

Daling, Lea M.; Schlittmeier, Sabine J.; Isenhardt, Ingrid

Article — Published Version

Psychologische und leistungsbezogene Effekte von AR- und VR-basiertem Training in der manuellen Montage

Zeitschrift für Arbeitswissenschaft

Provided in Cooperation with:

Springer Nature

Suggested Citation: Daling, Lea M.; Schlittmeier, Sabine J.; Isenhardt, Ingrid (2026) : Psychologische und leistungsbezogene Effekte von AR- und VR-basiertem Training in der manuellen Montage, Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, ISSN 2366-4681, Springer, Berlin, Heidelberg, Vol. 80, Iss. 1, pp. 104-116,
<https://doi.org/10.1007/s41449-026-00506-8>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/338589>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>



Psychologische und leistungsbezogene Effekte von AR- und VR-basiertem Training in der manuellen Montage

Lea M. Daling¹ · Sabine J. Schlittmeier² · Ingrid Isenhardt¹

Angenommen: 29. Januar 2026 / Online publiziert: 24. Februar 2026
© The Author(s) 2026

Zusammenfassung

Augmented (AR) und Virtual Reality (VR) werden zunehmend in der manuellen Montage eingesetzt, um Menschen sicher, flexibel und effektiv auf ihre Aufgaben vorzubereiten. Die vorliegende Arbeit fasst Kernergebnisse eines Scoping Reviews vorliegender empirischer Befunde und einer experimentellen Studie zu kurz- und längerfristigen Effekten von AR- und VR-basiertem Training auf die subjektiven Bewertungen der Nutzenden und ihre Montageleistung zusammen. Die Ergebnisse zeigen, dass AR- und VR-basiertes Training vergleichbare Effekte wie traditionelles video-basiertes Training erzielen, dabei aber AR-basiertes Training insbesondere subjektiv besser bewertet wird. Auf Basis der empirisch gewonnenen Erkenntnisse werden Anknüpfungspunkte für weitere Forschung diskutiert und Implikationen für die Praxis abgeleitet.

Praktische Relevanz: In der interdisziplinären Forschungscommunity rund um das Themenfeld von AR- und VR-basierten Trainings wurde bereits aufgezeigt, dass die Technologien vielversprechendes Potenzial für die Anwendung im Kontext der manuellen Montage haben. Jedoch erschwert die Vielfalt an verwendeter Hardware und technologischer Funktionalitäten, Forschungsmethoden und Studienteilnehmenden den Übertrag der Forschungsergebnisse in die Praxis. Der vorliegende Beitrag synthetisiert die Ergebnisse eines Scoping Reviews zu bereits veröffentlichten empirischen Befunden und ergänzt diese um eine experimentelle Vergleichsstudie mit hohem Anwendungsbezug, um die Brücke zwischen Forschung und Praxis zu schlagen.

Schlüsselwörter Augmented Reality · Virtual Reality · Training · Effektivität · Usability · Task Load

Psychological and performance effects of AR- and VR-based training in manual assembly

Abstract

Augmented reality (AR) and virtual reality (VR) are increasingly being used in manual assembly to prepare people for their tasks safely, flexibly, and effectively. This paper synthesizes the key findings of a scoping review of existing empirical evidence and an experimental study on the short- and long-term effects of AR- and VR-based training on users' subjective evaluations and assembly performance. The results show that AR- and VR-based training achieve comparable effects to traditional video-based training, but that AR-based training results in better subjective evaluations. Based on these empirical findings, we will discuss connecting points for further research and derive implications for practice.

✉ Dr. phil. Lea M. Daling
lea.daling@wzl-iqs.rwth-aachen.de

Prof. Dr. phil. Sabine J. Schlittmeier
Sabine.Schlittmeier@psych.rwth-aachen.de

Prof. Dr. phil. Ingrid Isenhardt
ingrid.isenhardt@wzl-iqs.rwth-aachen.de

¹ Lehrstuhl für Informations-, Qualitäts- und Sensorsysteme (WZL IQS), RWTH Aachen University, Campus Boulevard 30, 52074 Aachen, Deutschland

² Lehr- und Forschungsgebiet Arbeits- und Ingenieurpsychologie, Institut für Psychologie, RWTH Aachen University, Kackertstraße 9, 52072 Aachen, Deutschland

Practical Relevance: The interdisciplinary research community focusing on AR- and VR-based training has already demonstrated that these technologies offer promising potential for application in the context of manual assembly. However, the wide variety of hardware and technological functionalities, research methods, and study participants makes it difficult to transfer the research results into practice. This article synthesizes the results of a scoping review of published empirical findings and complements them with the results of an experimental study with high practical relevance in order to bridge the gap between research and practice.

Keywords Augmented Reality · Virtual Reality · Training · Effectiveness · Usability · Task Load

1 Einleitung

Technologien wie Augmented und Virtual Reality (AR und VR), zusammengefasst als Mixed Reality (MR; Skarbez et al. 2021), gelten aufgrund ihres enormen technologischen Potenzials als vielversprechende Medien für das Training manueller Montagetätigkeiten (Hegenberg und Schmidt 2021; Oestreich et al. 2020). Trotz zunehmender Digitalisierung und Automatisierung im Zuge von Industrie 4.0 bleibt der Mensch insbesondere in der manuellen Montage ein zentraler Leistungsträger. Seine kognitiven und motorischen Fähigkeiten sowie sein Erfahrungswissen machen ihn unersetzlich, wo automatisierte Systeme an ihre Grenzen stoßen (Comberti et al. 2020). Mit Blick auf die angestrebte Menschzentrierung industrieller Wertschöpfung im Sinne von „Industrie 5.0“ (Europäische Kommission, Generaldirektion Forschung und Innovation 2021) gewinnen daher Technologien an Bedeutung, die nicht nur Effizienz, sondern auch Lernförderlichkeit und Akzeptanz sicherstellen. Vor dem Hintergrund kurzer Produktlebenszyklen, hoher Variantenvielfalt und eines zunehmenden Qualifizierungsbedarfs versprechen MR-Technologien insbesondere kürzere Anlernzeiten, sichere Übungsumgebungen und eine bessere Standardisierung von Trainingsprozessen (Doolani et al. 2020b; Oestreich et al. 2020). Gleichzeitig ist die Evidenzlage zur tatsächlichen Wirksamkeit im industriellen Einsatz bislang uneinheitlich, was eine Sichtung und Aufbereitung des Forschungsstands und experimentelle Vergleichsstudien erforderlich macht.

1.1 Manuelle Montageaufgaben

Manuelle Montage bezieht sich auf Fertigungsprozesse, bei denen Menschen Teile und Komponenten physisch zusammenbauen, um ein fertiges Produkt herzustellen (Bornewasser 2020; Lotter 2006). Dazu gehören Tätigkeiten wie das Fügen, Handhaben, Kontrollieren, Justieren und Einstellen von Teilen mit einer geometrisch definierten Form unter Verwendung von Werkzeugen und Geräten (Lotter 2006). Trotz fortschreitender Automatisierung stellen manuelle Montagetätigkeiten weiterhin einen unverzichtbaren Bestandteil einer zukunftsorientierten Produktion dar, in der individuell angepasste Produkte in hoher Variantenviel-

falt hergestellt werden (Brandl et al. 2018). Zugleich steigt die Komplexität der Montagetätigkeiten durch kürzere Produktlebenszyklen, eine höhere Variantenvielfalt und häufige Produktwechsel, was kontinuierliche Lernprozesse und flexible Trainingskonzepte erforderlich macht (Brolin et al. 2017; Funk et al. 2016).

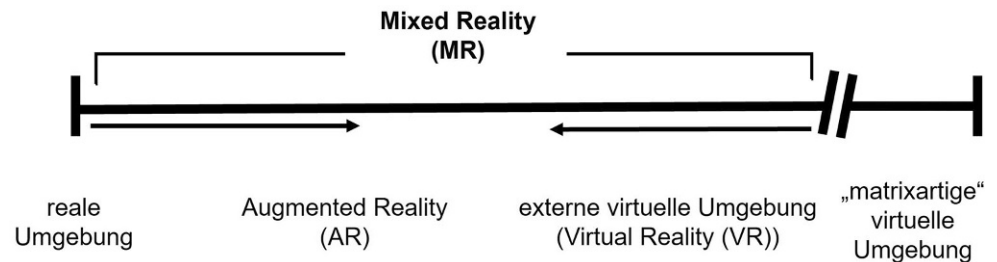
Um sich auf manuelle Montageaufgaben vorzubereiten, wird neues, teilweise ungeschultes Personal aktuell vor allem durch kostenaufwändiges Anlernen mittels erfahrener Mitarbeitender und durch Manuale angeleitet (Jeske et al. 2011). Das Training umfasst in der Regel eine Kombination aus prozeduralen und kognitiven Fähigkeiten, sodass sowohl das Einüben motorischer Abläufe durch praktische Erfahrungen wie auch Wissen darüber, was wie und in welcher Reihenfolge Komponenten montiert werden soll, bereitgestellt werden müssen (Bannat et al. 2008; Henderson und Feiner 2011; Jeske et al. 2013; Koziol und Budding 2012). Traditionelle Schulungsformen wie papierbasierte Handbücher oder On-the-Job-Trainings in eigens errichteten Lernfabriken stoßen dabei zunehmend an organisatorische und sicherheitstechnische Grenzen, da sie zeit- und personalintensiv sind, die Abbildung realer Produktionssituationen nur eingeschränkt möglich ist und sie eine fehlende Skalierbarkeit und Flexibilität aufweisen (Hegenberg und Schmidt 2021; Sautter und Daling 2021). AR- und VR-basierte Trainingsformate bieten für diese Kombination vielfältige Möglichkeiten, um manuelle Montageaufgaben sicher, zeit- und ortsunabhängig sowie im eigenen Tempo zu erlernen (Hegenberg und Schmidt 2021; Oestreich et al. 2020; Minow et al. 2021).

1.2 AR und VR-basiertes Training

AR und VR bezeichnen Technologien, die eine Verbindung zwischen der realen und der virtuellen Welt herstellen (Skarbez et al. 2021). Beide Technologien können als weitgehend separate Entitäten auf einem Kontinuum zwischen Virtualität und Realität, dem sogenannten Mixed Reality Kontinuum, eingeordnet werden (siehe Abb. 1).

In diesem Zusammenhang werden AR und VR hauptsächlich danach unterschieden, inwieweit das System *Welt- bzw. Kontextwissen* hat, wie hoch der Grad an *Immersion* ist und wie konsistent bzw. vorhersehbar die Inhalte den Nut-

Abb. 1 Mixed Reality als Oberbegriff für AR- und VR-Technologien (basierend auf Skarbez et al. 2021)



zenden vermittelt und dargestellt werden (*Kohärenz*). Ein hoher Grad an Weltwissen (eingeführt durch Milgram und Kishino (1994) als „extent of world knowledge“) bedeutet, dass ein System sich seiner realen Umgebung bewusst ist und auf Veränderungen in dieser Umgebung reagieren kann. Immersion steht nach Slater (2004) und Skarbez et al. (2021) für das, was die Technologie aus objektiver Sicht leistet. Je mehr ein System Darstellungen (in allen Sinnesmodalitäten) und Tracking mit einer hohen Wiedergabetreue der realen Welt ermöglicht, desto „immersiver“ ist es. Skarbez et al. (2021) führten aus, dass AR-Systeme im Allgemeinen eine geringe oder mittlere Immersion, aber ein höheres Maß an Weltwissen aufweisen, während externe Virtual-Reality-Systeme (d. h. VR) im Allgemeinen eine hohe Immersion mit wenig oder gar keinem Weltwissen aufweisen.

Bei AR-basiertem Training wird eine real-physische Umgebung genutzt, in der das Sichtfeld des Benutzers in Echtzeit mit virtuellen Elementen und Objekten (z. B. Anweisungen und Animationen zu Werkzeugen oder Objekten) angereichert wird, beispielsweise durch transparente Head-Mounted Displays (HMD) oder Tablets (z. B. in Hegenberg und Schmidt 2021 oder Minow et al. 2021). VR-basiertes Training findet hingegen in einer 3D-modellierten Trainingsumgebung statt, während die reale Welt ausgeblendet ist. Nutzende interagieren mit virtuellen Elementen und Objekten (z. B. durch geschlossene oder stereoskopische Brillen) mithilfe von Controllern oder einer Maussteuerung (z. B. in Depenbusch et al. 2023 oder Kapp et al. 2022).

Das Hauptziel eines Montagetrainings besteht darin, dass die Beschäftigten das Gelernte erfolgreich in die Praxis umsetzen können. Forschung zur Effektivität konzentrierte sich in den vergangenen Jahren daher vor allem auf objektive Leistungsmaße – also inwiefern MR-basierte Trainings dazu beitragen, dass WerkerInnen ihre Aufgaben möglichst schnell und fehlerfrei erledigen können (Blattgerste et al. 2017; Doolani et al. 2020b; Gavish et al. 2015). Hier zeigt die aktuelle Literatur jedoch teils widersprüchliche Ergebnisse, sodass bisher keine klare Aussage zur Wirksamkeit der Trainings abgeleitet werden kann. Die inkonsistenten empirischen Befunde lassen sich unter anderem auf eine enorme Vielfalt an verwendeter Hardware, Technologien

und betrachteter Montageaufgaben sowie durch die verschiedenen methodischen Ansätze zur Untersuchung der Effekte von MR-basiertem Training zurückführen (Daling 2024).

Aus einer menschenzentrierten Perspektive umfasst Trainingserfolg jedoch mehr als reine Performanz: Akzeptanz, wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit und mentale Beanspruchung sind zentrale Voraussetzungen für die nachhaltige Nutzung digitaler Trainingsformate (Langer 2020; deLone und McLean 2002). Um einen wirksamen Einsatz der Technologien in der Praxis zu gewährleisten, sollten AR- und VR-basierte Trainings nicht nur den Lernerfolg in Form von objektiven Leistungsmaßen sicherstellen, sondern auch von Nutzenden akzeptiert und als hilfreich empfunden werden (Langer 2020; Nickel und Lungfiel 2024; Minow et al. 2021). Subjektive Bewertungen liefern wichtige Erkenntnisse über die Einstellungen, Wahrnehmungen, Zufriedenheit und Schwierigkeiten der Nutzenden bei der Anwendung einer bestimmten Trainingsmethode (deLone und McLean 2002) und spielen daher eine ebenso wichtige Rolle in der Evaluation und Bewertung MR-basierter Trainings im Montagekontext.

Obwohl bei anderen MR-basierten Trainingsformaten positive Effekte für die Nutzenden sowohl in Bezug auf positive subjektive Bewertungen als auch auf eine gesteigerte menschliche Leistungsfähigkeit nachgewiesen wurden (z. B. beim körperlichen Training von Gleichgewichtsfähigkeiten (Kaplan et al. 2021; Prasertsakul et al. 2018; Rose et al. 2000)), konnte im Bereich manueller Montageaufgaben bislang kein klarer Vorteil von MR-basiertem Training gegenüber traditionellem Training nachgewiesen werden (Hegenberg und Schmidt 2021; Kaplan et al. 2021; Minow et al. 2021). Derzeit lässt sich nicht sagen, ob AR- und/oder VR-basierte Trainings im Bereich manueller Montageaufgaben den Trainingserfolg in Bezug auf die subjektiven Bewertungen der Nutzenden und deren objektiv messbare Leistung sicherstellen oder sogar einen Vorteil gegenüber traditionellen Trainingsmethoden bieten.

1.3 Zielsetzung

Der vorliegende Beitrag hat zum Ziel, eine ganzheitliche Betrachtung sowohl leistungsbezogener wie auch psycholo-

gischer Effekte AR- und VR-basierter Trainings vorzunehmen. Hierfür werden im Folgenden zentrale Erkenntnisse eines Scoping Review (Daling und Schlittmeier 2024) aktueller wissenschaftlicher Literatur synthetisiert. Diese werden um die Ergebnisse einer umfassenden experimentellen Studie (Daling et al. 2023) ergänzt, um schließlich Implikationen für die Praxis zur Effektivität AR- und VR-basierter Trainings in manuellen Montageaufgaben abzuleiten. Untersucht werden (i) kurz- und längerfristige Effekte auf objektive Leistungsmaße, (ii) subjektive Bewertungen (Benutzerfreundlichkeit, Aufgabenlast) sowie (iii) potenzielle Moderatoren auf Seiten der Nutzenden.

Im Folgenden werden zunächst die zentralen Ergebnisse des Scoping Reviews (Abschnitt 2) und der experimentellen Studie (Abschnitt 3) jeweils für sich dargestellt und diskutiert. Anschließend werden in Abschnitt 4 beide Befundstränge zusammengeführt und in Abschnitt 5 die daraus resultierenden Implikationen für Forschung und Praxis abgeleitet.

2 Literaturbasierte Erkenntnisse zu den Effekten von AR- und VR-Trainings

Der von Daling und Schlittmeier (2024) durchgeführte literaturbasierte Scoping Review untersucht die Effekte von AR- und VR-basiertem Training auf Leistungsindikatoren und subjektive Bewertungen bei manuellen Montagetätigkeiten im Vergleich zu traditionellen Trainingsmethoden. Ziel war es, das heterogene Forschungsfeld und vorliegende empirische Befunde zu analysieren und wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse für Forschung und Industrie abzuleiten. Die Durchführung eines Scoping Review leistet dabei einen wichtigen Beitrag zur Identifikation und Bewertung belastbarer Evidenz, sowohl hinsichtlich der subjektiven Bewertung von AR- und VR-basiertem Training durch die Nutzenden als auch bezüglich dessen Auswirkungen auf die menschliche Leistung bei der manuellen Montage im Vergleich zu traditionellem Training. Im Fokus steht die Forschungsfrage, inwiefern sich diese AR- und VR-basierten Trainingsformate von traditionellen Trainingsmethoden in ihren Effekten auf subjektive und objektive Leistungsparameter unterscheiden.

2.1 Methodisches Vorgehen

Scoping Reviews lassen sich als Vorstufe systematischer Literaturreviews und Metaanalysen verstehen (Arksey und O'Malley 2005) und eignen sich insbesondere, die heterogene Forschungsevidenz zu MR-basiertem Training für manuelle Montageaufgaben zusammenzufassen, zentrale Merkmale oder Faktoren im Zusammenhang mit MR-basiertem Training zu identifizieren und die Erkenntnisse

über die Effekte des Trainings in einheitliche Aussagen zu transferieren. Die Methode dieses Scoping Reviews basiert auf dem von Peters et al. (2020) vorgeschlagenen iterativen Ansatz für Scoping Reviews, der auf dem fünfstufigen Rahmen von Arksey und O'Malley (2005) sowie Levac et al. (2010) aufbaut. Dabei wird zunächst die Forschungsfrage festgelegt (Stufe 1) und anschließend relevante Studien identifiziert (Stufe 2), die weitergehend in einem iterativen Vorgehen selektiert werden (Stufe 3). Im vierten Schritt werden die gesammelten Daten übersichtlich dargestellt und darauf basierend die Ergebnisse zusammengefasst und berichtet (Stufe 5).

Im Rahmen des Scoping Reviews wurden entsprechend des PRISMA-Schemas für Scoping Reviews (Moher et al. 2009) insgesamt 2043 Artikel auf den Plattformen ProQuest, Web of Science und Ebcso Host identifiziert. Anhand vordefinierter Ein- und Ausschlusskriterien in Bezug auf die Charakteristika der ProbandInnen, dem zu betrachtenden Konzept und Kontext des Forschungsfeldes sowie festgelegter Artikelcharakteristika wurden 24 Artikel für die Analyse ausgewählt und in Bezug auf fünf zentrale Aspekte analysiert: (1) industrielle Anforderungen an MR-gestütztes Training, (2) Nutzung und Klassifikation von MR-Technologien, (3) eingesetzte Maße zur Bewertung von Trainingseffekten, (4) Ergebnisse zu objektiv gemessener Leistung und subjektiven Evaluationen sowie (5) identifizierte Forschungslücken. Eine nähere Beschreibung des methodischen Vorgehens und der Auswahlkriterien sowie die Auflistung der inkludierten Artikel findet sich im Originalartikel (Daling und Schlittmeier 2024). Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse beziehen sich insbesondere auf die Ergebnisse zu den Effekten von MR-basiertem Training auf objektive Leistungsmaße und subjektive Evaluationen im Vergleich zu traditionellen Trainingsmethoden.

2.2 Zentrale Ergebnisse

Um die Wirksamkeit von MR-basiertem Training zu untersuchen ist es unabdingbar, ein tiefergehendes Verständnis für die verwendeten Trainingstechnologien und -formate zu erlangen. Daher werden im Folgenden zunächst die in den Artikeln verwendeten Technologien klassifiziert. Anschließend werden die Effekte dieser Trainingsformate im Hinblick auf objektive Leistungsmaße und subjektive Evaluationen berichtet.

2.2.1 Klassifizierung der Trainingstechnologien

Bezüglich der eingesetzten Hardware und Funktionen von AR-, VR- und MR-basierten Trainingssystemen zeigte sich, dass die Bezeichnungen und Klassifikationen der Technologien – selbst bei identischer Hardware – innerhalb der untersuchten Studien von den AutorInnen unterschiedlich

vorgenommen wurden. Daher wurde für die im Rahmen der Untersuchung betrachteten Studien eine neue Klassifikationsgrundlage entsprechend des von Skarbez et al. (2021) überarbeiteten MR-Kontinuums nach Milgram und Kishino (1994) vorgeschlagen. Unter Berücksichtigung der verwendeten Hard- und Software sowie der jeweiligen funktionalen Eigenschaften – insbesondere hinsichtlich ihres Umfangs an Weltwissen, ihres Immersionsgrades und ihrer Kohärenz (siehe Skarbez et al. 2021) – konnten drei Kategorien für AR-basierte Trainingssysteme (AR-Projektoren, AR-Handhelds und AR-HMDs) sowie zwei Kategorien für VR-basierte Trainingssysteme (bildschirmbasierte VR mit und ohne stereoskopische Brillen und VR-HMDs) abgeleitet werden (Daling und Schlittmeier 2024).

Insgesamt wurden zwölf von den 24 Artikeln identifiziert, die AR-basierte Trainingsformate untersuchten. Diese wurden den drei Unterkategorien *AR-Projektoren* (Hou und Wang 2013; Hou et al. 2013, 2015; Loch et al. 2019), *AR-Handhelds* (Gavish et al. 2015; Kwiatek et al. 2019; Webel et al. 2013) sowie *AR-Head-Mounted Displays (HMDs)* (González-Franco et al. 2016; Koumaditis et al. 2019; Werrlich et al. 2018a, b; Westerfield et al. 2015) zugeordnet. Alle AR-basierten Trainingstechnologien wurden auf der linken Seite des Kontinuums eingeordnet, wo ein hoher Grad an Weltwissen sowie die Wahrnehmung realer Elemente durch die jeweilige MR-Trainingsumgebung ermöglicht wurden – also durch das Einblenden virtueller Objekte in die reale Umgebung.

Bildschirmbasierte VR-Technologien wurden in insgesamt acht der untersuchten 24 Artikel erforscht und im Rahmen des Reviews in der Mitte des Kontinuums eingeordnet. Die Bezeichnung *monoskopisches, bildschirmbasiertes VR-Training* wurde verwendet, wenn in den jeweiligen Studien beschrieben wurde, dass dreidimensional modellierte Umgebungen auf einem Bildschirm dargestellt wurden, ohne dass zusätzliche Hilfsmittel wie beispielsweise stereoskopische Brillen zum Einsatz kamen. Monoskopische VR lässt sich gemäß Singer (1995) als die gleichzeitige Darstellung desselben Bildes für beide Augen definieren. Dadurch entsteht ein geringerer Immersionsgrad, während zugleich ein vergleichsweise hoher Anteil an Weltwissen bzw. kontextueller Orientierung erhalten bleibt. Trotz der geringeren immersiven Qualität wird diese Form der VR in mehreren industriellen Kontexten als relevante Trainingsmethode beschrieben, insbesondere im Bereich montagerelevanter Schulungen (vgl. Gavish et al. 2015; Hoedt et al. 2017; Langley et al. 2016; Velaz et al. 2014). Wurde in den Artikeln im Rahmen der bildschirmbasierten VR hingegen mit *stereoskopischen Brillen* gearbeitet (Al-Ahmari et al. 2018; Carlson et al. 2015; Cooper et al. 2018; Oren et al. 2012), wurden die Technologien näher auf der rechten Seite des überarbeiteten Realitäts-Virtualitäts-Kontinuums eingeordnet, da die entstehende Tiefenillusion (Singer

1995) weniger Welt- und Kontextwissen, dafür aber einen höheren Immersionsgrad ermöglicht.

VR-HMD-basierte Trainingssysteme wurden in fünf der untersuchten Studien (Doolani et al. 2020a; de Moura und Sadagic 2019; Koumaditis et al. 2020; Murcia-Lopez und Steed 2018; Roldan et al. 2019) genutzt und auf der rechten Seite des Kontinuums – also im Bereich der virtuellen Umgebung – eingeordnet. Die Kategorie VR-HMD weist gemäß der Definition einen geringen Grad an Weltwissen auf, da die reale Umgebung durch geschlossene Brillen vollständig ausgeblendet wird und die Nutzenden vollständig in die dreidimensionale virtuelle Umgebung eintauchen (Milgram und Kishino 1994).

2.2.2 Effekte von MR-basierten Trainings

Entsprechend der Klassifizierung wurden sowohl die Effekte für AR-basiertes Training (Projektoren, Handhelds und HMDs) sowie für VR-Training (entweder bildschirm- oder HMD-basiert) hinsichtlich objektiver Leistungsmaße und subjektiver Evaluationen untersucht. Als objektive Leistungsmaße wurden in den Artikeln v. a. die *Aufgabenbearbeitungszeit* (also die Zeit, die zum Durchführen der Montage benötigt wird) und die *Fehleranzahl* während der Montage evaluiert. Die in den Artikeln am häufigsten untersuchten Zielvariablen der subjektiven Evaluationen umfassten die *wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit* (z. B. System Usability Scale; Brooke 1996) und die *wahrgenommene Aufgabenlast* (z. B. NASA Task Load Index; Hart 2006) während des Montagetrainings. Die Aufgabenlast, also die mentale, physische und leistungsbezogene Beanspruchung der Nutzenden sollte während eines Trainings so gering wie möglich ausfallen, während eine hohe Benutzerfreundlichkeit für das technologiegestützte Training förderlich ist. Die Effekte von AR- und VR-basierten Trainings wurden im Rahmen des Scoping Reviews hinsichtlich dieser Zielvariablen geclustert und zusammengefasst.

Die Ergebnisse zeigten, dass die AR-basierten Schulungsformate (Projektoren, Handhelds und HMDs) insgesamt systematische Vorteile gegenüber herkömmlichen papierbasierten Trainings in Bezug auf beide objektiven Leistungsmaße aufwiesen, insbesondere gegenüber papierbasierten Trainings. Diese Überlegenheit zeigte sich vor allem in den objektiven Leistungsindikatoren *Aufgabenbearbeitungszeit* und *Fehleranzahl*. Die subjektiven Bewertungen ergaben konsistent, dass AR-basierte Trainings als besonders *benutzerfreundlich* wahrgenommen wurden und mit einer subjektiv empfundenen Reduktion der *Aufgabenlast* einhergingen.

Im Gegensatz dazu zeigte sich bei VR-basierten Trainingssystemen – sowohl bei bildschirmgestützten als auch bei HMD-basierten Varianten – eine größere Varianz in den Effekten hinsichtlich objektiver Leistungsmaße und sub-

jektiver Evaluationen. In den meisten Fällen führten bildschirmbasierte oder HMD-gestützte VR-Trainings zu vergleichbaren Leistungen wie traditionelle Trainingsformen. Bildschirmbasierte VR-Trainings erzielten beispielsweise ähnliche Ergebnisse in *Aufgabenbearbeitungszeit* und *Fehleranzahl* wie papier- oder videobasierte Trainings, unabhängig davon, ob mono- oder stereoskopische Darstellungen verwendet wurden. Im Vergleich zu Trainings mit physischen Objekten schnitten sie jedoch in zwei von drei Fällen signifikant schlechter ab (Al-Ahmari et al. 2018; Carlson et al. 2015). Wurden während des Trainings zusätzliche sensorische Hinweise – etwa taktiles Feedback oder aufgabenspezifische akustische Signale – bereitgestellt, konnte die Leistung der Teilnehmenden verbessert werden (Cooper et al. 2018).

Für VR-HMD-basierte Trainings zeigte sich eine bessere Leistung hinsichtlich der *Aufgabenbearbeitungszeit* im Vergleich zu papierbasierten Trainings, insbesondere bei weniger komplexen Montageaufgaben. Bezüglich der *Fehleranzahl* erwiesen sich VR-HMDs hingegen als gleichwertig oder etwas schwächer als traditionelle Trainingsformen. Auffällig war zudem, dass sowohl bildschirmbasierte als auch HMD-basierte VR-Trainings unmittelbar nach der Schulung häufig geringere Leistungen zeigten, langfristig jedoch zu einer gleichwertigen oder besseren Beibehaltung der erlernten Fertigkeiten führten – ein Befund, der in mehreren Studien bestätigt wurde.

Hinsichtlich der subjektiven Evaluationen wurde VR-Training als benutzerfreundlicher als papier- oder videobasierte Ansätze eingeschätzt, gleichzeitig jedoch als schwieriger in der Handhabung im Vergleich zu Trainings mit physischen Objekten. Aufgabenlast wurde in den Studien seltener betrachtet, hier zeigte jedoch eine Studie, dass die *Aufgabenlast* die *Aufgabenbearbeitungszeit* positiv beeinflusste, was bedeutet, dass eine höhere *Aufgabenlast* zu längeren Montagezeiten führte und gleichzeitig mit einer höheren *Fehleranzahl* einherging (Koumaditis et al. 2020).

2.3 Diskussion

Die Ergebnisse des Scoping Reviews zeigen, dass MR-basierte Trainings bislang nicht konsistent bessere, jedoch mindestens vergleichbare Effekte wie papier- oder videobasierte Trainings auf die Montageleistung sowie auf die subjektiven Evaluationen durch die Nutzenden haben. Insbesondere AR-basierte Trainings erwiesen sich im Vergleich zu herkömmlichen Trainings als positiv für die subjektive Bewertung der Nutzenden und verbesserten die objektiven Leistungskennzahlen. VR-basierte Trainings wurden mit gleichen oder höheren Werten in der Benutzerfreundlichkeit bewertet und führten meist, wenn auch nicht durchgängig, zu einer vergleichbaren Montageleistung wie traditionelle Trainings. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass

vor allem AR-basierte Trainings das Potenzial haben, sich zu einer zuverlässigen Methode zur Sicherstellung des Trainingserfolgs zu entwickeln.

Im Rahmen des Reviews wurde allerdings deutlich, dass in den 24 selektierten Artikeln fast ausschließlich die unmittelbaren Effekte von MR-basierten Trainings auf die Leistung untersucht wurden. Einzelne Studien zeigten jedoch bereits vielversprechende Ergebnisse von z. B. VR-basierten Trainings auf den langfristigen Trainingserfolg, weshalb weitere Forschung auch die längerfristigen Effekte in den Fokus rücken sollte. Weiter wurden in den analysierten Studien nur vereinzelt sowohl subjektive Evaluationen als auch objektive Leistungsmaße erhoben – zum Teil wurden auch gar keine subjektiven Maße erfasst. Dabei können umfassende und industrierelevante Aussagen zur Wirksamkeit MR-basierter Trainings nur durch eine ganzheitliche Betrachtung sowohl subjektiver Evaluationen wie auch objektiver Leistungsmaße abgeleitet werden.

Darüber hinaus wurde deutlich, dass noch zu wenig Wissen darüber vorhanden ist, ob AR- oder VR-basiertes Training und damit welcher Grad an Weltwissen, Immersion und Kohärenz einer Technologie für das Anlernen von Mitarbeitenden zur Ausführung neuer Montageaufgaben hilfreicher ist. Um die beste Trainingsmethode für die Mitarbeitenden auszuwählen, die sie optimal auf manuelle Montageaufgaben vorbereitet, ist ein direkter Vergleich zwischen AR- und VR-basiertem Training erforderlich. Bei der Auswahl von Vergleichsgruppen ist ferner zu beachten, dass vergleichbare oder bessere Effekte von MR-basiertem Training zwar im Vergleich zu papierbasierten Trainings gefunden wurden, ein Vorteil zu anderen digitalen Formaten (wie z. B. Videos) jedoch nicht durchgängig nachgewiesen werden konnte.

Insgesamt waren die empirischen Befunde durch fehlende einheitliche Standards, Definitionen und Forschungsmethoden nur auf qualitativer Ebene vergleichbar. Zukünftige experimentelle Studien können durch die Verwendung eindeutig klassifizierter Technologien und standardisierter Methoden und Messinstrumente erheblich dazu beitragen, die Güte und Vergleichbarkeit wissenschaftlicher Forschung zu MR-basierten Trainings zu verbessern. Die im Rahmen des Scoping Reviews identifizierten Bedarfe für Anschlussforschung wurden im Rahmen einer experimentellen Studie adressiert, die im Folgenden vorgestellt wird.

3 Erkenntnisse einer experimentellen Studie zu den Effekten von AR- und VR-Trainings

Aufbauend auf dem im Scoping Review identifizierten Forschungsstand wurde in der hier vorzustellenden experimentellen Studie (Daling et al. 2023) untersucht, wie sich AR-,

VR- und videobasierte Trainings in ihrer Wirksamkeit beim Training manueller Montagefähigkeiten unterscheiden.

Dabei erschienen uns folgende Aspekte besonders wichtig zu berücksichtigen und zu prüfen:

1. Die Untersuchung langfristiger Effekte von AR- und VR-Trainings auf den Fertigungsbehalt, da diese bislang kaum systematisch untersucht wurden (vgl. Daling und Schlittmeier 2024).
2. Die integrale Betrachtung objektiver Leistungsmaße und subjektiver Bewertungen, da Letztere in bisherigen Studien häufig vernachlässigt wurden.
3. Ein direkter Vergleich von AR- und VR-basiertem Training innerhalb einer Studie, da frühere Untersuchungen beide Technologien meist getrennt betrachteten und somit offenlassen, ob sich Unterschiede in ihrer Trainingswirksamkeit zeigen.

Die hier vorzustellende Studie (Daling et al. 2023) schließt diese Forschungslücken, indem AR-, VR- und videobasierte Trainings hinsichtlich ihrer kurz- und langfristigen Effekte auf objektive Leistungsmaße und subjektive Bewertungen systematisch miteinander und mit videobasiertem Training als konventionelle Trainingsmethode verglichen wurden. Im Zentrum standen zwei Forschungsfragen (FF):

FF1 Unterscheiden sich AR-, VR- und videobasierte Trainings in ihrer Wirkung auf die kurz- und langfristigen objektiven Leistungsmaße?

FF2 Zeigen sich Unterschiede in der subjektiven Bewertung der Benutzerfreundlichkeit und wahrgenommenen Aufgabenlast bei der Nutzung dieser Trainingsmethoden?

3.1 Methodisches Vorgehen

Für die Untersuchung kurz- und langfristiger Effekte von AR-, VR- und videobasiertem Training auf die Montageleistung und subjektive Evaluationen wurde ein experimentelles 3×2 Design mit Messwiederholungen angewendet: 3 Trainingsmethoden (AR-HMD, VR-HMD, Video) \times 2 Messzeitpunkte (T1, T2). Die Versuchsteilnehmenden wurden einer der drei Trainingsgruppen zufällig zugeordnet. Sie erlernten einen prozeduralen Montageprozess an einem LEGO MINDSTORMS EV3 Roboter, der mehrere verschiedene Komponenten umfasste, und wurden gebeten, die Montageaufgabe sowohl unmittelbar nach dem Training (Messzeitpunkt T1) als auch zwei Wochen später (T2) ohne erneutes Training aus dem Gedächtnis durchzuführen.

Der Zusammenbau des Roboters umfasste zehn übergeordnete Schritte und beinhaltete alle Aspekte einer realistischen Montage (Fügen, Handhaben, Prüfen, Einstellen) (Lotter 2006). Das Training wurde in einer kontrollierten

Laborumgebung an einer realen Montagezelle durchgeführt, wobei das AR- und das videobasierte Training an einem physischen Arbeitsplatz stattfanden (hoher Grad an Welt- und Kontextwissen, geringerer Immersionsgrad), während das VR-Training in einem 3D-modellierten virtuellen Arbeitsplatz durchgeführt wurde (geringes Maß an Weltwissen, hoher Immersionsgrad), der dem physischen Setting entsprach. Die Instruktionsfolien waren in allen Gruppen identisch und lediglich das Medium variierte. Die Messung der tatsächlichen Montageleistung erfolgte in allen Bedingungen am physischen Arbeitsplatz.

Insgesamt konnten 96 der 103 Versuchsteilnehmenden in die Auswertung aufgenommen werden, da bei sieben Teilnehmenden technische Probleme in der Versuchsdurchführung auftraten. Die Stichprobe umfasste 51 männliche und 45 weibliche Personen im Alter zwischen 18 und 73 Jahren.

Für den Trainingserfolg wurden folgende Indikatoren herangezogen: Als objektive Leistungsmaße wurden die *Fehleranzahl* bei der Montage und die *Bearbeitungszeit der Montageaufgabe* erhoben. Dabei war die Nutzung eines Papierhandbuchs einmal pro Montageschritt erlaubt, wurde jedoch als ein Fehlerpunkt gewertet. Als subjektive Evaluationen wurde die *wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit* des Systems (System Usability Scale (SUS); Brooke 1996) und die *wahrgenommene Aufgabenlast* (NASA TLX; Hart 2006) während des Trainings von den Versuchsteilnehmenden erfasst.

Eine nähere Beschreibung des experimentellen Designs und der verwendeten Messinstrumente findet sich im Originalartikel (Daling et al. 2023).

3.2 Zentrale Ergebnisse

3.2.1 Objektive Leistungsmaße

Zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage (FF1) wurde untersucht, ob sich die drei Trainingsmethoden in ihrer Wirkung auf die objektive Montageleistung unterscheiden. Bei der Analyse der Auswirkungen verschiedener Trainingsformate auf die objektiven Leistungsmaße *Bearbeitungszeit* und *Fehleranzahl* (FF1, siehe Abb. 2) zeigten die Ergebnisse einer 3×2 ANOVA mit dem Zwischensubjektfaktor *Trainingsmethode* (AR, VR, Video) und dem Innersubjektfaktor *Messzeitpunkt* (T1, T2) einen statistisch signifikanten Effekt für den Messzeitpunkt sowohl in Bezug auf die *Bearbeitungszeit*, $F(1, 90) = 262,99$, $p \leq 0,001$, $\eta_p^2 = 0,75$, wie auch in Bezug auf die *Fehleranzahl*, $F(1, 91) = 144,95$, $p \leq 0,001$, $\eta_p^2 = 0,61$. Jedoch zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Trainingsmethoden AR, VR und Video in Bezug auf die *Bearbeitungszeit*, $F(2, 90) = 2,52$, $p = 0,964$, und die *Fehleranzahl*, $F(2, 91) = 1,975$, $p = 0,145$. Damit benötigten die Versuchsteilnehmenden unabhängig von der Trainingsmethode 14 Tage nach dem Trai-

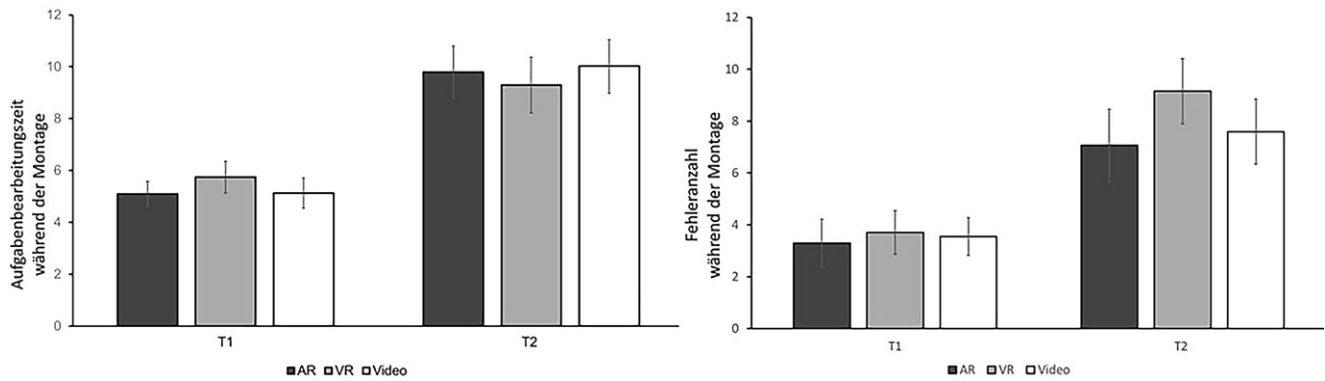


Abb. 2 Effekte von AR-, VR- und videobasiertem Training auf die Bearbeitungszeit (*links*) und die Fehlerzahl (*rechts*) während der Montage zum Zeitpunkt unmittelbar nach dem Training (T1) und 14 Tage später (T2). Anmerkung: Dargestellt sind Mittelwerte mit 95%-Konfidenzintervall. (Abbildung verändert nach Abbildung 3 und 4 in Daling et al. 2023)

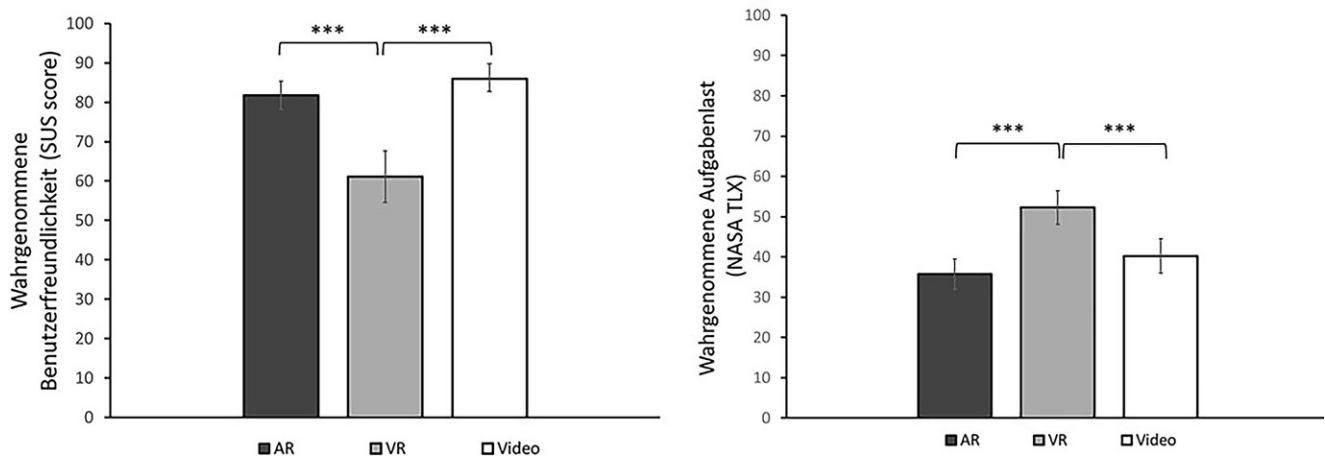


Abb. 3 Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit (SUS; Brooke 1996) (*links*) und die wahrgenommene Aufgabenlast (NASA TLX; Hart 2006) (*rechts*) von AR-, VR- und videobasiertem Training. Anmerkung: Dargestellt sind Mittelwerte mit 95%-Konfidenzintervall. *** $p < .001$. (Abbildung verändert nach Abbildung 5 und 6 in Daling et al. 2023)

ning (T2) mehr Zeit und machten mehr Fehler bei der Montage als unmittelbar nach dem Training (T1) (siehe Abb. 2).

3.2.2 Subjektive Evaluationen

Für die zweite Forschungsfrage (FF2) wurde analysiert, wie die Teilnehmenden die Trainingsmethoden hinsichtlich der subjektiven Evaluationen *Benutzerfreundlichkeit* und *wahrgenommener Aufgabenlast* bewerteten. Hier zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Trainingsmethoden sowohl hinsichtlich der *Benutzerfreundlichkeit*, Welch’s $F(2, 55,7) = 24,17, p \leq 0,001, \eta_p^2 = 0,43$ wie auch in Bezug auf die *Aufgabenlast*, $F(2, 93) = 17,06, p \leq 0,001, \eta_p^2 = 0,27$ (siehe Abb. 3). Post Hoc Analysen zeigten, dass VR-basiertes Training mit einer statistisch signifikant geringeren Benutzerfreundlichkeit und einer höheren wahrgenommenen Aufgabenlast bewertet wurde als AR- und videobasiertes Training. Zwischen AR und Video ergaben sich hier keine signifikanten Unterschiede (siehe Abb. 3).

3.2.3 Explorative Analysen

Ergänzend zu den dargestellten a-priori-Analysen wurden explorative Zusatzanalysen durchgeführt, um Hinweise für weiterführende Forschungsfragen zu gewinnen. Im Fokus standen dabei die Trainingsdauer je Trainingsmethode sowie die potenzielle Rolle von Alter und Vorerfahrung als Personenmerkmale.

Die Post-hoc Analyse der Trainingsdauer mittels einfaktorieller ANOVA und Tukey-Post-hoc-Tests zeigte, dass das VR-Training signifikant länger dauerte als das AR- und das videobasierte Training, während sich AR und Video nicht signifikant unterschieden. Bezüglich der Alterseffekte ergab eine Analyse der Leistungsdaten unter Kontrolle der Variable Alter im Rahmen einer ANCOVA partielle Leistungsvorteile der AR-Gruppe gegenüber der VR-Gruppe. Insbesondere zeigte die AR-Gruppe kürzere Bearbeitungszeiten zu T1 und eine geringere Fehlerquote zu T2. Auch die Vorerfahrung erwies sich als relevanter Einflussfaktor.

Zwar unterschieden sich die Gruppen nicht hinsichtlich ihrer durchschnittlichen Erfahrung mit der jeweiligen Technologie, jedoch zeigten Teilnehmende mit größerer Vorerfahrung signifikant schnellere Bearbeitungszeiten zu T1, nicht jedoch zu T2 oder in der Fehlerzahl. Alle Analysen und statistischen Kennwerte sind im Originalartikel aufgeführt (siehe Daling et al. 2023).

3.3 Diskussion

Die Ergebnisse der experimentellen Studie zeigen besonders im Hinblick auf die subjektiven Bewertungen der Nutzenden bessere Ergebnisse von AR- und videobasierten Trainings im Vergleich zu VR-basiertem Training. Alle drei Trainingsmethoden erreichten jedoch vergleichbare objektive Montageleistungen, sowohl unmittelbar nach dem Training wie auch nach einer längeren Pause von zwei Wochen zwischen Training und Überprüfung der Montageleistung. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass alle drei Trainingsformate grundsätzlich geeignet sind, kurzfristige und mittelfristige Lernziele im Bereich manueller Montagetätigkeiten zu unterstützen. Explorative Analysen deuten zudem darauf hin, dass nach Kontrolle der Variable Alter AR gegenüber VR leistungsseitig Vorteile aufweist (kürzere Bearbeitungszeiten zu T1, geringere Fehlerzahl zu T2). Ergänzend zeigte sich eine längere Trainingsdauer in der VR-Bedingung im Vergleich zu AR und Video.

Die experimentell gewonnenen Erkenntnisse stützen die im Scoping Review beobachtete Tendenz, dass AR- und VR-basierte Trainings mindestens vergleichbare Effekte wie traditionelle Formate erzielen und unterstreichen, dass eine ganzheitliche Betrachtung objektiver Leistungsmaße und subjektiver Evaluationen für Entscheidungen in industriellen Anwendungen zentral ist. Die Zufriedenheit und wahrgenommene Belastung der Mitarbeitenden sollten bei der Wahl der Trainingstechnologie ebenso berücksichtigt werden wie die Sicherstellung objektiv messbarer Performanz. Gerade im industriellen Kontext könnte eine positive subjektive Bewertung entscheidend sein, um eine langfristige Nutzungsabsicht und den Transfer der Lerninhalte sicherzustellen. Zudem legen die Befunde nahe, dass nutzungsbezogene Personenmerkmale (z. B. Alter, Vorerfahrung) die Effektivität der Trainingstechnologien moderieren können und in zukünftigen Studien systematisch berücksichtigt werden sollten, um differenzielle Empfehlungen für das technologiegestützte Training verschiedener Nutzendengruppen ableiten zu können.

Zusammenfassend verdeutlichen die Befunde, dass MR-basierte Trainings ein hohes Potenzial besitzen, Lernprozesse effektiv und nutzungsfreundlich zu gestalten. Während sich AR- und videobasierte Trainings, die durch einen hohen Kontextbezug zur realen Montagetätigkeit gekennzeichnet sind, durch höhere Akzeptanz und geringere sub-

jektive Belastung auszeichnen, erreicht VR trotz technischer Immersion bislang nicht durchgängig vergleichbare Bewertungen.

Um die gewonnenen Ergebnisse einzuordnen und ihre Bedeutung im Kontext des bestehenden Forschungsstands zu bewerten, werden im folgenden Abschnitt die Erkenntnisse aus dem Scoping Review und der experimentellen Vergleichsstudie gemeinsam betrachtet.

4 Zusammenfassende Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse des Scoping Reviews und der experimentellen Studie zeigen übereinstimmend, dass MR-basierte Trainings großes Potenzial für das Training manueller Montageaufgaben bieten und sowohl kurz- als auch längerfristig vergleichbare und teilweise bessere psychologische und leistungsbezogene Effekte als traditionelle papier- oder videobasierten Trainings erzielen. Insbesondere AR-basierte Trainings, die virtuelle Instruktionen mit real-physischen Arbeitsobjekten kombinieren, erzielten konsistent hohe Bewertungen bezüglich der Benutzerfreundlichkeit, niedrigere Werte in der wahrgenommenen Aufgabenlast und führten tendenziell zu besseren Leistungswerten in der Montage.

VR-basierte Trainings erreichten demgegenüber zwar ähnliche Ergebnisse auf objektive Leistungsparameter, wurden jedoch häufiger mit höherer wahrgenommener Aufgabenlast und geringerer Benutzerfreundlichkeit bewertet. Ein Vorteil gegenüber traditionellen, papierbasierten Trainingsmethoden zeigte sich insbesondere dann, wenn es sich um einfachere Montagetätigkeiten handelte. Darüber hinaus zeigte sich, dass die VR-Bedingungen zu späteren Messzeitpunkten oft bessere Leistungen erzielen konnten als im initialen Vergleich direkt nach dem Training. Auch die Erweiterung eines VR-Trainings um real-physische Trainingsobjekte zeigte im Vergleich zu reinen VR-Darstellungen meist bessere Ergebnisse. Die Ergebnisse der Studien deuten darauf hin, dass die immersive Qualität von VR allein nicht automatisch zu einem besseren Trainingsergebnis führt, sondern dass unter anderem die Charakteristika der Aufgabe und deren virtuelle Darstellung (z. B. die Möglichkeit einer haptischen Erfahrung mit dem Trainingsobjekt), deren Kohärenz bzw. Vorhersehbarkeit sowie der Zeitpunkt des Wissensabrufs vermutlich entscheidende Einflussfaktoren sind.

Um vergleichende Aussagen über die subjektiven Evaluationen von AR- und VR-basierten Trainings treffen zu können, wurden im Rahmen der hier vorgestellten Studien Messinstrumente zur Erfassung der Gebrauchstauglichkeit bzw. Benutzerfreundlichkeit (SUS, Brooke 1996) und der Arbeitslast (NASA TLX; Hart 2006) verwendet, da diese als generische, systemunabhängige Maße konzipiert sind und

damit vergleichende Aussagen zwischen unterschiedlichen technischen Systemen (hier AR vs. VR) unterstützen (Minow et al. 2021). Beide Skalen wurden zwar für die Evaluation technischer Systeme entwickelt, gehen aber nicht näher auf die Wahrnehmung der Spezifika und Funktionalitäten von AR und VR Technologien ein. Für eine tiefere Analyse der subjektiven Wahrnehmung von AR- oder VR-basierten Trainings könnten weitere geeignete Skalen zu subjektiven Faktoren wie Cybersickness (Kourtesis et al. 2023), Präsenz (Insko 2003), Nutzendenakzeptanz und -zufriedenheit (Prümper 1997; Venkatesh et al. 2003) in zukünftigen Untersuchungen eingesetzt werden. Auch die Berücksichtigung von qualitativen Verfahren (z. B. Thinking-Aloud Methode oder Interviews) können differenziertere Einblicke in die subjektive Wahrnehmung der Nutzenden geben.

Im Zusammenspiel legen beide Studien nahe, dass AR- und VR-basierte Trainings nicht als konkurrierende, sondern als komplementäre Technologien betrachtet werden sollten, deren jeweiliger Mehrwert stark vom Einsatzkontext abhängt. AR erscheint insbesondere dann vorteilhaft, wenn real-physische Objekte, motorische Handlungssicherheit und unmittelbarer Arbeitsplatzbezug im Vordergrund stehen (z. B. Funk und Schmidt 2021), während VR vor allem dort Stärken zeigt, wo sicherheitskritische, räumlich entfernte oder komplexe Montagekontexte simuliert werden müssen (z. B. Heinlein et al. 2021).

Neben den Kontextfaktoren der zu erlernenden Aufgabe zeigte sich in der experimentellen Studie deutlich, dass die Charakteristika der Nutzenden eine wichtige Rolle spielen. Den Ergebnissen zufolge beeinflussten frühere Erfahrungen mit der jeweiligen Technologie im Training die unmittelbare Montageleistung, während ein höheres Alter der Teilnehmenden sich zu einem späteren Messzeitpunkt negativ auf die Montageleistung auswirkte. In den im Scoping Review betrachteten Studien wurden diese Nutzerfaktoren jedoch selten betrachtet oder – ähnlich wie die subjektive Bewertung der Nutzenden – nicht mit den Leistungsmaßen in Zusammenhang gebracht. Das Zusammenspiel dieser Faktoren scheint aber für eine zuverlässige Einschätzung der Eignung von AR- und VR-Technologien für Montagetrainings unerlässlich.

Damit bestätigt sich die in der Einleitung formulierte Zielsetzung einer ganzheitlichen Betrachtung sowohl leistungsbezogener als auch psychologischer Effekte: Nur durch die Integration objektiver und subjektiver Kriterien kann die tatsächliche Wirksamkeit MR-basierter Trainings valide beurteilt und ihr Einsatz in der industriellen Praxis gezielt optimiert werden. Auf dieser Grundlage lassen sich im folgenden Abschnitt konkrete Implikationen für Forschung und betriebliche Anwendung ableiten.

5 Implikationen für die Praxis und Anknüpfungspunkte für weitere Forschung

Zukünftige Forschung sollte systematisch untersuchen, inwiefern AR- und videobasierte Trainingsmethoden Vorteile gegenüber VR bieten könnten, insbesondere unter Berücksichtigung von Alter und technologischer Vorerfahrung der Teilnehmenden. Eine gezielte Einbeziehung dieser Variablen könnte dazu beitragen, die Vorteile von MR-gestützten Schulungen weiter zu überprüfen, erwartungsgemäß weiter zu untermauern, ihre Anwendung in industriellen und betrieblichen Kontexten zu optimieren und schließlich auch die Akzeptanz dieser Technologien sowohl bei den Nutzenden als auch auf organisationaler Ebene nachhaltig zu fördern. Für die Anwendung der Technologien in der Praxis scheint es unerlässlich, älteren und unerfahrenen AnwenderInnen genügend Zeit zu geben, die Technologien in einem geschützten Rahmen auszuprobieren, bevor sie im Montagetraining eingesetzt werden.

Ein gelungener Übertrag der vorgestellten Erkenntnisse in die betriebliche Praxis erfordert jedoch auch, weitere Kontextfaktoren und Rahmenbedingungen stärker einzubeziehen. Hierzu gehört, dass die Auswahl einer Trainings-technologie erst nach einer tiefgehenden Analyse der Aufgabenspezifika erfolgen sollte, um z. B. die Notwendigkeit der Verwendung real-physischer Objekte im Training, Dauer und Abfolge der Tätigkeiten und Erlernen der korrekten Handhabung von Werkzeugen für die Montage abzuklären.

Darüber hinaus sind auch Faktoren der Zeit- und Orts(un)abhängigkeit des Trainings sowie sicherheitsrelevante Fragen zu berücksichtigen. So kann eine gefährdungsträchtige Trainingsumgebung trotz der hier gezeigten Vorteile von AR-basierten Formaten in der Praxis die Entscheidung für eine VR-Lösung als sicherere Alternative begünstigen. Bezüglich der vergleichsweise niedrigen Benutzerfreundlichkeit von VR könnte neben den von uns untersuchten Faktoren auch der Aspekt der wahrgenommenen *Kohärenz* der dargestellten Inhalte (siehe Skarbez et al. 2021) eine Rolle spielen, da die Inkohärenz zwischen virtuellen und erwarteten Reizen möglicherweise als belastend oder störend wahrgenommen werden kann. Dies sollte daher in zukünftigen Studien im Rahmen der subjektiven Evaluationen betrachtet werden.

In jedem Fall gilt es, die Bedürfnisse, Präferenzen und Kompetenzen der Nutzenden in zukünftigen Entwicklungs- und Entscheidungsprozessen frühzeitig und partizipativ einzubeziehen, um die Akzeptanz, Motivation und nachhaltige Nutzung technologischer Trainingsinnovationen zu erhöhen. Dadurch kann ein Beitrag dazu geleistet werden, AR- und VR-Technologien nicht nur als technische, sondern als menschengerechte Instrumente moderner Produktionsarbeit zu etablieren, die den Lernprozess erleichtern, Handlungs-

sicherheit in komplexen Montageschritten stärken und das Vertrauen in die eigene Kompetenz sowie in die Technologie fördern.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen. Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

- Al-Ahmari A, Ameen W, Abidi MH, Mian SH (2018) Evaluation of 3D printing approach for manual assembly training. *Int J Ind Ergon* 66:57–62
- Arksey H, O'Malley L (2005) Scoping studies: towards a methodological framework. *Int J Soc Res Methodol* 8(1):19–32
- Bannat A, Wallhoff F, Rigoll G, Friesdorf F, Bubb H, Stork S, Müller HJ, Schubö A, Wiesbeck M, Zäh MF (2008) Towards optimal worker assistance: a framework for adaptive selection and presentation of assembly instructions. *Proceedings of the 1st International Workshop on Cognition for Technical Systems*. Springer, Cotesys
- Blattergerste J, Strenge B, Renner P, Pfeiffer T, Essig K (2017) Comparing conventional and augmented reality instructions for manual assembly tasks. *Proceedings of the 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, S 75–82
- Bornwasser M (2020) Montage und Komplexität. In: *Informatorische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage: Theorie und Praxis*, S 43–64
- Brandl C, Mertens A, Luczak H, Nitsch V (2018) Produktion in der Industrie 4.0: Renaissance der arbeitswissenschaftlichen Forschung für manuelle Montagesysteme. *Z Arbeitswissenschaften* 72:227–228
- Brolin A, Thorvald P, Case K (2017) Experimental study of cognitive aspects affecting human performance in manual assembly. *Prod Manuf Res* 5(1):141–163
- Brooke J (1996) SUS: A quick and dirty usability scale. In: Jordan PW, Thomas B, Weerdmeester BA, McClelland IL (Hrsg) *Usability evaluation in industry*. Taylor & Francis, London, S 189–194
- Carlson P, Peters A, Gilbert SB, Vance JM, Luse A (2015) Virtual training: learning transfer of assembly tasks. *IEEE Trans Visual Comput Graphics* 21(6):770–782
- Comberti L, Demichela M, Leva MC (2020) Human skills assessment as a support to human factor management. *Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference*.
- Cooper N, Milella F, Pinto C, Cant I, White M, Meyer G (2018) The effects of substitute multisensory feedback on task performance and the sense of presence in a virtual reality environment. *PLoS ONE* 13(2). <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0191846>
- Daling LM (2024) Gear it up! Human potential in manual assembly—subjective evaluations and performance effects of augmented and virtual reality in industrial training. *RWTHpublications* <https://doi.org/10.18154/RWTH-2024-07521>
- Daling LM, Schlittmeier SJ (2024) Effects of augmented reality-, virtual reality-, and mixed reality-based training on objective performance measures and subjective evaluations in manual assembly tasks: a scoping review. *Hum Factors* 66:589–626
- Daling LM, Tenbrock M, Isenhardt I, Schlittmeier SJ (2023) Assemble it like this!—Is AR- or VR-based training an effective alternative to video-based training in manual assembly? *Appl Ergon* 110:104021
- DeLone WH, McLean ER (2002) Information systems success revisited. *Proceedings of the 35th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. IEEE, S 2966–2976
- de Moura DY, Sadagic A (2019) The effects of stereopsis and immersion on bimanual assembly tasks in a virtual reality system. *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces*, S 286–294
- Deppenbusch S, Schaper N, Schumacher JP (2023) Virtual reality for prospective and process-related competence modeling—piloting a participatory approach and investigating user acceptance of the applied VR-tool. *Z Arbeitswissenschaften* 77:350–374
- Doolani S, Owens L, Wessels C, Makedon F (2020a) vIS: an immersive virtual storytelling system for vocational training. *Appl Sci* 10(22):8143
- Doolani S, Wessels C, Kanal V, Sevastopoulos C, Jaiswal A, Nambiappan H, Makedon FA (2020b) A review of extended reality (XR) technologies for manufacturing training. *Technologies* 8(4):77
- Europäische Kommission, Generaldirektion für Forschung und Innovation (2021) *Industry 5.0: towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*. Publications Office of the European Union, Luxembourg
- Funk J, Schmidt L (2021) Evaluation of an augmented reality instruction for a complex assembly task: comparison of a smartphone-based augmented reality instruction with a conventional paper instruction for the teach-in phase in manual assembly. *I-com – J Interact Media* 20(1):63–72
- Funk M, Kosch T, Schmidt A (2016) Interactive worker assistance: comparing the effects of in-situ projection, head-mounted displays, tablet, and paper instructions. *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, S 934–939
- Gavish N, Gutierrez T, Weibel S, Rodriguez J, Peveri M, Bockholt U, Tecchia F (2015) Evaluating virtual reality and augmented reality training for industrial maintenance and assembly tasks. *Interact Learn Environ* 23(6):778–798
- Gonzalez-Franco M, Cermeron J, Li K, Pizarro R, Thorn J, Hannah P, Hutabarat W, Tiwari A, Bermell-Garcia P (2016) Immersive augmented reality training for complex manufacturing scenarios. *ArXiv abs/1602.01944*
- Hart SG (2006) NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later. *Proc Hum Factors Ergonomics Soc Annu Meet* 50(9):904–908
- Hegenberg J, Schmidt L (2021) Augmented-Reality-basierte Assistenz für das Anlernen manueller und roboterunterstützter Montageprozesse. *Z Arbeitswissenschaften* 75:367–387
- Heinlein M, Huchler N, Wittal R, Weigel A, Baumgart T, Niehaves B (2021) Erfahrungsgeleitete Gestaltung von VR-Umgebungen zur arbeitsintegrierten Kompetenzentwicklung: Ein Umsetzungsbeispiel bei Montage- und Wartungstätigkeiten. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaften* 75:388–404
- Henderson SJ, Feiner S (2011) Augmented reality in the psychomotor phase of a procedural task. *10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, S 191–200

- Hoedt S, Claeys A, Van Landeghem H, Cottyn J (2017) The evaluation of an elementary virtual training system for manual assembly. *Int J Prod Res* 55(24):7496–7508
- Hou L, Wang XY (2013) A study on the benefits of augmented reality in retaining working memory in assembly tasks: a focus on differences in gender. *Autom Constr* 32:38–45
- Hou L, Wang XY, Bernold L, Love PED (2013) Using animated augmented reality to cognitively guide assembly. *J Comput Civ Eng* 27(5):439–451
- Hou L, Wang XY, Truijens M (2015) Using augmented reality to facilitate piping assembly: an experiment-based evaluation. *J Comput Civ Eng* 29(1):5014007
- Insko B (2003) Measuring presence: subjective, behavioral and physiological methods
- Jeske T, von Garrel J, Starke J (2011) Erfolgsfaktor Flexibilität: Ergebnisse einer deutschlandweiten Unternehmensbefragung. *Ind Eng* 64(1):20–23
- Jeske T, Hasenau K, Schlick CM (2013) Flexible Arbeitsgestaltung und Lernprozesse in der Montage. In: Bornewasser M (Hrsg) *Arbeitszeit – Zeitarbeit: Flexibilisierung der Arbeit als Antwort auf die Globalisierung*. Springer, Wiesbaden, S 345–360
- Kaplan AD, Cruit J, Endsley M, Beers SM, Sawyer BD, Hancock PA (2021) The effects of virtual reality, augmented reality, and mixed reality as training enhancement methods: a meta-analysis. *Hum Factors* 63(4):706–726
- Kapp F, Matthes N, Kruse L (2022) Fehlerdiagnose mit Virtual Reality trainieren – Entwicklung und Erprobung einer virtuellen Offshore-Windenergieanlage. *Z Arbeitswissenschaften* 76:192–201
- Koumaditis K, Venkute S, Jensen FS, Chinello F (2019) Immersive training: outcomes from small scale AR/VR pilot-studies. 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, S 1–5
- Koumaditis K, Chinello F, Mitkidis P, Karg S (2020) Effectiveness of virtual versus physical training: the case of assembly tasks, trainer’s verbal assistance, and task complexity. *IEEE Comput Grap Appl* 40(5):41–56
- Kourtesis P, Linnell J, Amir R, Argelaguet F, MacPherson SE (2023) Cybersickness in virtual reality questionnaire (CSQ-VR): a validation and comparison against SSQ and VRSQ. *Virtual Worlds* 2:16–35
- Koziol LF, Budding DE (2012) Procedural learning. In: Seel NM (Hrsg) *Encyclopedia of the sciences of learning*. Springer, New York, S 2694–2696
- Kwiatk C, Sharif M, Li S, Haas C, Walbridge S (2019) Impact of augmented reality and spatial cognition on assembly in construction. *Autom Constr* 108:102935
- Langer E (2020) *Medieninnovationen AR und VR*. Springer Vieweg, Wiesbaden
- Langley A, Lawson G, Hermawati S, D’Cruz M, Apold J, Arlt F, Mura K (2016) Establishing the usability of a virtual training system for assembly operations within the automotive industry. *Hum Factors Ergon Manuf Serv Ind* 26(6):667–679
- Levac D, Colquhoun H, O’Brien KK (2010) Scoping studies: advancing the methodology. *Implement Sci* 5(1):1–9
- Loch F, Ziegler U, Vogel-Heuser B (2019) Using real-time feedback in a training system for manual procedures. *IFAC Pap Online* 52(19):241–246
- Lotter B (2006) Einführung. In: Lotter B, Wiendahl HP (Hrsg) *Montage in der industriellen Produktion: ein Handbuch für die Praxis*. Springer, Berlin Heidelberg, S 1–8
- Milgram P, Kishino F (1994) A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Trans Inf Syst* 77(12):1321–1329
- Minow A, Stüring S, Böckelmann I (2021) Gebrauchstaugliche Assistenzsysteme in der manuellen Montage – ein Vergleich von Pick-to-Light und AR-Konturen mittels VR-Simulation. *Z Arbeitswiss* 75:46–57
- Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman DG, PRISMA Group (2009) Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *PLoS Med* 6(7):e1000097
- Murcia-Lopez M, Steed A (2018) A comparison of virtual and physical training transfer of bimanual assembly tasks. *Trans Vis Comput Graph* 24(4):1574–1583
- Neumann P, Winkelhaus S, Grosse EH, Glock CH (2021) Industry 4.0 and the human factor—a systems framework and analysis methodology for successful development. *Int J Prod Econ* 233:107992
- Nickel P, Lungfiel A (2024) Evaluation of joystick built-in emergency stop function for mobile elevating work platform safety and human factors and ergonomics in accident prevention. *Z Arbeitswiss* 78:514–530
- Oestreich H, Wrede S, Wrede B (2020) Learning and performing assembly processes. *Proceedings of the 13th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, S 1–8
- Oren M, Carlson P, Gilbert S, Vance JM (2012) Puzzle assembly training: real world vs. virtual environment. 2012 IEEE Virtual Reality Workshops, S 27–30
- Peters MDJ, Godfrey C, McInerney P, Munn Z, Tricco AC, Khalil H (2020) Chapter 11: scoping reviews. In: Aromataris E, Munn Z (Hrsg) *JBIM manual for evidence synthesis*. JBI, Adelaide, S 167–473
- Prasertsakul T, Kaimuk P, Chinjenpradit W, Limroongreungrat W, Charoensuk W (2018) The effect of virtual reality-based balance training on motor learning and postural control in healthy adults: a randomized preliminary study. *Biomed Eng Online* 17(1):1–17
- Prümper J (1997) Der Benutzerfragebogen ISONORM 9241/10: Ergebnisse zur Reliabilität und Validität. In: Liskowsky R, Vellchovsky BM, Wünschmann W (Hrsg) *Software-Ergonomie ’97—Usability Engineering: Interaktion von Mensch-Computer-Interaktion und Software-Entwicklung*. Teubner, Stuttgart, S 253–262
- Roldan JJ, Crespo E, Martin-Barrio A, Pena-Tapia E, Barrientos A (2019) A training system for Industry 4.0 operators in complex assemblies based on virtual reality and process mining. *Robot Comput Integr Manuf* 59:305–316
- Rose FD, Attree EA, Brooks BM, Parslow DM, Penn PR (2000) Training in virtual environments: transfer to real world tasks and equivalence to real task training. *Ergonomics* 43(4):494–511
- Sautter B, Daling L (2021) Mixed reality supported learning for industrial on-the-job training. *Proceedings of the Conference on Learning Factories*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3864189>
- Singer MJ (1995) Task performance in virtual environments: stereoscopic versus monoscopic displays and head-coupling. US Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences, Arlington
- Skarbez R, Smith M, Whitton MC (2021) Revisiting Milgram and Kishino’s reality-virtuality continuum. *Front Virtual Real* 2:647997
- Slater M (2004) A note on presence terminology. *Presence Connect* 3:1–5
- Velaz Y, Arce JR, Gutierrez T, Lozano-Rodero A, Suescun A (2014) The influence of interaction technology on the learning of assembly tasks using virtual reality. *J Comput Inf Sci Eng* 14(4):41007
- Venkatesh V, Morris MG, Davis GB, Davis FD (2003) User acceptance of information technology: toward a unified view. *MISQ* 27(3):425–478
- Webel S, Bockholt U, Engelke T, Gavish N, Olbrich M, Preusche C (2013) An augmented reality training platform for assembly and maintenance skills. *Rob Auton Syst* 61(4):398–403
- Werrlich S, Lorber C, Nguyen PA, Yanez CEF, Notni G (2018a) Assembly training: comparing the effects of head-mounted displays and face-to-face training. In: Chen JYC, Fragomeni G (Hrsg) *Virtual, augmented and mixed reality: interaction, navigation, visual*

- lization, embodiment, and simulation VAMR 2018, Part I. Bd 10909. Springer, Cham, S 462–476
- Werrlich S, Nguyen PA, Notni G (2018b) Evaluating the training transfer of head-mounted display based training for assembly tasks. Proceedings of the 11th Pervasive Technologies Related to Assistive Environments Conference, S 297–302
- Westerfield G, Mitrovic A, Billingham M (2015) Intelligent augmented reality training for motherboard assembly. *Int J Artif Intell Educ* 25(1):157–172
- Hinweis des Verlags** Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.