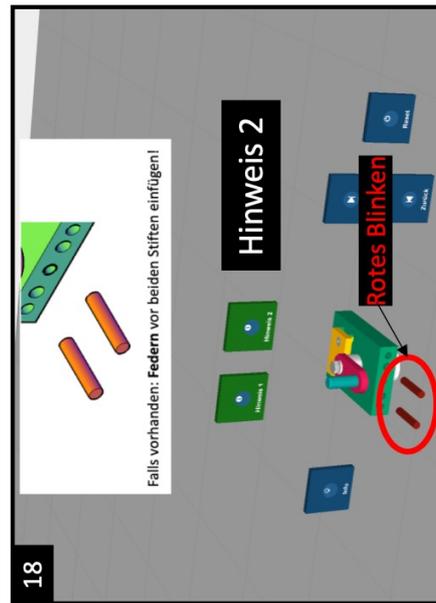
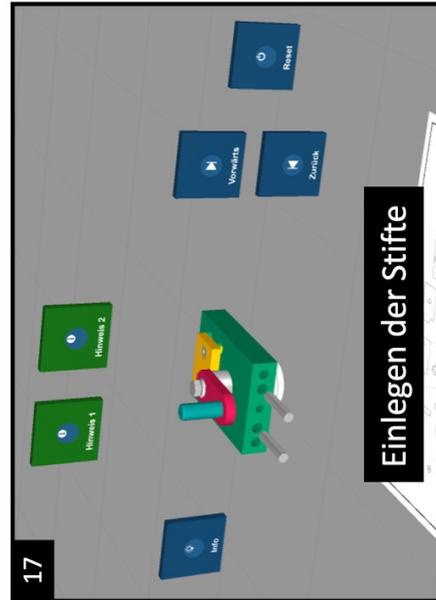
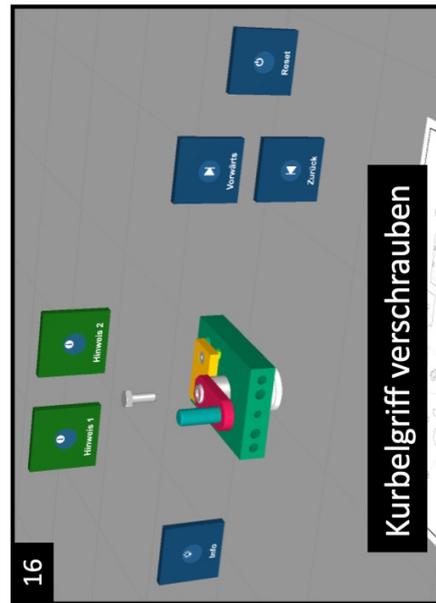
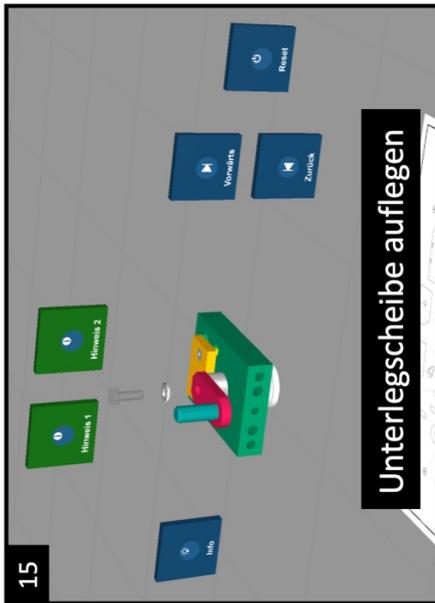
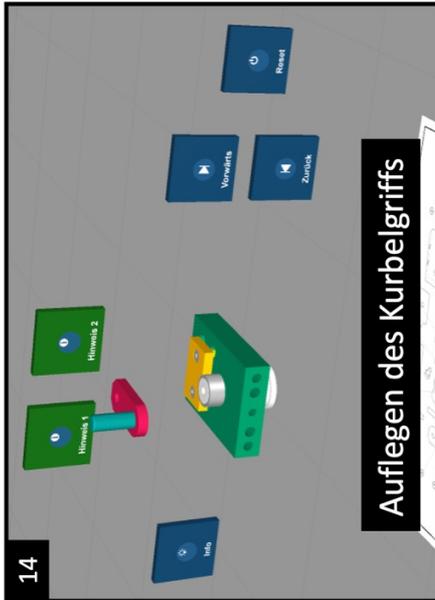
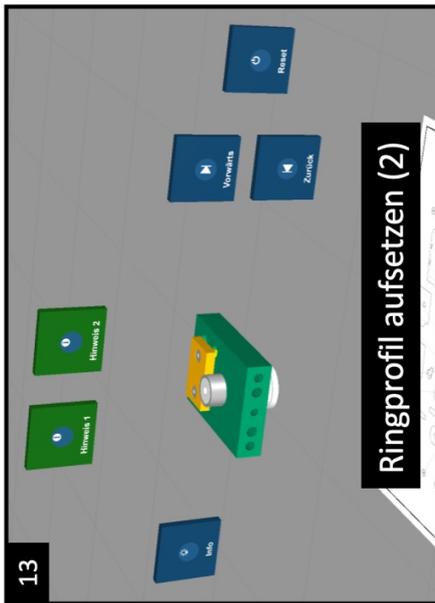
- Ratsche (10mm Nuss) / Ringschlüssel 10mm
- Winkelschlüssel, Innensechskant 3mm
- Winkelschlüssel, Innensechskant 5mm
- Schraubendreher Schlitz, 0,8mm x 4mm x 80mm
- Schraubendreher Schlitz, 1,2mm x 6,5mm x 125mm

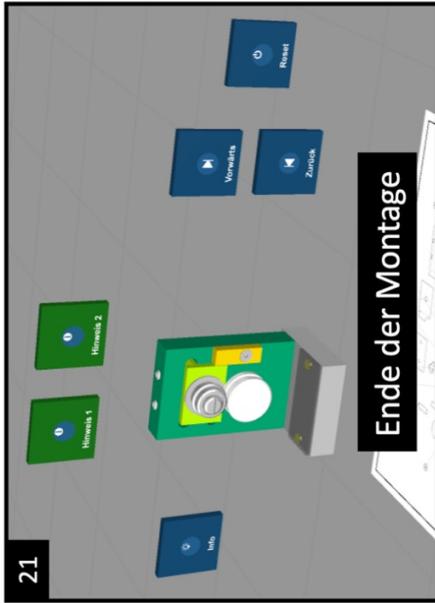
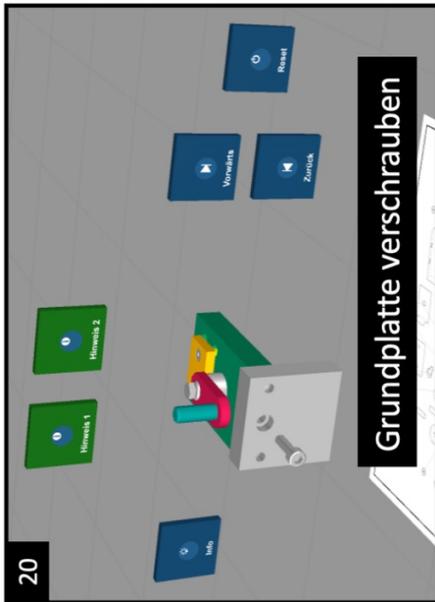
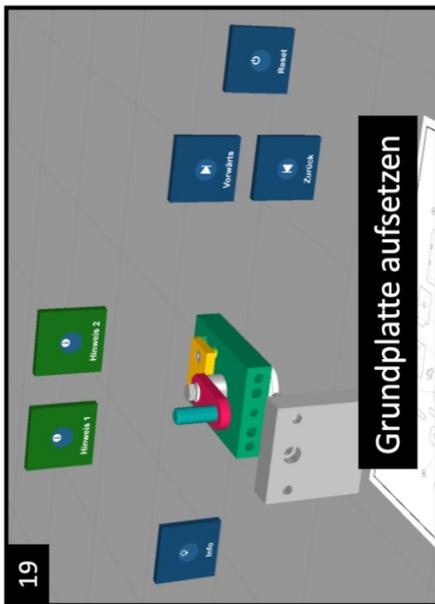


Montageschritte (beschriftet):

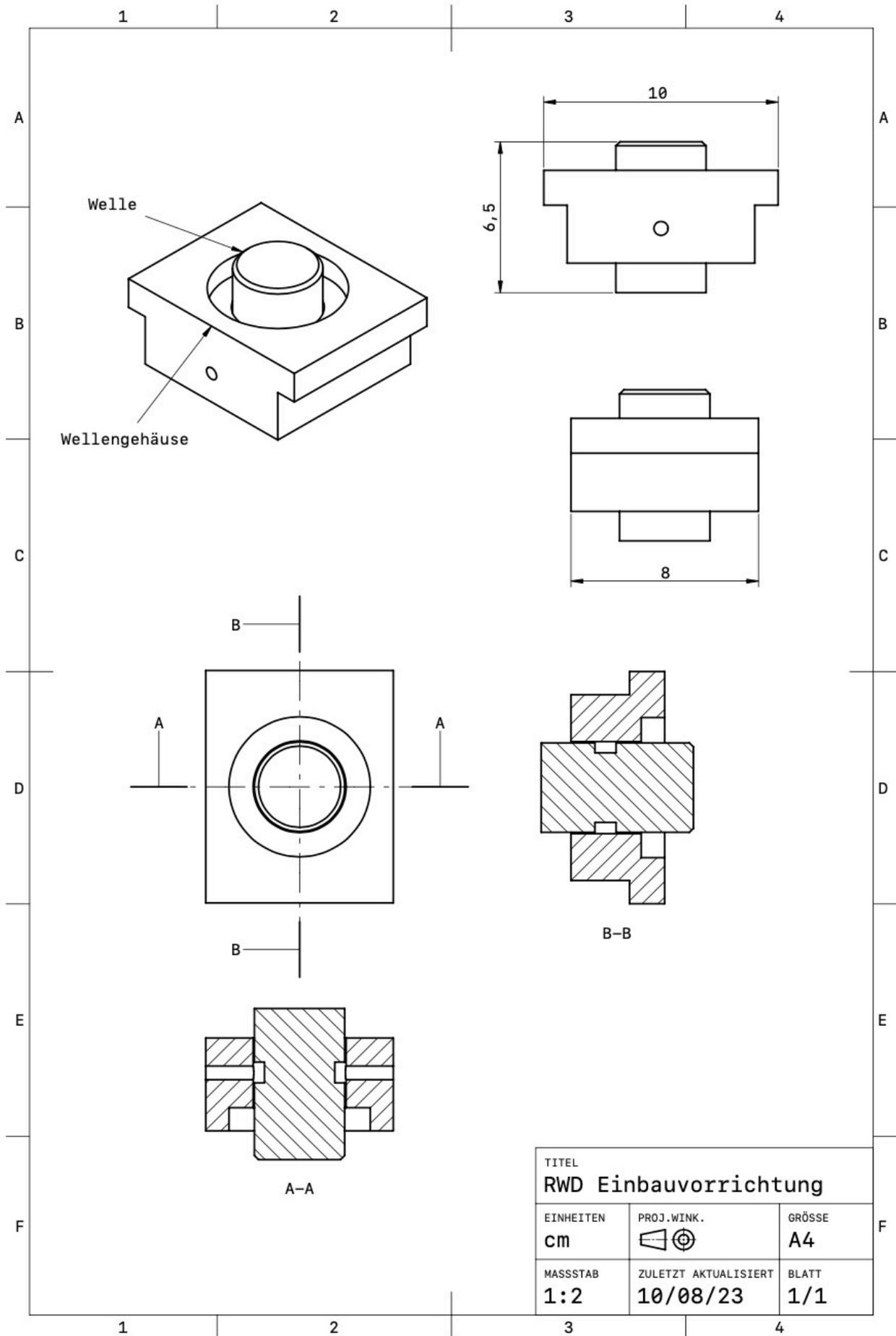








A4 RWD Einbauvorrichtung: Technische Zeichnung



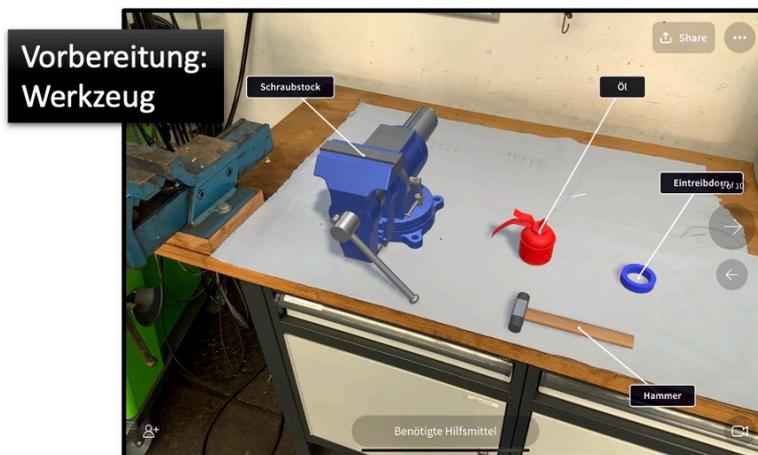
TITEL		
RWD Einbauvorrichtung		
EINHEITEN	PROJ. WINK.	GRÖSSE
cm		A4
MASSTAB	ZULETZT AKTUALISIERT	BLATT
1:2	10/08/23	1/1

A5 Montageschritte Radialwellendichtring (iPad Pro)

Werkzeugliste:

- Hammer (Schonhammer oder Schlosserhammer)
- Ölkännchen
- Eintreibdorn

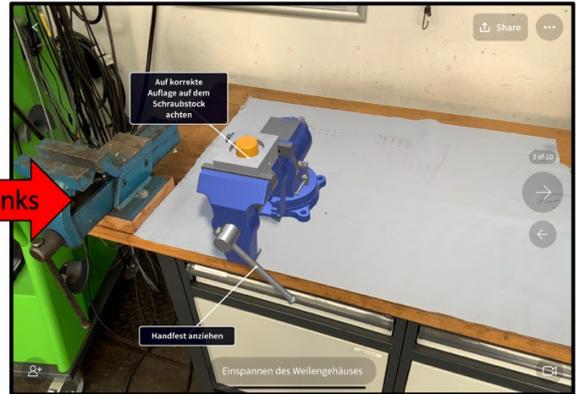
Montageschritte:



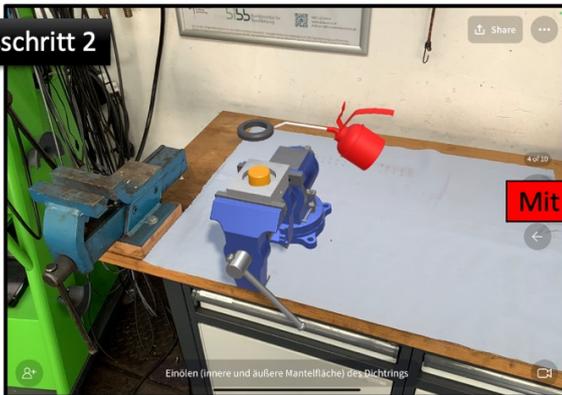
Arbeitsschritt 1



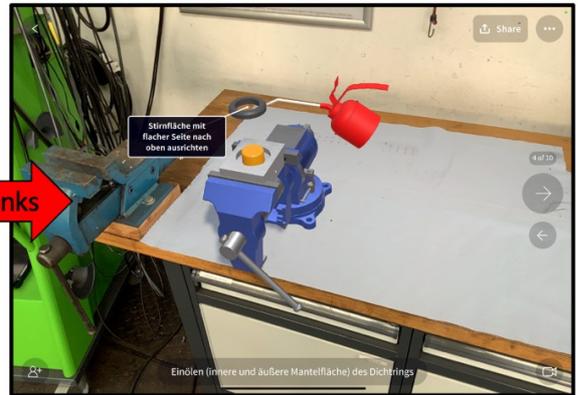
Mit Chunks



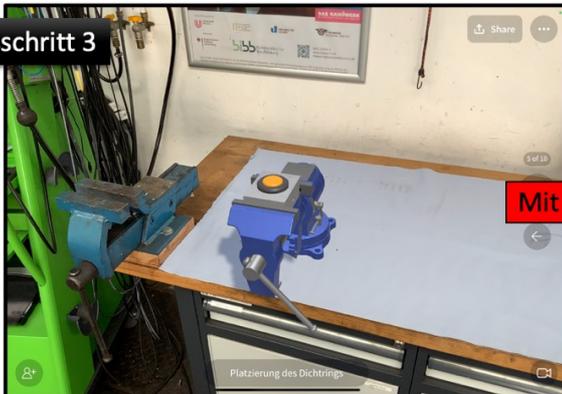
Arbeitsschritt 2



Mit Chunks



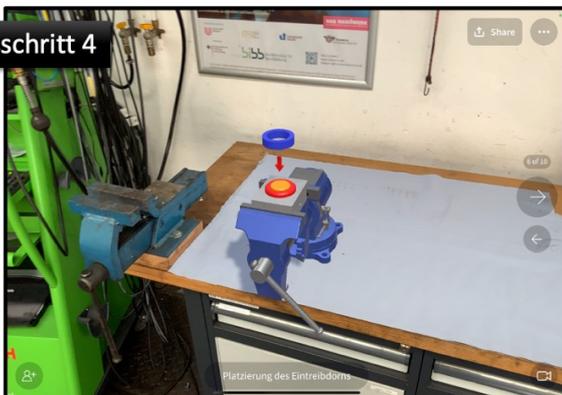
Arbeitsschritt 3



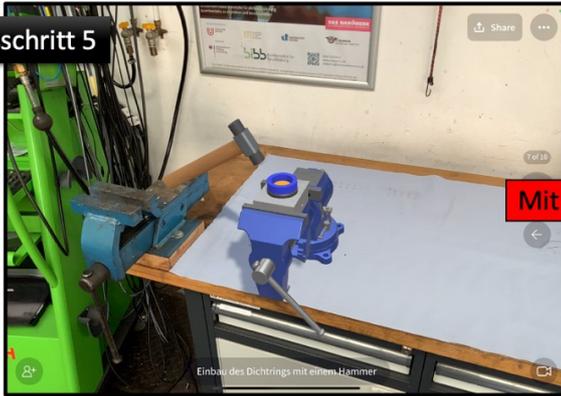
Mit Chunks



Arbeitsschritt 4



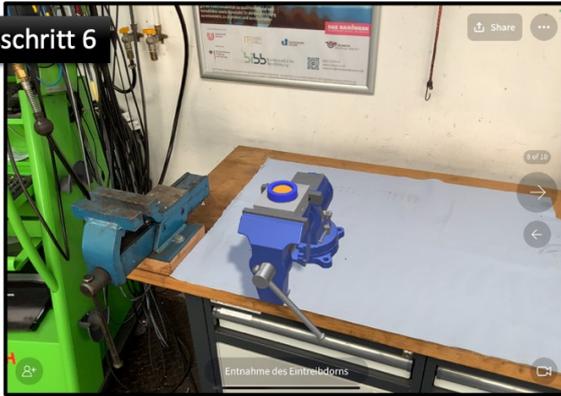
Arbeitsschritt 5



Mit Chunks



Arbeitsschritt 6



Arbeitsschritt 7



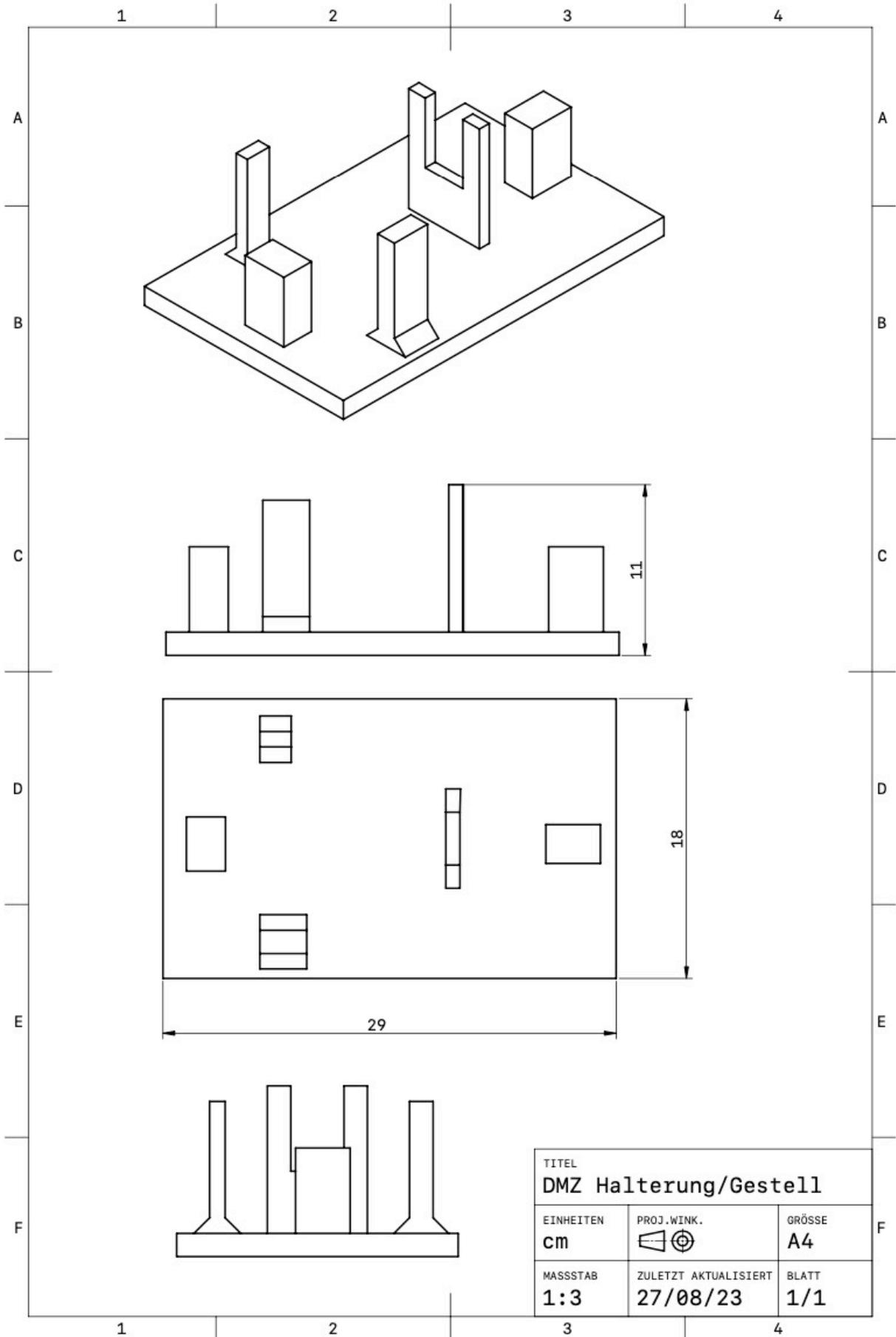
Mit Chunks



Arbeitsschritt 8



A6 DMZ Halterung: Technische Zeichnung

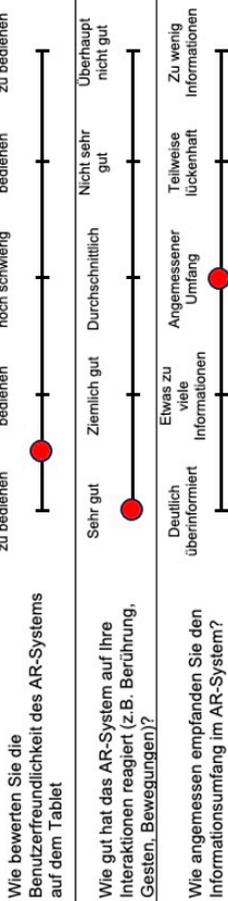


Auswertung: Mittelwert aller Probanden

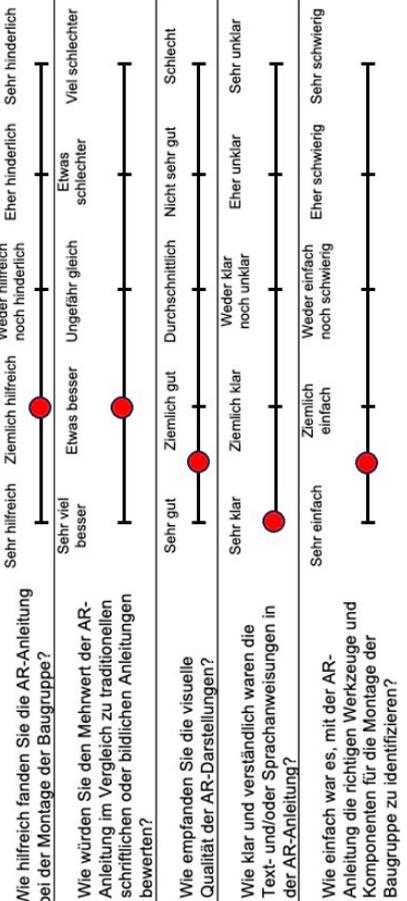
1. Probanden

- Proband 1: Auszubildender, 3. Lehrjahr – Industriemechaniker
- Proband 2: Auszubildender, 3. Lehrjahr – Industriemechaniker
- Proband 3: Ausbilder – Werkzeugmechaniker
- Proband 4: Auszubildende, 3. Lehrjahr – Produktdesignerin
- Proband 5: Auszubildender, 2. Lehrjahr – Industriemechaniker
- Proband 6: Auszubildender, 3. Lehrjahr – Produktdesigner

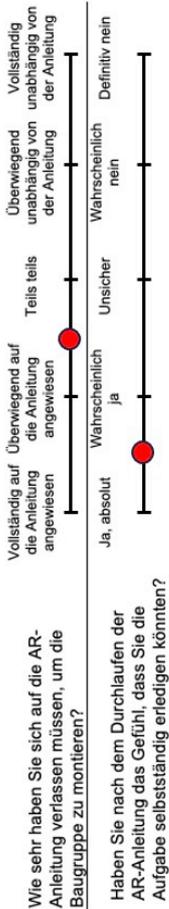
2. Fragen zur Benutzerfreundlichkeit des AR-Systems



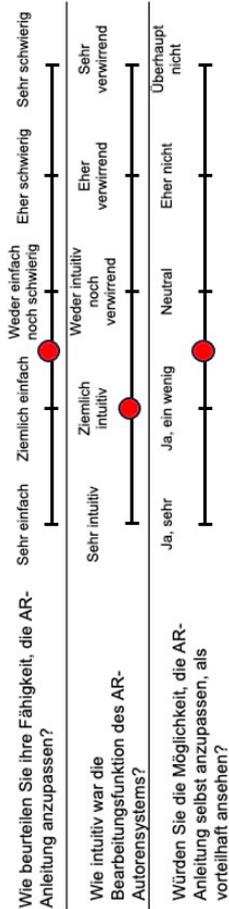
3. Fragen zur Qualität der AR-Anleitung



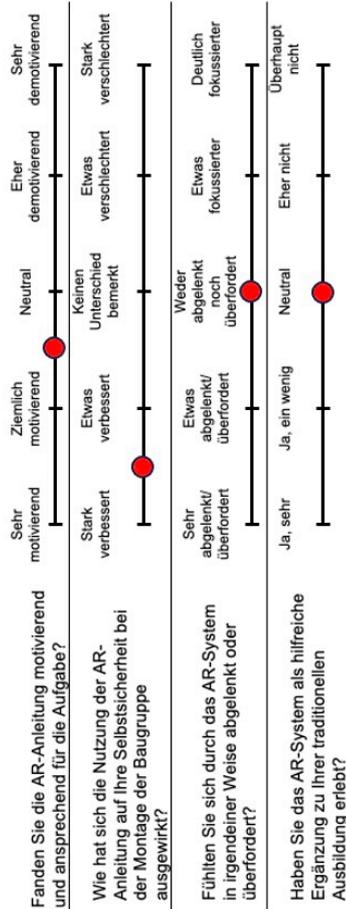
4. Fragen zum Lernprozess und zur Effektivität



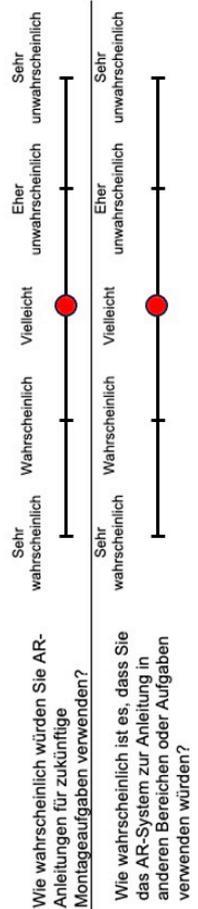
5. Fragen zur Anpassung der AR-Anleitung



6. Fragen zum Einfluss auf den Nutzer

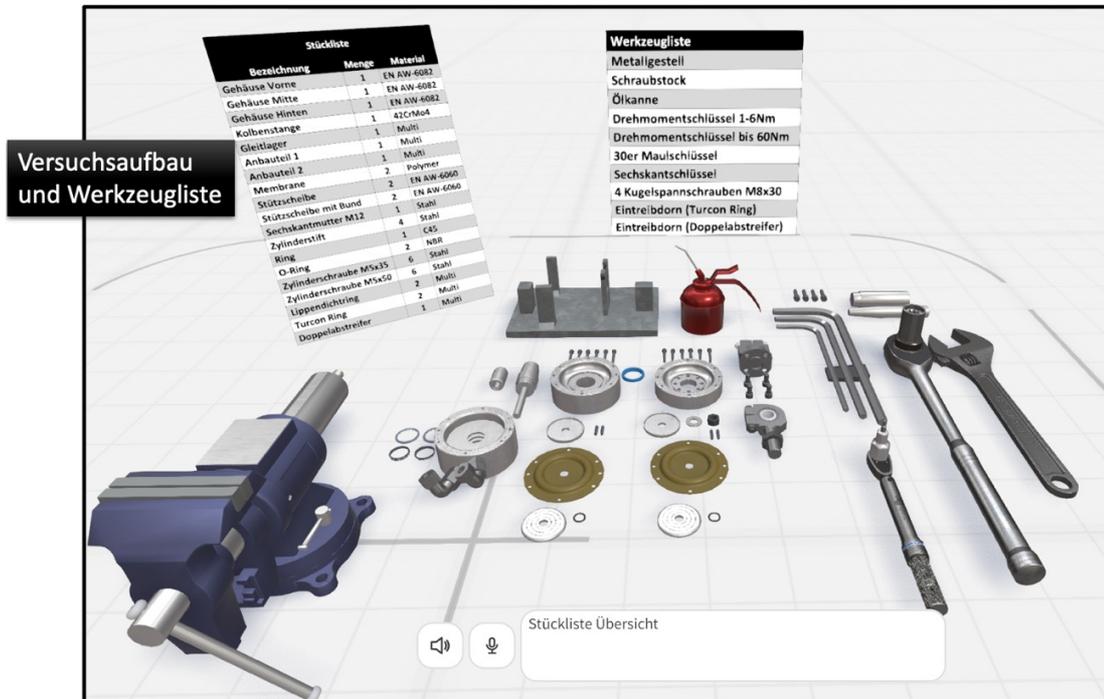


7. Fragen zur zukünftigen Nutzung

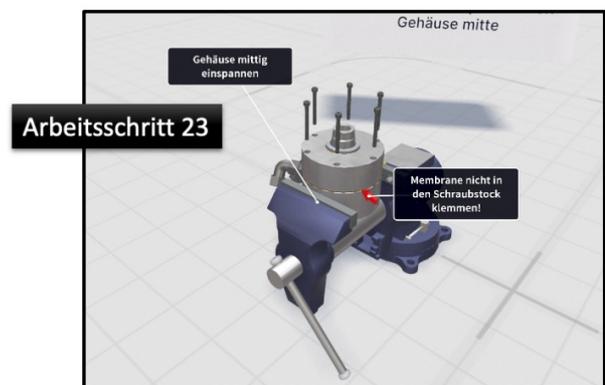
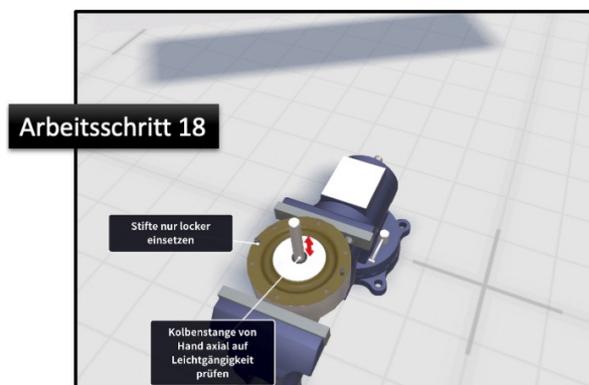


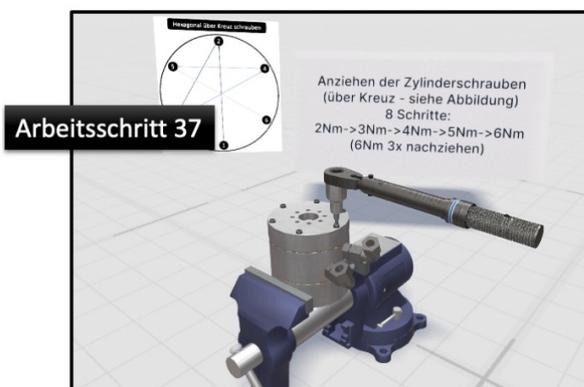
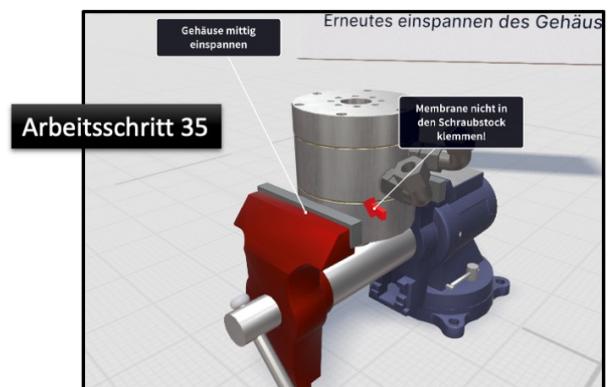
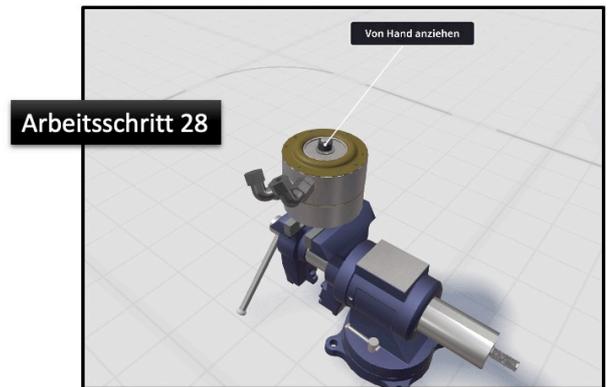
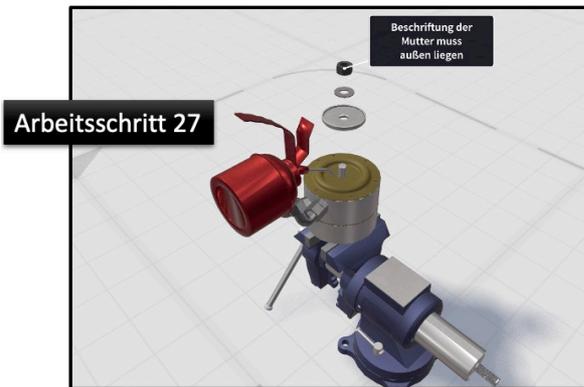
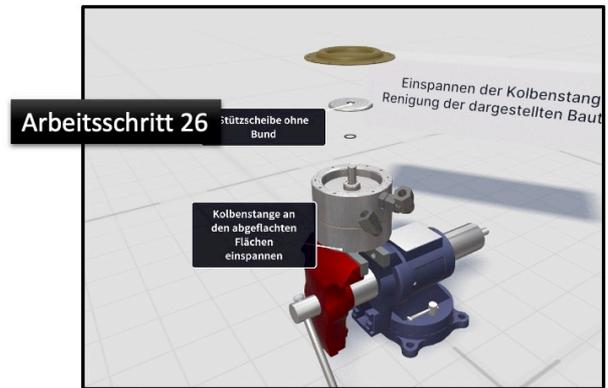
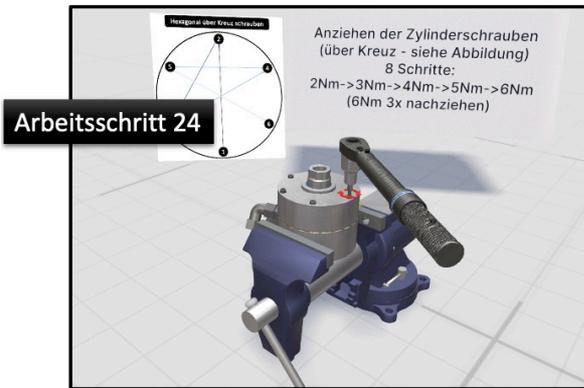
A7 Auswertung der Fragebögen zum DMZ

A8 Versuchsaufbau und offengelegte Chunks des Doppelmembranzylinders im Autorensystem



Offengelegte Chunks der jeweiligen Arbeitsschritte:





A9 Lösungsraum: COMET-Aufgabe DMZ

Kriterium 1: Anschaulichkeit/Präsentation

Es sind multimediale Elemente vorhanden, die ergänzend in die spezifische AR-Montageaufgabe eingebunden werden können. Diese Elemente sollen das Verständnis der zugrundeliegenden Montageschritte verbessern und sind für den Experten bzw. Facharbeiter nachvollziehbar. Die ergänzten Elemente sind fachlich korrekt und visuell sinnvoll platziert, sodass spätere Anwender weder irritiert noch überfordert werden.

Kriterium 2: Funktionalität

Die hinzugefügten multimedialen Elemente sind funktionsfähig. Dies bedeutet, dass unter Berücksichtigung dieser Elemente die Montage der Baugruppe fehlerfrei durchgeführt werden kann und der spätere Einsatz in der Maschine nicht zu Ausfällen oder erhöhten Verschleißerscheinungen an der Baugruppe führt. Es sind tragfähige Lösungen vorzuweisen, die die Montage oder den anschließenden Betrieb der Baugruppe nicht behindern.

Kriterium 3: Gebrauchswertorientierung

Die hinzugefügten multimedialen Elemente stellen eine Optimierung hinsichtlich der erforderlichen Fertigungszeit dar und ermöglichen die Montage der Baugruppe in gewünschter Qualität (z. B. Membrane korrekt montiert, um eine hohe Langlebigkeit zu gewährleisten).

Kriterium 4: Wirtschaftlichkeit

Zeit- und Kostenersparnis durch schnellere Erstmontage und niedrigere Fehlerquoten, wodurch kostspielige Folge Reparaturen vermieden werden.

Kriterium 5: Geschäfts- und Arbeitsprozessorientierung

Es wird erkannt, dass die Verwendung multimedial gestützter Hilfsmittel über die Montage hinaus auch in anderen Bereichen der täglichen Facharbeitertätigkeit sinnvoll eingesetzt werden kann.

Kriterium 6: Sozialverträglichkeit

Die allgemeinen Aspekte der Arbeitssicherheit und des Gesundheitsschutzes werden innerhalb der Lösung berücksichtigt.

Kriterium 7: Umweltverträglichkeit

Die Arbeitsschritte sind aus Umweltschutzaspekten abfallvermeidend und in den Fällen von unvermeidbaren Abfällen wird deren Recycling oder Entsorgung gemäß dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz durchgeführt.

Kriterium 8: Kreativität

Es werden ungewöhnliche und sinnvolle multimediale Lösungen entwickelt.

A10 COMET Einzelratings

0 keineswegs erfüllt
 1 eher nicht erfüllt
 2 eher erfüllt
 3 voll erfüllt
 xxx Item nicht zu bewerten

MW Mittelwert
 ABW Abweichung

Lernsituation: Montage des Doppelmembranzylinders

Probandengruppe 1

Rater/Item	Anschaulichkeit/Präsentation				Funktionalität				Gebrauchswert-orientierung				Wirtschaftlichkeit				Arbeits- und Geschäfts-processorientierung				Sozialverträglichkeit				Umweltverträglichkeit				Kreativität																																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	MM	ABW																							
Rater1	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	xxx	xxx	2	2	xxx	2	2	xxx	2	2	3	1	3	3	0	xxx	xxx	3	xxx	3	2	3	2	3	2	0	2	1	2	3	2	2,2727	-0,04																					
Rater2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	xxx	xxx	2	2	xxx	2	2	xxx	2	2	3	1	3	3	0	xxx	xxx	3	xxx	3	2	3	3	3	0	2	1	2	3	2	2,3333	0,02	0,02																					
Rater3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	xxx	xxx	2	2	xxx	2	2	xxx	2	2	3	1	3	3	0	xxx	xxx	3	xxx	3	2	3	3	3	0	2	1	2	3	2	2,3333	0,02	0,02																					
Mittelwert/Item	3	3	3	2,67	3	3	3	3	3	3	3	###	###	2	2	###	2	2	###	2	2	3	1	3	3	0	###	###	3	###	3	2	3	2,67	0	2	1	2	3	2	2	2,3131	0	0																					
Standardabw.	0	0	0	0,47	0	0	0	0	0	0	0	###	###	0	0	###	0	0	###	0	0	0	0	0	0	0	###	###	0	###	0	0	0	0,47	0	0	0	0	0	0	0	0,0286	0	0																					
MW Teilkompetenz	2,9333333333																																								2	2,8				2				2,4				1,5				2,1333333333				2			

Proband 2

Rater/Item	Anschaulichkeit/Präsentation				Funktionalität				Gebrauchswert-orientierung				Wirtschaftlichkeit				Arbeits- und Geschäfts-processorientierung				Sozialverträglichkeit				Umweltverträglichkeit				Kreativität																																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	MM	ABW																							
Rater1	3	3	0	2	3	2	3	3	3	3	3	xxx	xxx	2	2	xxx	2	2	xxx	2	2	2	1	2	3	0	xxx	xxx	3	xxx	3	2	3	2	3	2	0	1	1	1	3	1	2,0303	-0,02																					
Rater2	3	3	0	2	3	2	3	3	3	3	3	xxx	xxx	2	2	xxx	2	2	xxx	2	2	2	1	2	3	0	xxx	xxx	3	xxx	3	2	3	3	3	0	1	1	1	1	3	1	2,0606	0,01																					
Rater3	3	3	0	2	3	2	3	3	3	3	3	xxx	xxx	2	2	xxx	2	2	xxx	2	2	2	1	2	3	0	xxx	xxx	3	xxx	3	2	3	3	3	0	1	1	1	1	3	1	2,0606	0,01																					
Mittelwert/Item	3	3	0	2	3	2	3	3	3	3	3	###	###	2	2	###	2	2	###	2	2	2	1	2	3	0	###	###	3	###	3	2	3	2,67	0	1	1	1	1	1	3	1	2,0505	0																					
Standardabw.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	###	###	0	0	###	0	0	###	0	0	0	0	0	0	0	###	###	0	###	0	0	0	0,47	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0143	0																					
MW Teilkompetenz	2																																								2	2,8				2,3333333333				2				1,5				2,1333333333				1,4			

Proband 3

Rater/Item	Anschaulichkeit/Präsentation				Funktionalität				Gebrauchswert-orientierung				Wirtschaftlichkeit				Arbeits- und Geschäfts-processorientierung				Sozialverträglichkeit				Umweltverträglichkeit				Kreativität																																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	MM	ABW																							
Rater1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	xxx	xxx	3	3	xxx	2	3	xxx	2	2	2	1	2	3	0	xxx	xxx	3	xxx	3	2	3	2	3	2	0	1	1	2	3	1	2,2727	0																					
Rater2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	xxx	xxx	3	3	xxx	2	3	xxx	2	2	2	1	2	3	0	xxx	xxx	3	xxx	3	2	3	3	3	0	1	1	1	1	3	1	2,2727	0																					
Rater3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	xxx	xxx	3	3	xxx	2	3	xxx	2	2	2	1	2	3	0	xxx	xxx	3	xxx	3	2	3	3	3	0	1	1	1	1	3	1	2,2727	0																					
Mittelwert/Item	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	###	###	3	3	###	2	3	###	2	2	2	1	2	3	0	###	###	3	###	3	2	3	2,67	0	1	1	1,33	3	1	1	1,33	2,2727	0																					
Standardabw.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	###	###	0	0	###	0	0	###	0	0	0	0	0	0	0	###	###	0	###	0	0	0	0,47	0	0	0	0	0,47	0	0	0	0,0286	0																					
MW Teilkompetenz	3																																								2	2,8				2,6666666667				2,3333333333				1,5				2,1333333333				1,4666666667			

Probandengruppe 2

Proband 4		Anschaulichkeit/Präsentation					Funktionalität					Gebrauchswert-orientierung					Wirtschaftlichkeit					Arbeits- und Geschäfts-processorientierung					Sozialverträglichkeit					Umweltverträglichkeit					Kreativität															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	MW	ABW									
Rater/Item	3	2	1	3	3	3	2	3	2	2	xxx	xxx	2	3	2	xxx	2	1	xxx	2	2	1	1	2	3	0	xxx	xxx	3	xxx	3	2	3	1	0	1	1	1	2	1	1,9091	0										
Rater2	3	2	1	3	3	3	2	3	2	2	xxx	xxx	2	3	2	xxx	2	1	xxx	2	2	1	1	2	3	0	xxx	xxx	3	xxx	3	2	3	1	0	1	1	1	2	1	1,9091	0										
Rater3	3	2	1	3	3	3	2	3	2	2	xxx	xxx	2	3	2	xxx	2	1	xxx	2	2	1	1	2	3	0	xxx	xxx	3	xxx	3	2	3	1	0	1	1	1	2	1	1,9091	0										
Mittelwert/Item	3	2	1	3	3	3	2	3	2	2	###	###	2	3	2	###	2	1	###	2	2	1	1	2	3	0	###	###	3	###	3	2	3	1	0	1	1	1	2	1	1,9091	0										
Standardabw.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	###	###	0	0	0	###	0	0	###	0	0	0	0	0	0	0	###	###	0	###	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
MW Teilkompetenz	2,4																				2,333333333					1,666666667					1,8					1,5					1,8					1,2						

Proband 5		Anschaulichkeit/Präsentation					Funktionalität					Gebrauchswert-orientierung					Wirtschaftlichkeit					Arbeits- und Geschäfts-processorientierung					Sozialverträglichkeit					Umweltverträglichkeit					Kreativität															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	MW	ABW									
Rater/Item	3	3	3	2	3	3	2	3	2	2	xxx	xxx	2	3	2	xxx	2	1	xxx	3	3	2	1	1	3	0	xxx	xxx	3	xxx	3	2	3	2	0	2	1	1	2	1	2,0303	0										
Rater2	3	3	3	2	3	3	2	3	2	2	xxx	xxx	2	3	2	xxx	2	1	xxx	3	3	2	1	1	3	0	xxx	xxx	3	xxx	3	2	3	2	0	2	1	1	2	1	2,0303	0										
Rater3	3	3	3	2	3	3	2	3	2	2	xxx	xxx	2	3	2	xxx	2	1	xxx	3	3	2	1	1	3	0	xxx	xxx	3	xxx	3	2	3	2	0	2	1	1	2	1	2,0303	0										
Mittelwert/Item	3	3	3	2	3	3	2	3	2	2	###	###	2	3	2	###	2	1	###	3	3	2	1	1	3	0	###	###	3	###	3	2	3	2	0	2	1	1	2	1	2,0303	0										
Standardabw.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	###	###	0	0	0	###	0	0	###	0	0	0	0	0	0	0	###	###	0	###	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
MW Teilkompetenz	2,8																				2,333333333					2					1,5					1,6					2					1,4						

Proband 6		Anschaulichkeit/Präsentation					Funktionalität					Gebrauchswert-orientierung					Wirtschaftlichkeit					Arbeits- und Geschäfts-processorientierung					Sozialverträglichkeit					Umweltverträglichkeit					Kreativität															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	MW	ABW									
Rater/Item	3	3	3	2	2	3	2	3	2	3	xxx	xxx	2	3	2	xxx	2	1	xxx	3	3	2	3	1	2	3	0	xxx	xxx	3	xxx	3	2	3	1	0	2	2	2	2	2	2,1818	-0,02									
Rater2	3	3	3	2	2	3	2	3	2	3	xxx	xxx	2	3	2	xxx	2	1	xxx	3	3	2	3	1	2	3	0	xxx	xxx	3	xxx	3	2	3	1	0	2	2	2	3	2	2,2121	0,01									
Rater3	3	3	3	2	2	3	2	3	2	3	xxx	xxx	2	3	2	xxx	2	1	xxx	3	3	2	3	1	2	3	0	xxx	xxx	3	xxx	3	2	3	1	0	2	2	2	3	2	2,2121	0,01									
Mittelwert/Item	3	3	3	2	2	3	2	3	2	3	###	###	2	3	2	###	2	1	###	3	3	2	3	1	2	3	0	###	###	3	###	3	2	3	1	0	2	2	2	2,67	2	2,202	0									
Standardabw.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	###	###	0	0	0	###	0	0	###	0	0	0	0	0	0	0	###	###	0	###	0	0	0	0	0	0	0	0	0,47	0	0,0143	0										
MW Teilkompetenz	2,6																				2,333333333					2					1,5					2,2					1,8					2,133333333						

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer, nicht angegebener Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Es wurden keine Dienste eines Promotionsvermittlungsinstituts oder einer ähnlichen Organisation in Anspruch genommen.

Siegen, 22.05.2023

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'A. K.', written over a light gray dotted grid background.

Ort, Datum, Unterschrift