

Evaluation einer Augmented-Reality-Anleitung für eine komplexe Montageaufgabe

Vergleich einer Smartphone-basierten Augmented-Reality-Anleitung mit einer klassischen Papieranleitung für die Anlernphase in der manuellen Montage

Johannes Funk¹ und Ludger Schmidt²

Abstract: Die vorliegende Studie vergleicht den Einsatz einer markerbasierten AR-Anleitung mit einer in der manuellen Montage üblichen Papieranleitung. Es wurden die Hypothesen geprüft, ob sich die Anleitungsart auf die Montagezeit, die Anzahl der Fehler, die Gebrauchstauglichkeit und die Beanspruchung der Mitarbeiter auswirkt. Statt mit studentischen Stichproben und künstlichen Montageaufgaben (z. B. Legobaugruppen) wurde die Studie mit 16 Auszubildenden an einem realen Arbeitsplatz für die Montage von Notgriffen zur Türentriegelung in Schienenfahrzeugen durchgeführt. Es wurden fünf Montagedurchgänge durchgeführt. Die Montagezeit und die gemachten Fehler wurden aus Videoaufzeichnungen ermittelt. Die Gebrauchstauglichkeit (SUS) und die Beanspruchung (NASA-TLX) wurden mit Fragebögen erhoben. Nachdem die AR-Gruppe zu Beginn langsamer montierte als die Papier-Gruppe, war diese im fünften Durchgang signifikant schneller. Die vergleichbare Fehleranzahl, Gebrauchstauglichkeit und Beanspruchung machen markerbasierte AR-Anwendungen besonders durch den leichten Einstieg und die geringen Kosten interessant für die Wissensvermittlung in der manuellen Montage.

Keywords: Augmented Reality, Digitalisierung, Montage, Anlernen, Feldstudie

1 Einleitung

Neben erheblicher Chancen für die Wirtschaft und den Mittelstand durch die zunehmende Digitalisierung [De16, In19] ergeben sich auch grundlegende Veränderungen der Arbeitswelt [Ap18]. Die voranschreitende Globalisierung, Änderungen der Markanforderungen und individuelle Kundenbedürfnisse sorgen für eine Zunahme der Variantenvielfalt und eine immer komplexer werdende Produktionsorganisation [WKG04]. Eine wachsende Produktindividualität führt zu sinkenden Losgrößen und kürzeren Produktlebenszyklen [Sc15]. Die dadurch häufig wechselnden Aufgabenfelder führen bspw. zu einer erhöhten Häufigkeit, mit der sich Mitarbeiter mit neuen Inhalten auseinandersetzen müssen [Hö17]. Aufgrund der neuen Herausforderungen gewinnt die Flexibilität, die nötig ist, um sich auf neue Varianten einzustellen, immer stärker an Bedeutung [Be98]. Hierdurch wird häufig auf eine manuelle oder teilautomatisierte

¹ Universität Kassel, Fachgebiet Mensch-Maschine-Systemtechnik, Mönchebergstraße 7, 34125 Kassel, J.Funk@uni-kassel.de

² Universität Kassel, Fachgebiet Mensch-Maschine-Systemtechnik, Mönchebergstraße 7, 34125 Kassel, L.Schmidt@uni-kassel.de

Montage gesetzt, um die hohe Flexibilität des Menschen zu nutzen [Sc15]. Die hohe Variantenvielfalt hat in der Montage eine Zunahme von Bauteilen und Werkzeugen zur Folge, was eine hohe Anforderung der Mitarbeiter bedeutet [Fr98]. Für die Montage von Baugruppen stehen Mitarbeitern oft nur Montagepläne in Form von Zusammenbauzeichnungen oder Arbeitsanweisungen in Textform zur Verfügung, deren Verständlichkeit in vielen Fällen unzureichend ist [Sc15]. Hinzu kommt, dass immer öfter ungelernete Mitarbeiter und Mitarbeiter mit geringen Sprachkenntnissen in Betrieben arbeiten, wodurch Fehler durch bspw. falsches Lesen oder falsches Interpretieren von Arbeitsunterlagen entstehen [Rö15].

Ein Ansatz zur Verbesserung der Verständlichkeit von Arbeitsanweisungen und Montageanleitungen können innovative Arten der Wissensvermittlung mit Augmented Reality (AR) und Virtual Reality (VR) darstellen [Sc04]. Der Begriff Augmented Reality beschreibt die Ergänzung oder auch Erweiterung der Realität um virtuelle Inhalte [Dö13], die in Echtzeit, interaktiv und räumlich korrekt registriert werden [Az97]. Neben der Darstellung von virtuellen Inhalten bspw. auf einem transparenten Bildschirm eines Head-Mounted Display (Optical See-Through) [Tö10], können Bildschirme verwendet werden, um ein Kameravideo mit Inhalten zu erweitern (Video See-Through) [Cu16]. In Kombination mit dem optischen Trackingverfahren des Markertrackings lassen sich einfache AR-Anwendungen erstellen, die bspw. mit dem Smartphone oder einem Tablet verwendet werden können. Neben schwarz-weißen Mustern können auch beliebige andere Bilder als Marker verwendet werden, die von der Kamera des verwendeten Geräts erkannt und verwendet werden, um virtuelle Inhalte in Bezug zum jeweiligen Marker lagerichtig einzublenden [Tö10]. Da neben einer Kamera zum Erfassen der Marker nur meist kostenfreie Software zum Programmieren benötigt wird, stellt markerbasiertes AR eine kostengünstige Option für den Einsatz von AR dar [Tö10]. Hinzu kommt der einfache Umgang mit Markern, der auch für Laien einfach zu erlernen ist. Die Marker können schnell erstellt, ausgedruckt und anschließend frei platziert werden [Dö13].

Der Einsatz von AR-Markern in Montageanleitungen wurde bereits in verschiedenen Studien untersucht. Hou und Wang fanden heraus, dass Probanden mit einer AR-Montageanleitung eine Legobaugruppe schneller und mit weniger Fehlern montierten als mit einer gedruckten Papieranleitung [HW13]. Loch et al. untersuchten ebenfalls die Montage einer Legobaugruppe, verglichen hierbei aber eine Videoanleitung mit einer AR-Anleitung. Die Studie mit 17 Probanden zeigte keinen signifikanten Unterschied in der Montagedauer und der Beanspruchung (NASA-TLX), allerdings wurden in der AR-Gruppe signifikant weniger Fehler gemacht [LQB16]. Da in der Studie beide Gruppen verschiedene Legomodelle aufbauten, ist eine Vergleichbarkeit der Komplexität der Montageaufgabe fraglich.

Statt einer Legobaugruppe betrachtete Hořejší die Montage eines Siphons und verglich hierbei ebenfalls eine Montageanleitung in Papierform mit einer AR-Anleitung. Die AR-Anleitung zeigte dem Probanden neben einem 3D-Modell des aktuellen Bauteils ebenfalls das korrekte Teilelager mit Pfeilen an, in dem das benötigte Bauteil zu finden war. Die

Studie zeigte eine große Zeitersparnis in der Montage des ersten Montagedurchgangs [Ho15]. Dieser könnte allerdings mit der fehlenden Unterstützung in der Teileauswahl aus den Teilelagern der Papieranleitung zusammenhängen.

Die vorgestellten Studien betrachten Montageaufgaben, die teilweise stark von tatsächlicher Montage in Unternehmen abweichen. Um eine Übertragbarkeit der Laborstudien auf eine reale Montageaufgabe in Unternehmen zu gewährleisten, wird nachfolgend die vergleichende Evaluation einer Papieranleitung und einer AR-Anleitung an einem realen Montagearbeitsplatz für die Montage von Notgriffen zur Türentriegelung in Schienenfahrzeugen untersucht. Hierbei liegt der Fokus auf dem Einfluss der Anleitungsart auf die Montagedauer, die dabei gemachten Fehler, die Gebrauchstauglichkeit und die Beanspruchung der Mitarbeiter. In der Studie werden folgende Hypothesen geprüft: Die Anleitungsart wirkt sich auf die Montagezeit (H1) und die Anzahl der Montagefehler (H2) aus. Die AR-Anleitung unterscheidet sich in der Gebrauchstauglichkeit von der klassischen Papieranleitung (H3) und die Anleitungsart wirkt sich auf die Beanspruchung der Mitarbeiter aus (H4).

Die Besonderheit der Studie liegt in dem realen Anwendungsfall, da diese am Montageplatz eines Industrieunternehmens mit einer realer Baugruppe durchgeführt wird. Im Gegensatz zu häufig eingesetzten studentischen Stichproben wird die Studie mit Auszubildenden des Unternehmens durchgeführt, die sich alle in einer technischen Ausbildung befinden und vertraut mit der manuellen Montage sind. Hierdurch entsprechen die Probanden der Zielgruppe, für die der mögliche Einsatz von AR-Anleitungen in der Montage interessant ist.

2 Methode

2.1 Montageaufgabe

In der Studie wird die manuelle Montage eines Notgriffs zum Öffnen von Bahntüren betrachtet. Die Baugruppe wird in bis zu 30 verschiedenen Varianten gefertigt. Der in der Studie verwendete Notgriff besteht aus 16 Bauteilen, und die Montage unterteilt sich in verschiedene Tätigkeiten, wie dem Positionieren, Verschrauben, Verpressen, Einhängen und Ausrichten von Bauteilen. In Abb. 1 ist links ein Modell des fertig montierten Notgriffs zu sehen.

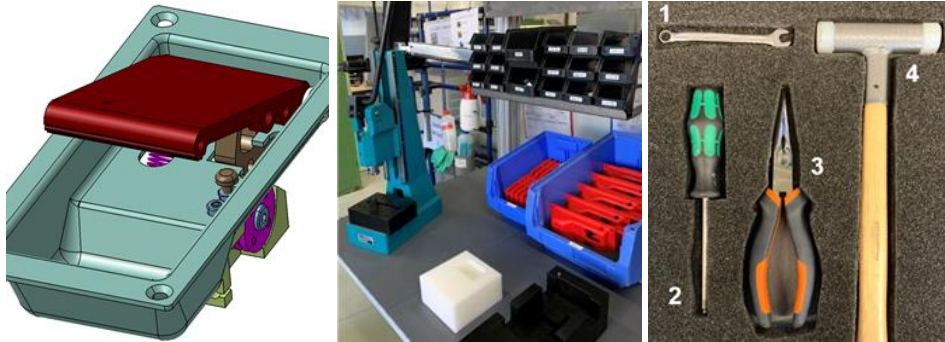


Abb. 1: 3-D-Modell des zu montierenden Notgriffs (links); Montagearbeitsplatz mit Teilelagern, Montagevorrichtungen und eine Einpressvorrichtung (mittig); für die Montage benötigtes Werkzeug (rechts): Ring-Maulschlüssel SW 8 (1), Innensechskantschlüssel SW 4 (2), Spitzzange (3), Kunststoffhammer (4)

Die Montage findet stückweise an einem Einzelarbeitsplatz statt. Trotz der komplexen Aufgabe kann die Montage von ungelerten Personen nach kurzer Anlernzeit selbstständig durchgeführt werden. Der Arbeitsplatz mit einem Montagetisch (90 cm x 150 cm) verfügt über Teilelager, die mit Positionsnummern gekennzeichnet sind. Als Montagehilfe stehen Montagevorrichtungen bereit, in die Bauteile eingelegt werden können und so die korrekte Positionierung erleichtern. Neben einfachen Handwerkzeugen steht eine Einpressvorrichtung für das Einpressen von Metallstiften zur Verfügung. Der Arbeitsplatz und die benötigten Werkzeuge sind in Abb. 1 zu sehen.

2.2 AR-Montageanleitung

Für die Studie wurde eine markerbasierte AR-Montageanleitung für den Notgriff als Smartphone-Anwendung erstellt. Als Grundlage diente hierzu eine bestehende und im Unternehmen eingesetzte Papieranleitung. Die Inhalte der Papieranleitung wurden in die AR-Anwendung übertragen. Für die AR-Anwendung wurde der Montageprozess in sieben Teilschritte unterteilt und mit je einem Marker versehen. Diese Marker werden von der Anwendung erkannt und verwendet, um passende Informationen lagerichtig anzuzeigen. In jedem der sieben Teilschritte werden dem Mitarbeiter 3-D-Modelle der gerade benötigten Bauteile, ein Textfeld mit den dazugehörigen Positionsnummern der Teilelager sowie ggf. weitere Informationen über den auszuführenden Arbeitsschritt angezeigt. Teilweise bestehen die Teilschritte aus mehreren aufeinander aufbauenden Montageschritten. Hierzu wurde die Anwendung um zwei Schaltflächen zum Vor- und Zurückschalten der angezeigten Informationen erweitert. Die Nutzung der Anwendung sowie die Darstellung auf dem Smartphone ist in Abb. 2 zu sehen.

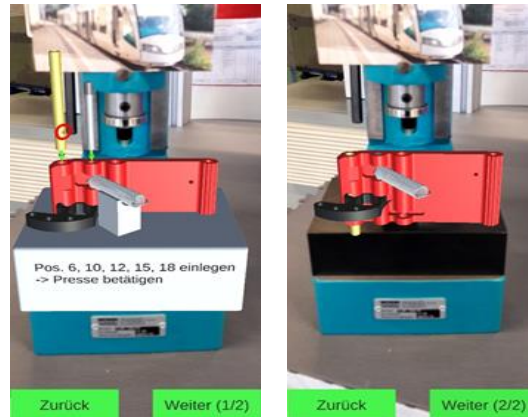


Abb. 2: Smartphone-Ansicht für Teil eins von zwei mit Angabe der Teilpositionsnummern sowie der Arbeitsaufforderung „Presse betätigen“, Schaltflächen „Zurück“ und „Weiter“ zum selbständigen Durchblättern von Informationen (links); Anzeige der korrekt montierten Teile (rechts)

Die AR-Anwendung wurde in der 3-D-Entwicklungsumgebung Unity (Version 2019.1.12f1) und dem Vuforia Kit für markerbasiertes AR erstellt. In Unity wurden die 3D-Modelle der Baugruppe mit den Markern der entsprechenden Teilschritte verknüpft und teilweise mit Text für die Positionsnummer und weiteren Hinweisen ergänzt.

2.3 Messung

Die Technikaffinität wurde mit dem standardisierten TA-EG-Fragebogen mit 19 Items auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala von 1 („Trifft gar nicht zu“) bis 5 („Trifft voll zu“) erhoben [Ka09]. Nachdem die Werte negativ formulierter Items negiert wurden, werden die Mittelwerte der vier Skalen *Begeisterung*, *Kompetenz*, *negative und positive Einstellung* zu einem Gesamtwert gemittelt. Die Werte liegen in einem Bereich von 1 (sehr niedrige Technikaffinität) und 5 (sehr hohe Technikaffinität).

Die Durchführzeiten und die Anzahl der Montagefehler wurden mittels Videoaufzeichnung für jeden der fünf Montagedurchgänge ausgewertet.

Zur Messung der Gebrauchstauglichkeit wurde der System-Usability-Scale-Fragebogen (SUS) verwendet [Br14]. Dieser besteht aus zehn Items, von denen jeweils fünf positiv und negativ formuliert sind. Die Items sind auf einer fünfgliedrigen Likert-Skala von 1 („Ich stimme gar nicht zu“) bis 5 („Ich stimme voll zu“) auszufüllen. Entsprechend den Vorgaben von Brooke werden für den Gesamtwert die negativ formulierten Items negiert, anschließend werden alle Werte von 1-5 auf 0-4 umgerechnet, summiert und mit dem Faktor 2,5 multipliziert [Br14]. Hierdurch ergibt sich ein möglicher Gesamtwert von 0 (sehr schlechte Gebrauchstauglichkeit) und 100 (sehr gute Gebrauchstauglichkeit).

Die Beanspruchung wurde mit dem NASA-TLX-Fragebogen erhoben [HS88]. Dieser besteht aus der subjektiven Bewertung der sechs Unterpunkte der geistigen, körperlichen und zeitlichen Anforderung sowie Leistung, Anstrengung und Frustration auf einer 20-gliedrigen Skala von „gering“ bis „hoch“. In Paarvergleichen wählt der Teilnehmer aus je zwei der sechs Unterpunkte das aus, was für ihn bei der Arbeitsaufgabe bedeutsamer war. Hierdurch kann der Gesamtwert gewichtet werden. Der Gesamtwert liegt zwischen 0 (keine Beanspruchung) und 100 (extreme Beanspruchung).

2.4 Versuchsaufbau

Für die AR-Anwendung wurde ein Smartphone Galaxy S8 mit einer Displaygröße von 5,8" (14,7 cm) und einer Auflösung von 1440 x 2960 Pixeln verwendet. Die Kamera mit 12 Megapixeln erkennt die am Montageplatz befestigten Marker und blendet lagerichtige Inhalte in das auf dem Display angezeigte Kamerabild. Für die Vergleichsgruppe mit Papieranleitung wurde keine zusätzliche Technik benötigt.

2.5 Versuchsablauf

Zu Beginn wurden die Probanden durch das Ziehen eines von 16 vorbereiteten Losen (acht für jede der beiden Gruppen) entweder der *Papieranleitung* (Papier-Gruppe) oder *AR-Anwendung* (AR-Gruppe) zugeteilt. Anschließend erhielten die Probanden eine Versuchseinführung mit Informationen über die Studie und deren Ablauf sowie eine Einverständniserklärung und einen demografischen Fragebogen (Alter, Geschlecht, Ausbildungsberuf). Die Einführungsunterlagen gaben keine Informationen über die Anleitungsart der jeweils anderen Gruppe. Die Gruppe *AR-Anwendung* wurde zusätzlich nach Vorerfahrungen mit AR-Anwendungen gefragt. In dieser Gruppe endete die Vorbereitung mit Informationen zu Vuforia-Markern und dem praktischen Ausprobieren einer Beispiel-AR-Anwendung. Nach der Klärung offener Fragen begann die Montageaufgabe.

Die Aufgabe bestand aus der Montage von fünf Notgriffen. Abb. 3 zeigt Probanden bei der Montage mit der Papieranleitung (links) und der AR-Anleitung (rechts).



Abb. 3: Probanden während der Montage des Notgriffs mit Papieranleitung (links) und AR-Anleitung (rechts)

Nach jedem Durchgang gab es eine Pausenzeit von etwa zwei Minuten, in denen der Versuchsleiter den Montagearbeitsplatz und die AR-Anwendung in den Ausgangszustand brachte. Während der Montage wurden dem Probanden gemachte Fehler durch den Versuchsleiter mithilfe von zwei entsprechenden Karten „falsches Bauteil verwendet“ (Fehler 1) und „Bauteil falsch montiert“ (Fehler 2) angezeigt.

Nach Abschluss des fünften Durchgangs füllten die Probanden die Fragebögen (TA-EG, SUS, NASA-TLX) aus und hatten die Möglichkeit, Feedback zur verwendeten Anleitung zu geben.

2.6 Stichprobe

Zur Überprüfung der Hypothesen wurde eine Feldstudie in einem Industrieunternehmen für die Herstellung von elektrischen und mit Druckluft betriebenen Türsystemen durchgeführt. An der Studie nahmen 16 männliche Probanden des Unternehmens mit einem Durchschnittsalter von 19,4 Jahren ($SD = 2,2$ Jahre) teil. Ein zweiseitiger t-Test zeigt sowohl beim Alter als auch der Technikaffinität keine signifikanten Unterschiede der Gruppen *Papieranleitung* (Alter: $M = 19,3$ Jahre; $SD = 1,7$ Jahre; TA-EG: $M = 3,84$, $SD = 0,29$) und *AR-Anwendung* (Alter: $M = 19,6$ Jahre; $SD = 2,7$ Jahre; TA-EG: $M = 3,86$, $SD = 0,45$) (Alter: $t(14) = 0,33$, $p = 0,745$; TA-EG: $t(14) = 0,10$, $p = 0,918$). Die Teilnehmer befanden sich alle in der Ausbildung zum Industriemechaniker und besaßen daher alle Vorerfahrung in der manuellen Montage von komplexen Baugruppen.

3 Ergebnisse

Zu Beginn der Auswertung wurden alle Skalen mit dem Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung und mit dem Levene-Test auf Varianzhomogenität geprüft. Bis auf die

Anzahl gemachter Fehler weisen alle Werte auf den nachfolgend vorgestellten Skalen eine Normalverteilung und Varianzhomogenität auf.

Bei Hypothese H1 wird geprüft, ob sich die Durchführzeit der Montage zwischen den Gruppen Papier und AR unterscheidet. Die aus den Videos ermittelten Montagezeiten sind in Abb. 4 zu sehen.

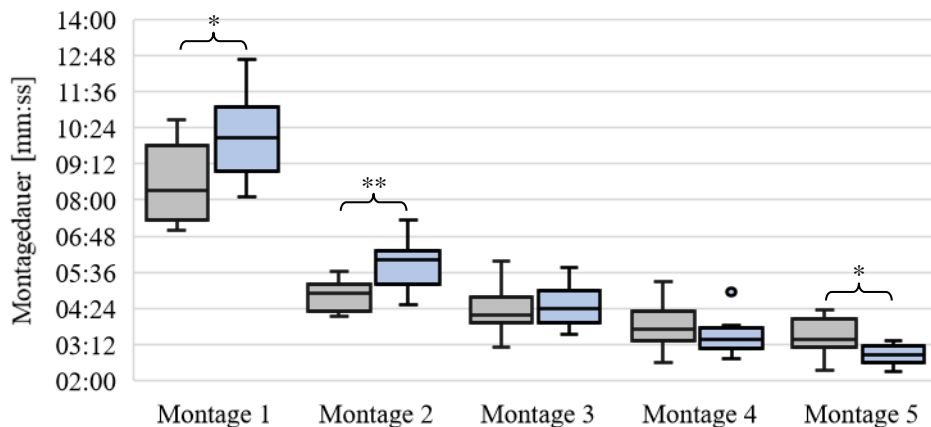


Abb. 4: Boxplots der Montagezeiten der Papier- (grau) und AR-Gruppe (blau) gruppiert nach den Montagedurchgängen

Zur Prüfung von H1 wurde für jeden Montagedurchgang ein zweiseitiger t-Test für unabhängige Stichproben berechnet. In Tab. 1 sind die Mittelwerte, Standardabweichungen und die Ergebnisse der t-Tests angegeben.

Montagedurchgang	Papier-Gruppe	AR-Gruppe	t-Test
Montage 1	M = 8,53 min, SD = 1,31 min	M = 10,10 min, SD = 1,44 min	$t(14) = 2,28,$ $p = 0,039$
Montage 2	M = 4,82 min, SD = 0,52 min	M = 5,89 min, SD = 0,85 min	$t(14) = 3,04,$ $p = 0,009$
Montage 3	M = 4,36 min, SD = 0,84 min	M = 4,46 min, SD = 0,70 min	$t(14) = 0,27,$ $p = 0,789$
Montage 4	M = 3,80 min, SD = 0,81 min	M = 3,50 min, SD = 0,66 min	$t(14) = -0,81,$ $p = 0,431$
Montage 5	M = 3,46 min, SD = 0,66 min	M = 2,86 min, SD = 0,34 min	$t(14) = -2,32,$ $p = 0,036$
Gesamtdauer	M = 24,98 min, SD = 3,43 min	M = 26,81 min, SD = 3,00 min	$t(14) = 1,14,$ $p = 0,274$

Tab. 1: Mittelwerte und Standardabweichungen der Montagezeiten der Papier- und AR-Gruppe über fünf Durchgänge sowie die Ergebnisse der t-Tests

Bei Hypothese H2 wird die Anzahl der Fehler während der Montage bei den beiden Anleitungsarten geprüft. Hierzu wurden die Videoaufzeichnungen ausgewertet und die gemachten Fehler pro Proband und Montagedurchgang betrachtet. Die Papier-Gruppe machte insgesamt im Durchschnitt 3,25 Fehler ($SD = 2,49$ Fehler) und die AR-Gruppe 3,12 Fehler ($SD = 1,13$ Fehler). Abb. 5 zeigt die durchschnittliche Anzahl gemachter Fehler pro Montagedurchgang nach Gruppen. Mann-Whitney-U-Tests zeigten keine signifikanten Unterschiede.

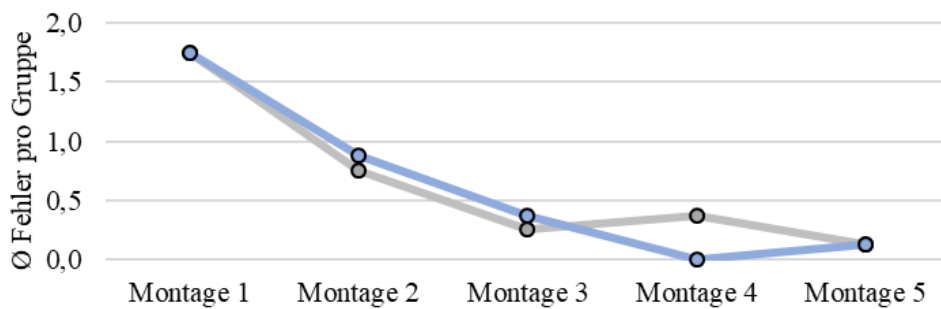


Abb. 5: Durchschnittliche Montagefehler der Papier- (grau) und AR-Gruppe (blau) über den Montagedurchgängen

Bei den Hypothesen H3 und H4 wird geprüft, ob sich die Gebrauchstauglichkeit (H3) und die Beanspruchung (H4) bei der Nutzung der AR-Anwendung von der der Papieranleitung unterscheidet. Die beiden Ergebnisse sind in Abb. 6 angegeben.

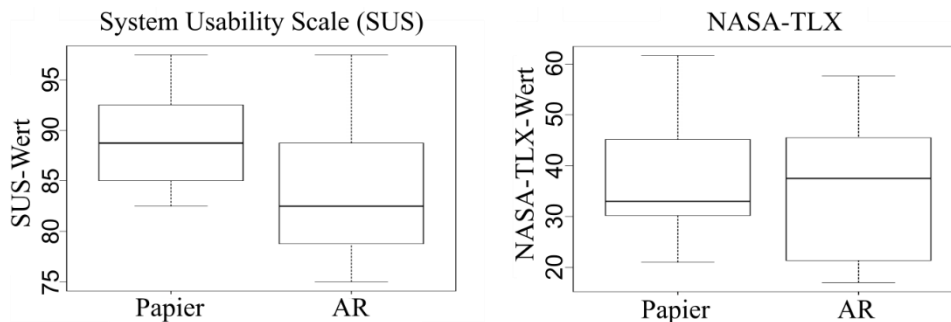


Abb. 6: Gebrauchstauglichkeit (SUS) (links) und der Beanspruchung (NASA-TLX) (rechts)

Zur Prüfung auf Unterschiede wurde jeweils ein zweiseitiger t-Test für unabhängige Stichproben berechnet. Die mit dem SUS durchschnittlich erhobene Gebrauchstauglichkeit ist in der Papier-Gruppe ($M = 89,06$, $SD = 5,16$) höher als in der AR-Gruppe ($M = 84,06$, $SD = 7,31$). Dieser Unterschied ist jedoch nicht signifikant ($t(14) = -1,58$, $p = 0,137$).

Die mit dem NASA-TLX erhobene durchschnittliche Beanspruchung liegt bei der AR-Gruppe ($M = 35,41$, $SD = 14,71$) niedriger als in der Papier-Gruppe ($M = 37,42$,

$SD = 13,59$). Dieser Unterschied ist jedoch ebenfalls nicht signifikant ($t(14) = -0,28$, $p = 0,780$).

4 Diskussion und Fazit

Die Studie zeigt gemischte Ergebnisse der Montagezeiten. In den Durchgängen eins und zwei sind die Probanden der Papier-Gruppe signifikant schneller als die der AR-Gruppe. Dieses Ergebnis weicht von den Befunden von Hořejší ab, wo besonders im ersten Montagedurchgang eine hohe Zeitersparnis mit der AR-Anleitung erreicht werden konnte [Ho15]. Dieser Unterschied könnte daran liegen, dass in der vorliegenden Studie versucht wurde, die Inhalte beider Anleitungen identisch zu halten, wohingegen Hořejší der AR-Gruppe zusätzliche Unterstützung in der Teileauswahl aus den Teilelagern gab. Nachdem keine Unterschiede der Zeiten für die Durchgänge drei und vier vorliegen, ist die AR-Gruppe in Durchgang fünf signifikant schneller als die Papier-Gruppe. Es ist zu vermuten, dass die anfänglich guten Zeiten der Papier-Gruppe trotz des Übens mit einer Beispiel-AR-Anwendung durch die Vorerfahrung der Probanden im Umgang mit der Papieranleitung stammen. Die AR-Gruppe musste sich hingegen doch noch mit der neuen Anleitungsart und mit deren Umgang während der Montage vertraut machen. Der Verlauf der Zeiten und die schnellere Montage in Durchgang fünf deuten dennoch auf das allgemeine Potential von AR-Anleitungen.

Die Ergebnisse lassen bezüglich Fehlern keine eindeutige Aussage zu. Die beiden Gruppen unterscheiden sich weder in einzelnen Durchgängen, noch in der Betrachtung der Gesamtfehleranzahl. Beide Gruppen machen sehr wenige Fehler, wobei die gemachten Fehler häufig auf Unachtsamkeit wie dem Vergessen der Montage kleiner Bauteile oder dem Prüfen von Feinheiten (z. B. korrekte Ausrichtung der Wellen) zurück zu führen sind.

Die Gebrauchstauglichkeit beider Anleitungen liegt mit einem Durchschnittswert von 89,06 (Papier-Gruppe) bzw. 84,06 (AR-Gruppe) knapp über bzw. unter einer Bewertung von *exzellent* (bei 85) [BKM09]. Damit liegen beide in einem sehr guten Bereich, Unterschiede in der Gebrauchstauglichkeit konnten nicht nachgewiesen werden. Die subjektive Beanspruchung der Mitarbeiter durch die Anleitungsart liegt mit durchschnittlich 37,42 (Papier-Gruppe) und 35,41 (AR-Gruppe) ebenfalls auf einem ähnlichen Niveau und weist keine signifikanten Unterschiede auf. Um die Werte einzuordnen, wird auf Ergebnisse anderer Studien zurückgegriffen. In einer Meta-Analyse wurden die NASA-TLX-Werte von 237 wissenschaftlichen Studien mit insgesamt 1173 Datensätzen ausgewertet. Der Median aller Werte liegt bei 49,93, 25 % der Werte liegen unter 36,77 [Gr15]. Damit lassen sich die vorliegenden Werte beide einer eher geringen Beanspruchung zuordnen.

Obwohl in den Versuchsunterlagen bewusst auf Informationen über die Anleitungsart der jeweils anderen Versuchsgruppe verzichtet wurde, lässt sich nicht ausschließen, dass

Probanden darüber Bescheid wussten. Mögliche Verzerrungseffekte durch eine höhere Motivation der AR-Gruppe sind daher möglich.

Die Ergebnisse zeigen teilweise Überschneidungen, aber auch Unterschiede zu ähnlichen Studien mit studentischen Stichproben und künstlichen Montageaufgaben. Hier wird die Bedeutung spezieller Stichproben deutlich, um die Übertragbarkeit von Ergebnissen zu ermöglichen. Die vergleichbare hohe Gebrauchstauglichkeit und die niedrige Beanspruchung machen markerbasierte AR-Anwendungen besonders durch den leichten Einstieg und die geringen Kosten interessant für die manuelle Montage. Zwar konnten in dieser Studie keine positiven Effekte auf die Montagezeiten und die Fehler nachgewiesen werden, allerdings kann weitere Forschung helfen, den Einfluss von AR auf die Montage genauer zu verstehen und gezielt einzusetzen.

Literaturverzeichnis

- [Ap18] Apt, W. et al.: Einsatz von digitalen Assistenzsystemen im Betrieb, 2018.
- [Az97] Azuma, R. T.: A Survey of Augmented Reality. In *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6, S. 355–385, 1997.
- [Be98] Behr, P.: Komplexitätsmanagement von Produkten und Prozessen - Wie lässt sich Komplexität managen? In (VDI-Gesellschaft Entwicklung, Konstruktion, Vertrieb Hrsg.): *Effektive Entwicklung und Auftragsabwicklung variantenreicher Produkte*. VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 39–51, 1998.
- [BKM09] Bangor, A.; Kortum, P.; Miller, J.: Determining What Individual SUS Scores Mean: Adding an Adjective Rating Scale. In *Journal of Usability Studies*, 4, S. 114–123, 2009.
- [Br14] Brooke, J.: SUS: a "quick and dirty" usability scale. In (Jordan, P. W. et al. Hrsg.): *Usability Evaluation in Industry*. Chapman and Hall/CRC, Boca Raton, S. 189–194, 2014.
- [Cu16] Curran, C.: Breakthroughs in optics that are reshaping augmented reality. <http://usblogs.pwc.com/emerging-technology/breakthroughs-in-optics-that-are-reshaping-augmented-reality/>, 16.10.2019.
- [De16] Demary, V. et al.: *Digitalisierung und Mittelstand. Eine Metastudie*. Institut der deutschen Wirtschaft Medien, Köln, 2016.
- [Dö13] Dörner, R. et al.: *Virtual und Augmented Reality (VR / AR)*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [Fr98] Franke, H.-J.: Produkt-Variantenvielfalt - Ursachen und Methoden zu ihrer Bewältigung. In (VDI-Gesellschaft Entwicklung, Konstruktion, Vertrieb Hrsg.): *Effektive Entwicklung und Auftragsabwicklung variantenreicher Produkte*. VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 1–13, 1998.

- [Gr15] Grier, R. A.: How High is High? A Meta-Analysis of NASA-TLX Global Workload Scores. In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 59; S. 1727–1731, 2015.
- [Ho15] Hořejší, P.: Augmented Reality System for Virtual Training of Parts Assembly. In Procedia Engineering, 100; S. 699–706, 2015.
- [Hö17] Höhne, B. P. et al.: Agiles Lernen am Arbeitsplatz – Eine neue Lernkultur in Zeiten der Digitalisierung. In Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 71; S. 110–119, 2017.
- [HS88] Hart, S. G.; Staveland, L. E.: Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research: Human Mental Workload, S. 139–183, 1988.
- [HW13] Hou, L.; Wang, X.: A study on the benefits of augmented reality in retaining working memory in assembly tasks. A focus on differences in gender. In Automation in Construction, 32, S. 38–45, 2013.
- [In19] D21 DIGITAL INDEX 2018/2019 Jährliches Lagebild zur Digitalen Gesellschaft. Hochschule der Medien, Stuttgart, 2019.
- [Ka09] Karrer, K. et al.: Technikaffinität erfassen – der Fragebogen TA-EG. In Der Mensch im Mittelpunkt technischer Systeme; S. 196–201, 2009.
- [LQB16] Loch, F.; Quint, F.; Brishtel, I.: Comparing Video and Augmented Reality Assistance in Manual Assembly. In (IEEE Hrsg.): 12th International Conference on Intelligent Environments. IEEE, London; S. 147–150, 2016.
- [Rö15] Röhrborn, S.: Deutsche Sprache, schwere Sprache? <https://www.vanguard.de/blog/deutsche-sprache-schwere-sprache>, 14.11.2019.
- [Sc15] Schenk, M.: Produktion und Logistik mit Zukunft. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [Sc04] Schmidt, L. et al.: Augmented Reality als neue Form der Mensch-Technik-Interaktion. In (Luczak, H. et al. Hrsg.): Benutzerzentrierte Gestaltung von Augmented-Reality-Systemen. Düsseldorf: VDI-Verlag, Reihe 22, Mensch-Maschine-Systeme, S. 1–14, 2004.
- [Tö10] Tönnis, M.: Augmented Reality. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [WKG04] Wiendahl, H.-P.; Gerst, D.; Keunecke, L.: Variantenbeherrschung in der Montage. Konzept und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004.