

Abschlussbericht

Teilvorhabenbeschreibung

Arbeitsmedizinische Begleituntersuchung zur Erfassung von Belastungen und Beanspruchungen bei Montageassistenz

im Verbundvorhaben

3D-basierte Assistenztechnologien für variantenreiche Montageprozesse - Menschzentrierter Arbeitsplatz der Zukunft („3D-Montageassistent“)



Projektlaufzeit:

01.04.2017 – 31.03.2020

Projektleiterin:

Prof. Dr. med. habil. Irina Böckelmann

Projektmitarbeiterinnen:

Annemarie Minow, Stefanie Schmidt

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Medizinische Fakultät

Bereich Arbeitsmedizin

Juni 2020

Inhalt

1 Kurzdarstellung	3
1.1 Aufgabenstellung	3
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	4
1.4 Wissenschaftlich-technischer Stand, an den angeknüpft wurde	4
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	6
2 Eingehende Darstellung	7
2.1 Darstellung der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	7
2.1.1 AP 5.1 Gesamtkonzeption 3D-basierte Montageassistenten	7
2.1.2 AP 5.5 Entwicklung Module für Montageassistenz und -prüfung	13
2.1.3 AP 5.6 Analyse Arbeitsperson, Optimierung Assistenzfunktionalität.....	14
2.1.4 AP 5.8 Arbeitsmedizinische Evaluation des Gesamtsystems	16
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	22
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	22
2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertung der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	22
2.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	23
2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen.....	25
2.7 Literatur	29

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Projektpartner im Verbund	6
Tabelle 2: Methodenübersicht	15
Tabelle 3: Methodik Vorstudie	17
Tabelle 4: Methodik User-Test (LIVINGSOLIDS).....	18
Tabelle 5: Methodik User-Test (Fraunhofer IFF).....	20
Tabelle 6: Wissenschaftliche Verwertungsziele	23

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozess der menschenzentrierten Gestaltung (eigene Darstellung nach DIN EN ISO 9241 - 210).....	8
Abbildung 2: Probandin bei der Bauteilmontage mittels Papierliste in der Vorstudie (Foto: A. Minow)	9
Abbildung 3: Probandin bei der Bauteilmontage mittels digitaler Liste in der Vorstudie (Foto: A. Minow)	9
Abbildung 4: HTC-Vive mit einem von zwei Trackingsensoren (Foto: LIVINGSOLIDS)	10
Abbildung 5: Virtuelle Hand mit Bauteil.....	11
Abbildung 6: Virtueller Arbeitsplatz	11
Abbildung 7: Versuchsaufbau des User-Tests am Fraunhofer IFF (Foto: A. Minow).....	13
Abbildung 8: Proband bei der Bauteilmontage am Modellarbeitsplatz des Fraunhofer IFF (Foto: A. Minow)	13
Abbildung 9: Beispiel für eine geometrische Figur (Vorstudie).....	17
Abbildung 10: AR-Konturen und Display mit Animationen	19
Abbildung 11: Pick-to-Light-System.....	19

1 Kurzdarstellung

Im Folgenden werden die Aufgabenstellung, die Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde, Planung und Ablauf des Vorhabens, der wissenschaftliche und technische Stand sowie die Zusammenarbeit mit anderen Stellen dargestellt¹.

1.1 Aufgabenstellung

In Zeiten des technologischen Fortschritts und der damit einhergehenden Digitalisierung bieten neuartige 3D-basierte Assistenzsysteme viele Möglichkeiten für die industrielle Montage. Einzelne Arbeitsprozesse können so effizienter gestaltet und Beschäftigte bei manuellen Tätigkeiten unterstützt werden. Aus Sicht der Arbeitsmedizin gilt es dabei Mensch und Maschine hinsichtlich gesundheitlicher, arbeitsorganisatorischer und ergonomischer Faktoren aufeinander abzustimmen. Hierzu wurden im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundvorhabens „3D-Montageassistent“ (Förderkennzeichen: 03ZZ0441E) durch den Bereich Arbeitsmedizin der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg aufeinander aufbauende Begleituntersuchungen (experimentelle Labor- und Modellarbeitsplatz-Untersuchungen) durchgeführt.

Ziel der Begleituntersuchungen bei der Entwicklung der digitalen Assistenzsysteme war die Erarbeitung von Hinweisen zur ergonomie- und belastungsoptimierten Gestaltung zukünftiger Montagearbeitsplätze unter Berücksichtigung der Erkenntnisse zur Nutzerakzeptanz von 3D-basierten Assistenztechnologien.

Die daraus resultierenden Aufgaben bestanden in der Analyse der Anforderungen an die kognitive Leistungsfähigkeit und Belastbarkeit der Arbeitsperson bei der Anwendung der Assistenzsysteme in industriellen Montageprozessen, in der Beurteilung entstehender Arbeitsbelastungen und ihren Beanspruchungsfolgen sowie in der Erfassung der Akzeptanz der unterstützenden Assistenz bei den Nutzern. Die Belastungs-Beanspruchungsanalyse erfolgte mit und ohne 3D-basierte Assistenztechnologien sowie zwischen verschiedenen Assistenzfunktionalitäten. Die Ergebnisse der Analysen wurden im Anschluss vergleichend ausgewertet.

Durch die Berücksichtigung arbeitsmedizinischer und arbeitsphysiologischer Aspekte - vor allem konsequenter Beachtung physischer und psychischer Beanspruchung - soll bei manuellen Montageprozessen mit digitaler Assistenz der Beanspruchungsgrad der Arbeitsperson minimiert werden. Da sichere und gesunde Arbeitsbedingungen für sozialen Fortschritt der Gesellschaft und eine wettbewerbsfähige Wirtschaft stehen, sollen Augmented Reality (AR)-basierte Techniken optimiert werden, um u. a. eine nachhaltige Akzeptanz der 3D-Montageassistenten bei den Nutzern sicherzustellen.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Zwei grundlegende Voraussetzungen für die Durchführung des Teilvorhabens waren die Identifikation der Mitarbeitenden des Bereiches Arbeitsmedizin mit dem Ziel des Projektes „3D-Montageassistent“ und die Motivation der Mitarbeitenden zur kooperativen Zusammenarbeit mit den Projektpartnern. Nach den Vorstellungen des Bereichs Arbeitsmedizin sind das gemeinsame Planen von Teilzielen und entsprechenden Aufgaben sowie transparente Abstimmungen und ein regelmäßiger Austausch zwischen den Entwicklern der Systeme, den zukünftigen Nutzern und den Arbeitsmedizinern dabei bedeutend für die Zusammenarbeit.

¹ Zur besseren Lesbarkeit wird in diesem Bericht überwiegend die männliche Form verwendet. Die weibliche Form ist selbstverständlich immer mit eingeschlossen.

Auch die bisherigen Erfahrungen und (Methoden-) Kompetenzen des Bereiches Arbeitsmedizin der Otto-von-Guericke-Universität, resultierend aus einer Vielzahl an durchgeführten Projekten und breit angelegten Forschungsaktivitäten, kann für die Umsetzung des Projektvorhabens als sehr förderlich betrachtet werden. Die Forschungsschwerpunkte des Bereiches Arbeitsmedizin liegen u. a. in der Ermittlung arbeitsphysiologischer Beanspruchungen bei psychischen und physischen Belastungen sowie in der Untersuchung der Herzratenvariabilität (HRV) und visuellen Leistungen. Außerdem setzt sich das Team mit aktuellen Themen der Betrieblichen Prävention und Gesundheitsförderung auseinander.

Ein weiteres in den Forschungsaktivitäten des Bereiches Arbeitsmedizin sehr präsent Thema betrifft das gesunde Arbeiten mit digitalen Assistenzsystemen und neuen Informationstechnologien in der Industrie 4.0. Bereits in den Jahren 2008 bis 2011 wurden für das Projekt „AVILUS“ (FKZ: 01IM08001Z) arbeitsmedizinische Untersuchungen vor dem Hintergrund durchgeführt, die Ergonomie und Akzeptanz sowie wahrnehmungspsychologische und beanspruchungsphysiologische Faktoren von Augmented-Reality-basierten Technologien zu ergründen. Da der Forschungscharakter dem des Projektes „3D-Montageassistent“ ähnelt, konnten die gewonnenen Erkenntnisse aus dem „AVILUS“-Projekt unterstützend in Planung und Durchführung des hier beschriebenen Teilvorhabens eingebunden werden.

Zudem kann für die Realisierung entsprechender arbeitsmedizinischer Begleituntersuchungen auf ein gut ausgestattetes psychophysiologisches Labor zurückgegriffen werden. Die darin enthaltene moderne Technik erlaubt es dem Team, eine anwendungsorientierte und ganzheitliche Forschung zu betreiben. Die Umsetzung der umfangreichen Forschungsarbeiten für das Projekt konnten nur durch die Schaffung von Personalstellen und die Förderung des BMBF ermöglicht werden.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das im Rahmen des Verbundprojektes „3D-Montageassistent“ durchgeführte Teilvorhaben zur Arbeitsmedizinischen Begleituntersuchung wurde am 01.04.2017 begonnen und am 31.03.2020 planmäßig abgeschlossen. Zu Beginn wurden für die gesamte Laufzeit und entlang der Projektziele entsprechende Arbeitspakete (AP) und dazugehörige Meilensteine für das Teilvorhaben formuliert und in Abstimmung mit den Verbundpartnern festgelegt. Die Dokumentation zur Bearbeitung und Erfüllung der Arbeitspakete erfolgte in den halbjährig einzureichenden Zwischenberichten. Zudem fanden in regelmäßigen Abständen Projekttreffen aller Partner statt, die dem Austausch aktueller Projektthemen und -stände dienen.

Im Verlauf des Teilvorhabens ist es den Projektmitarbeitern des Bereiches Arbeitsmedizin gelungen, verschiedene Untersuchungen in Form einer Vorstudie sowie zwei User-Tests zu realisieren. Die Vorstudie diente zunächst der Testung von Methoden, die in den anschließenden User-Tests zum Einsatz kommen sollten, um entsprechend des Ziels des Teilvorhabens geeignete Untersuchungen durchzuführen. Aufbau, Ablauf und Ergebnisse der Teilstudien werden in Kapitel 2 näher beschrieben.

1.4 Wissenschaftlich-technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die erforderliche Flexibilität bei industriellen Montageprozessen ist oft nur durch eine teilautomatisierte oder gar manuelle Montage wirtschaftlich umsetzbar. Die Komplexität und Variantenvielfalt stellen dabei jedoch sehr hohe Anforderungen an die kognitive Leistungsfähigkeit und Belastbarkeit der arbeitenden Person. Eine erforderliche hohe Konzentration und Aufmerksamkeit sowie Verantwortung für ein fehlerfreies Montageergebnis führen zu hohen Ar-

beitsbelastungen bei den Mitarbeitern. Aufgrund der technisch immer komplexeren Produktanforderungen im Bereich der industriellen Anwendung halten neue Arbeitstechniken Einzug in die sich wandelnde Arbeitswelt. Die technische Unterstützung manueller Fertigungsprozesse, z. B. durch 3D-basierte Montageassistenten, kann dabei dem Nutzer beanspruchungsoptimale Lösungen bieten. Für die Erkennung der bereits montierten Bauteile, die Überprüfung der korrekten Positionierung, die Vollständigkeitsprüfung z. B. im Hinblick auf Befestigungselemente, aber auch für die Überprüfung des Werkzeugeinsatzes kann ein multiskaliges Sensorsystem eingesetzt werden. In der letzten Zeit werden immer mehr Lösungen auf Grundlage unterschiedlicher Techniken entwickelt. Zu diesen neuen Arbeitstechniken gehören u. a. die der „Virtualen Realität“ (Virtual Reality, VR) und der „Erweiterten Realität“ (Augmented Reality, AR). Diese Techniken sind eine Mensch-Maschine-Schnittstelle, die durch die Merkmale „Interaktion“, „Immersion“ und „Simulation“ gekennzeichnet ist und die es ermöglicht, dass sich ein Anwender frei in diesen Realitäten bewegen kann. Das „Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum“ zwischen der virtuellen und der „echten“ Realität beschreibt den Bereich der „Mixed Reality“-Technologien (Milgram et al. 1994).

Die Augmented-Reality-Technologien ermöglichen die Anreicherung der menschlichen Sinneswahrnehmung mit situationsgerechten Informationen (Tümler 2010). Einem Nutzer bzw. Anwender kann die erweiterte Realität auf sehr unterschiedlichen Wegen dargeboten werden. Als mobile AR-Systeme werden hier Head Mounted Displays (HMDs)/AR-Brille und andere Visualisierungsgeräte (z. B. Handheld-PCs, Smartphones) oder AR-Projektionen eingesetzt, die die Bearbeitung primärer Arbeitsaufgaben unterstützen. Durch den Einsatz der mobilen AR-Technologie kann die menschliche Flexibilität mit den schnellen Visualisierungs- und Verarbeitungsprozessen von Computersystemen kombiniert werden. Besondere Herausforderungen ergeben sich bei der ergonomischen Gestaltung von Arbeitshilfen zur Unterstützung einer räumlich korrekten Bauteilmontage.

Die Einsatzpotenziale der AR-Technologien in den Bereichen Entwicklung, Produktion und Service wurden in verschiedenen Forschungsprojekten wie ARVIKA, ARTESAS, AVILUS und anderen untersucht (u. a. Schreiber & Zimmermann 2011 sowie Encarnação und Felger 1997).

Die Veröffentlichungen der letzten Jahre macht deutlich, dass die schwerpunktmäßige Orientierung im Bereich AR bisher nur wenig auf dem Anwender des AR-Systems lag. Für die erfolgreiche Weiterentwicklung der AR-Technologie sowie für die Einschätzung des Potenzials der Technologie im täglichen produktiven Einsatz in industriellen Bereichen, wie z. B. in Montageprozessen, sind zwingend Untersuchungen zu nutzerbezogenen Aspekten (u. a. ergonomische Gestaltung von Arbeitshilfen zur Unterstützung einer räumlich korrekten Bauteilmontage) notwendig. Daraus wird deutlich, dass die Beantwortung von Fragestellungen hinsichtlich nutzerbezogener Faktoren beim Langzeiteinsatz mobiler AR-Technologien ein weiterer wichtiger Meilenstein auf diesem Forschungsgebiet ist.

Die Literaturdaten liefern erste Erkenntnisse darüber, wie mobile AR-Assistenzsysteme z. B. bei Kommissionierungsaufgaben nutzerorientiert gestaltet sein müssen, damit sie produktiv und beanspruchungsoptimiert im industriellen Langzeiteinsatz verwendet werden können.

Viele Fragen auf diesem Forschungsgebiet sind jedoch noch offen: Berücksichtigung perzeptiver und kognitiver Prozesse und Lerneffekte des Anwenders in Bezug auf einen länger andauernden Einsatz, Analyse mentaler Beanspruchung bei potenzieller Entstehung von Unterforderung, Motivationsmangel oder Konzentrationsabbau, Auswirkungen des Einsatzes der Assistenzsysteme auf das visuelle System des Nutzers oder auch die Akzeptanz und die wahrgenommene Nützlichkeit des visuellen Montageassistentensystems.

Für eine Langzeitnutzung der 3D-basierten Assistenztechnologien für Montageprozesse müssen die technischen Hilfsmittel ein beanspruchungsarmes Arbeiten und eine gute Arbeitsleistung ermöglichen. Hierbei spielen folgende Faktoren eine Rolle:

- die Verträglichkeit der Assistenzsysteme in Bezug auf physische Belastungsgrößen und -faktoren,
- die Verträglichkeit der Assistenzsysteme in Bezug auf psychische Belastungsfaktoren,
- Bedingungen der effizienten Verarbeitung der augmentierten Information,
- die Minimierung der möglichen Einschränkung bzw. Beeinträchtigung bei der Montageprüfung und
- Maßnahmen im Sinne der Sicherheit und Gesundheit des Beschäftigten.

Bei der Beurteilung der individuellen Beanspruchung von entstehenden Belastungen bzw. prozessbegleitenden Messungen zur Objektivierung der Beanspruchung im Verlauf eines Arbeitstages spielen die HRV-Parameter SDNN, RMSSD und LF/HF-Ratio eine wichtige Rolle. Außerdem ist die HRV als Indikator für psychophysische Zustände des Organismus, für Ermüdungs- und Erholungsverhalten sowie als Indikator für Einschränkungen einer Adaptations- und Anpassungsfähigkeit für biopsychosoziale Fragestellungen zu verwenden. Anhand dieser Parameter werden individuelle Handlungsempfehlungen z. B. zur Arbeitsplatz- und Arbeitsprozessgestaltung abgeleitet. Diese objektiven Beanspruchungsparameter werden im Zusammenhang mit den subjektiv angegebenen Erlebens- und Befindensdaten (z. B. EZ-Skala nach Nitsch, Beschwerdefragebogen) betrachtet.

Nur wenn der Anwender die AR-Systeme akzeptiert und als hilfreich erachtet sowie darin keine Mehrbelastung sieht, wird er das Potenzial der neuen Technologien optimal umsetzen können. Dafür spielen auch ergonomische Gesichtspunkte der Hard- und Software eine Rolle, was eine intensive interdisziplinäre Zusammenarbeit von Arbeitsmedizinern und Ingenieuren erforderlich macht.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

In Tabelle 1 sind die Projektpartner des Vorhabens 3D-Montageassistent mit ihren jeweiligen Ansprechpartnern und Aufgaben im Projekt benannt.

Tabelle 1: Projektpartner im Verbund

Firma	Anschrift	Bundesland	Ansprechpartner	Aufgabe im Projekt
Fraunhofer Institut für angewandte Optik und Feinmechanik (IOF)	Beutenberg Campus Albert-Einstein-Str. 7 07745 Jena	Thüringen	Daniel Höhne	Sensorik-Entwicklung für einen 3D-Montageassistenten
Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und Automatisierung (IFF)	Sandtorstr. 22 39106 Magdeburg	Sachsen-Anhalt	Dipl.-Ing. Ralf Warnemünde	Technologiebausteine für modellgestützte Montageprüfung und visuelle Montageassistenten

LIVINGSOLIDS GmbH	Schilfbreite 3 39120 Magdeburg	Sachsen-Anhalt	Stefan Stüring	Wissenspräsentation für variantenreiche Montageprozesse, Visualisierungsmethoden und Interaktionskonzepte für Assistenzfunktionen
Piezosystem jena GmbH	Stockholmer Str. 12 07747 Jena	Thüringen	Karsten Kühnert	Entwicklung einer Testumgebung zur kleinräumigen, individualisierten manuellen Fertigung für einen 3D-Montageassistenten
Parker Hannifin Manufacturing Germany GmbH & Co. KG	Gutenbergstr. 38 41564 Kaarst	Nordrhein-Westfalen	Wolfgang Bausch	Anwendung 3D-basierter Assistenztechnologien bei manuellen, variantenreichen Montageprozessen
Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung ZBS e.V.	Werner-von-Siemens-Str. 10 98693 Ilmenau	Thüringen	PD Dr.-Ing. habil. Karl-Heinz Franke	Wissensbasierte Softwaretechnologien zur Überwachung komplexer manueller Montageprozesse

2 Eingehende Darstellung

Im zweiten Teil des Schlussberichtes erfolgt zunächst die ausführliche Darstellung der wissenschaftlichen Arbeit des Bereichs Arbeitsmedizin im Verbundprojekt. Zudem werden die erzielten Ergebnisse und deren Verwertung sowie bekanntgewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens aufgeführt. Am Ende wird eine Übersicht über erfolgte und geplante Veröffentlichungen gegeben.

2.1 Darstellung der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die Zuwendungen wurden entsprechend der Zielsetzung des Forschungsvorhabens eingesetzt. In den nächsten Abschnitten werden am Beispiel einzelner Arbeitspakete (AP) die Verwendung der Zuwendungen dargelegt.

2.1.1 AP 5.1 Gesamtkonzeption 3D-basierte Montageassistenten

Hinweis: Im nun folgenden Abschnitt werden nur die untergeordneten Arbeitsschritte zum AP 5.1 dargestellt, die die Erarbeitung durch das Institut für Arbeitsmedizin (IAM) erforderten.

AP 5.1.1 Spezifikation der Anforderungen an MA in der manuellen Montage

Zu Beginn des Projektes wurden die Anforderungen, denen sich Mitarbeiter in der manuellen Montage gegenüberstehen, durch Literaturrecherchen und Diskussionen mit den Industriepartnern Parker und piezosystem Jena spezifiziert. Der Fokus lag dabei auf nutzerbezogenen Aspekten.

AP 5.1.3 Konzeption der Sensorarchitektur und -konfiguration für 3D-Erfassung Montageszenario (Arbeitsperson, Montagebaugruppe)

Bei der Konzeption der Sensorarchitektur und -konfiguration für die 3D-Erfassung des Montageszenarios standen nutzerbezogene Aspekte (Belastung, Beanspruchung, Usability) im Fokus. Eine menschenzentrierte Gestaltung nach DIN EN ISO 9241 - 210 (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) wurde beachtet.

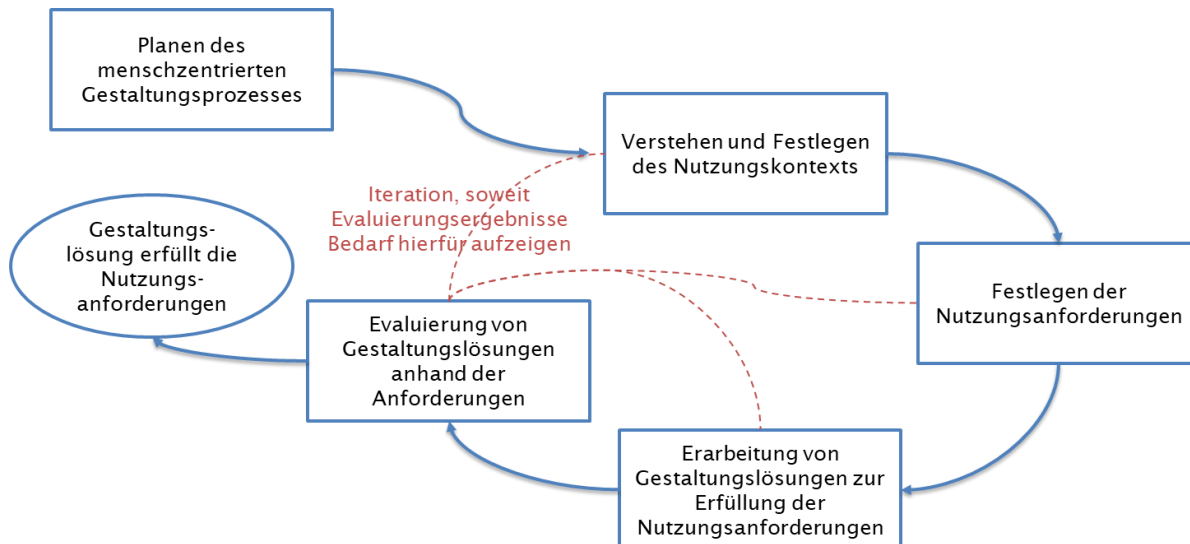


Abbildung 1: Prozess der menschenzentrierten Gestaltung (eigene Darstellung nach DIN EN ISO 9241 - 210)

Der Normteil beinhaltet, dass beim menschenzentrierten Planen der Nutzungskontext und die Nutzungsanforderungen festgelegt und unter Partizipation der Anwender schrittweise Gestaltungslösungen zur Erfüllung der Nutzungsanforderungen erarbeitet und evaluiert werden. Dieses Vorgehen zielt darauf ab, eine möglichst hohe Akzeptanz für das zu entwickelnde System zu gewährleisten (Minow & Böckelmann 2019).

Typische Belastungen und Beanspruchungen aus dem Montageumfeld (z. B. eine mögliche visuelle Ermüdung) wurden unter Berücksichtigung der ergonomischen Anforderungen der DIN EN ISO 9241 in der Untersuchungsplanung mit bedacht.

AP 5.1.4 Konzeption Datenauswertung und Interpretation (Zustand, Intention Arbeitsperson, Montagezustand, Qualität Montageergebnis)

Bei den Datenerhebungen und -auswertungen wurden soziodemografische Daten, Angaben zu Erfahrungen mit digitalen Assistenzsystemen und gesundheitsbezogene Daten (z. B. Brille, best. Erkrankungen, weitere Einflussfaktoren wie z. B. Medikamenteneinnahme, Rauchen, Alkohol,) mithilfe eines Probandenfragebogens einbezogen.

Die Auswertung der HRV-Daten erfolgte mithilfe der etablierten Software Kubios HRV Version 2.0 (Biosignal Analysis and Medical Imaging Group, Universität Kuopio, Finnland). Alle Daten wurden mit IBM SPSS Statistics 26 erfasst und ausgewertet. Komplexere statistische Analysen erfolgten unter der Beratung durch das Institut für Biometrie und Medizinische Informatik.

AP 5.1.6 Spezifikation arbeitsmedizinischer/-wiss. Anforderungen der Mensch-Maschine-Interaktion (MMI)

Ausgehend von den arbeitsmedizinischen und wissenschaftlichen Anforderungen und somit unter Berücksichtigung einer humanzentrierten Sichtweise werden folgende Anforderungen an die Mensch-Maschine-Interaktion gestellt:

- Die MMI sollte nachhaltig, gesundheitsgerecht sowie nutzerfreundlich gestaltet werden
- Im Zentrum der Forschung stehen Gesundheits- sowie Belastungs- und Beanspruchungsanalysen der zukünftigen Nutzer
- Durch Beteiligung des Nutzers Akzeptanz für digitale Assistenzsysteme schaffen
- Zukünftige Nutzer sind in den Mittelpunkt des Forschungs- und Entwicklungsprozesses zu stellen

AP 5.1.7 Festlegung von Laboraufbauten zur Erprobung der Module

Im Projektzeitraum wurden drei Laboraufbauten zur Ermittlung der Beanspruchung bei digitalen Assistenztechnologien durchgeführt:

Vorstudie (02/ 2018 – 06/ 2018)

Eine Vorstudie wurde im psychophysiologischen Labor des Bereichs Arbeitsmedizin realisiert. Hier montierten die Probanden geometrische Figuren mithilfe einer Papierliste (vgl. Abbildung 2) und einer wortgleichen digitalen Liste auf einem Laptop (vgl. Abbildung 3).



Abbildung 2: Probandin bei der Bauteilmontage mittels Papierliste in der Vorstudie (Foto: A. Minow)

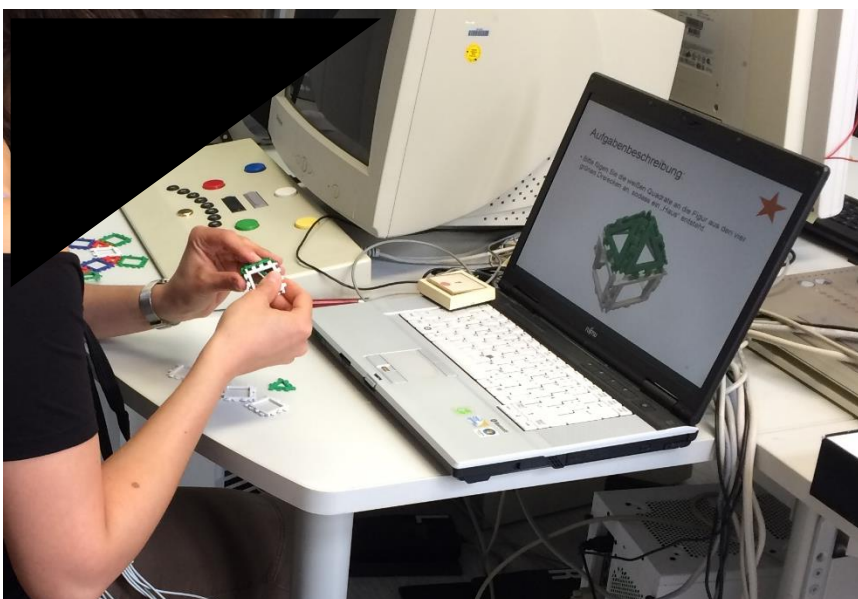


Abbildung 3: Probandin bei der Bauteilmontage mittels digitaler Liste in der Vorstudie (Foto: A. Minow)

1. User-Test LIVINGSOLIDS (03/2019 – 06/2019)

Ein User-Test mittels VR wurde zusammen mit und bei dem Verbundpartner LIVINGSOLIDS durchgeführt. Der Versuchsaufbau wurde durch LIVINGSOLIDS unter der Beratung des Bereichs Arbeitsmedizin vorgenommen. Dieser besteht hardwareseitig aus einer HTC-Vive-VR-Brille (HMD) mit zwei Basisstationen zur Erfassung von Position und Orientierung der Brille im Raum (vgl. Abbildung 4).



Abbildung 4: HTC-Vive mit einem von zwei Trackingsensoren (Foto: LIVINGSOLIDS)

Zur Erfassung der für die Montageaufgaben relevanten Nutzereingaben (Greifen von Bauteilen, Bewegen von Bauteilen und Loslassen der Bauteile bei Erreichen der Verbauposition) wurde die VR-Brille mit einem Leap-Motion-Sensor ausgestattet, der die Hände und die Handstellung erkennt und somit eine intuitive Interaktion mit virtuellen Objekten ermöglicht (vgl. Abbildung 5).

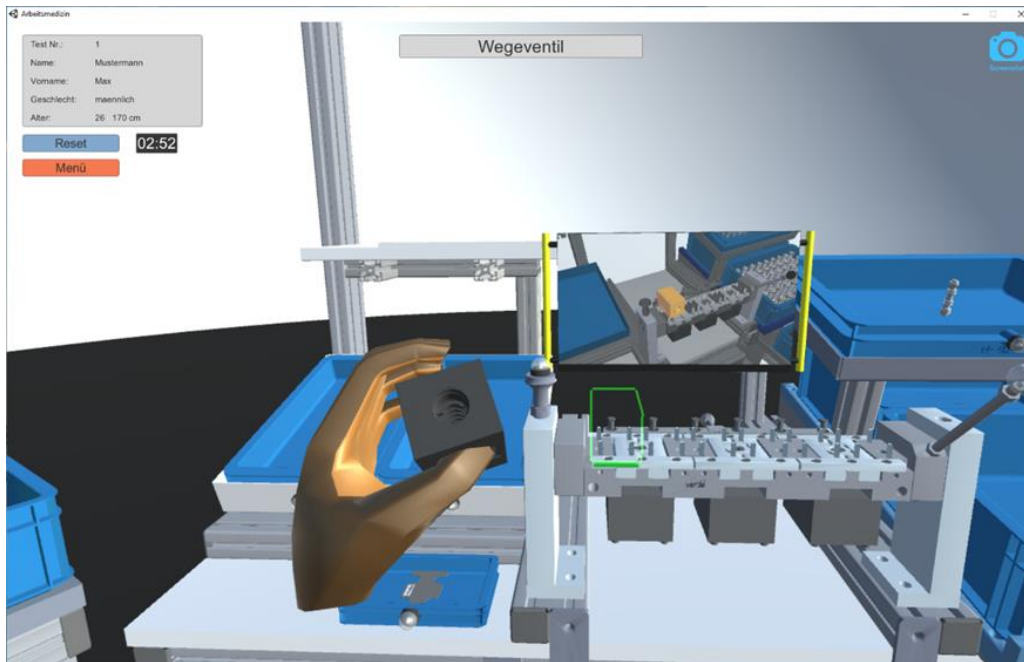


Abbildung 5: Virtuelle Hand mit Bauteil

Für die Simulation der Arbeitsumgebung wurde ein Raum gestaltet und darin ein realer Arbeitsplatz von ParkerHannifin mit Hilfe von 3D-Modellen der Einzelobjekte nachgebildet (vgl. Abbildung 6). Alle Behälter, notwendige Vorrichtungen und Bauteile wurden als 3D-Objekte in das Szenario integriert und soweit erforderlich bedienbar bzw. manipulierbar gemacht.

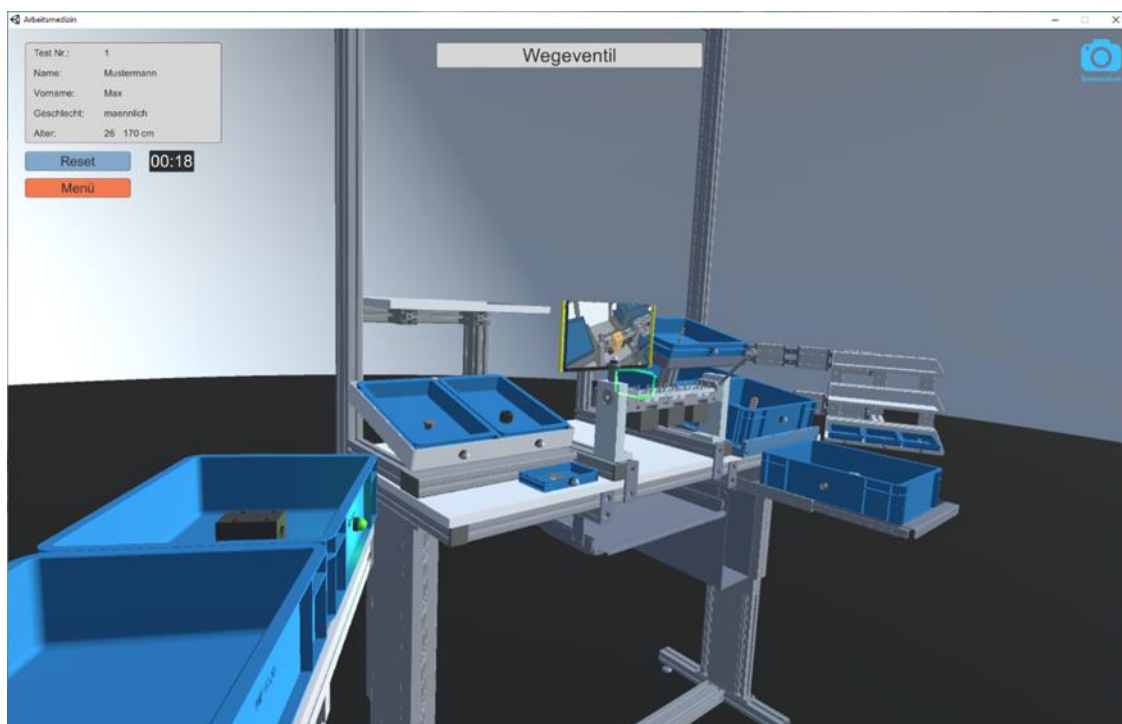


Abbildung 6: Virtueller Arbeitsplatz

Für die Versuche wurde die interaktive VR-Anwendung mit Funktionen ausgestattet, die die Versuchsdurchführung unterstützen. Dazu gehört die Möglichkeit der einfachen Konfiguration des Versuchsablaufs sowie die Erfassung wesentlicher Messwerte zur Auswertung der User Performance. Letzteres wurde durch ein detailliertes Event-Logging umgesetzt, welches die

Möglichkeit bietet, nach Abschluss eines Versuchs diesen anhand der erzeugten Protokolldaten detailliert auszuwerten.

2. User-Test Fraunhofer IFF (12/2019 – 01/2020)

Ein weiterer User-Test wurde zusammen mit und bei dem Verbundpartner Fraunhofer IFF durchgeführt. In diesem User-Test bestand die Aufgabe für die Probanden darin, am Modellarbeitsplatz einzelne Teile zu einem Wegeventil zu verbauen. Der dort eingerichtete und für den Versuch benötigte Modellarbeitsplatz soll nun näher beschrieben werden. Dieser wurde so konstruiert, dass er annähernd einem realen Arbeitsplatz der Firma Parker Hannifin entspricht. Eine Ansicht des Modellarbeitsplatzes und der Bauteilmontage eines Probanden sind den Abbildungen 7 und 8 zu entnehmen.

Wie in den Abbildungen erkennbar, besteht der Modellarbeitsplatz aus verschiedenen Elementen, darunter die im Vordergrund fest installierte Vorrichtung zur Montage des Werkstücks, die dem Einspannen und der exakten Positionierung von Bauteilen dient. Im Hintergrund sind Kästen angebracht, in denen sich die einzelnen Bauteile befinden. Damit während der Montage die richtigen Bauteile gegriffen werden, sind die Kästen zum Abgleich mit der jeweiligen Artikelnummer des Bauteils beschriftet.

Digital unterstützt werden die Montagearbeiten durch zwei Computerbildschirme, die durch ihre integrierten Anzeigen und Funktionalitäten den Zusammenbau des Werkstücks optimieren sollen. Diese Anzeigen und Funktionalitäten bildeten das zu untersuchende Kernstück in dem durchgeführten User-Test. Vor allem der linke Bildschirm enthält wesentliche Anweisungen zur Montage des Werkstücks. So werden in einer tabellarischen Anzeige alle für die Montage notwendigen Arbeitsschritte mit Hinweisen (Artikelnummern) zu den entsprechenden Einzelteilen aufgeführt. Weiterhin erfolgt im oberen Bereich des Bildschirms nochmals das Einblenden des aktuellen Arbeitsschrittes mit Verweis auf das benötigte Werkzeug. Zudem wird mithilfe von am Modellarbeitsplatz angebrachten Kameras das Bild der Montagevorrichtung mit dem Werkstück auf den Bildschirm übertragen. Darauf werden dann AR-Konturen projiziert, die den aktuellen Arbeitsschritt zeigen. Anhand dessen ist es den Arbeitern möglich, zu sehen, wo einzelne Teile verbaut werden müssen und gleichzeitig kann überprüft werden, ob die Montage korrekt ausgeführt wurde.

Der rechte Bildschirm hingegen beinhaltet die Darstellung des Werkstücks als CAD-Modell, mit dem interaktiv gearbeitet werden kann. Für dieses CAD-Modell sind im Programm verschiedene Funktionen hinterlegt, durch die es beispielsweise möglich ist, das Modell zu drehen und zu vergrößern. Auch ein Wechsel der Darstellung zwischen Verbauort des aktuellen Bauteils und dem zusammengebauten Werkstück ist möglich. Zusätzlich werden auf dem rechten Bildschirm nochmals alle für den einzelnen Arbeitsschritt benötigten Einzelteile abgebildet.



Abbildung 7: Versuchsaufbau des User-Tests am Fraunhofer IFF (Foto: A. Minow)



Abbildung 8: Proband bei der Bauteilmontage am Modellarbeitsplatz des Fraunhofer IFF (Foto: A. Minow)

2.1.2 AP 5.5 Entwicklung Module für Montageassistenz und -prüfung

Hinweis: Im nun folgenden Abschnitt werden nur die untergeordneten Arbeitsschritte zum AP 5.5 dargestellt, die die Erarbeitung durch das Institut für Arbeitsmedizin (IAM) erforderten.

AP 5.5.2 Systementwurf zur Assistenz mittels modellbasierter Ansätze

Der Bereich Arbeitsmedizin unterstützt die Projektpartner beim Systementwurf zur Assistenz mittels modellbasierter Ansätze, u. a. mit der Bereitstellung und Präsentation von ergonomischen Richtlinien zur Software-Ergonomie (Projekttreffen am 17.01.2018) und in bilateralen Absprachen. Hinweise zur Gestaltung digitaler Assistenzsysteme hinsichtlich Softwareergonomie wurden auf verschiedenen nationalen Tagungen und Konferenzen präsentiert und in Fachzeitschriften publiziert:

- Böckelmann I, Minow A (2018) Nutzung digitaler Assistenzsysteme. Sicherheits- und Gesundheitsaspekte beim Einsatz neuer Technologien. *Arbeitsmedizin-Sozialmedizin-Umweltmedizin* 11, 702 – 707
- Minow A, Böckelmann I (2019) Nutzerzentrierung zur nachhaltigen Digitalisierung in der Produktion aus arbeitsmedizinischer Sicht. In: Tagungsband 22. IFF-Wissenschaftstage, 04. – 06. Juni 2019 in Magdeburg (eingereicht, in Druck)
- Minow A, Böckelmann I (2019) Empfehlungen für Forschung und Praxis zur Nutzerakzeptanz, Usability und User Experience bei der Entwicklung und beim Einsatz digitaler Assistenzsysteme. In: Tagungsband zur 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (DGAUM), 20. – 22. März 2019 in Erfurt, 50 – 51
- Minow A, Böckelmann I (2019) Bilanzierung zu Normen und Richtlinien zur ergonomischen Gestaltung digitaler Assistenzsysteme: Was haben wir und was fehlt uns? In: Tagungsband zur 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (DGAUM), 20. – 22. März 2019 in Erfurt, 362 – 364
- Minow A (2019) Ergonomische Gestaltung digitaler Assistenzsysteme. Ein entscheidender Punkt für die Nutzerakzeptanz? Vortrag Weiterbildungsveranstaltung für Betriebsärzte, 03.04.2019 in Magdeburg
- Minow A (2019) Normen und Richtlinien zur ergonomischen Gestaltung digitaler Assistenzsysteme und arbeitsmedizinischen Vorsorge: Alles geregelt? Wo stehen wir? Vortrag Weiterbildungsveranstaltung für Betriebsärzte, 03.04.2019 in Magdeburg
- Minow A, Böckelmann I (2018) Aus der Forschung für die Praxis – Erkenntnisse humanzentrierter Studien beim Einsatz digitaler Assistenzsysteme. Vortrag Deutscher Betriebsärzte-Kongress 17. – 20. Oktober 2018 in Lübeck

AP 5.5.3 Entwicklung, Implementierung und Test von Methoden / Strategien (zur situations- und zustandsabhängigen Steuerung der Assistenzbereitstellung, zur belastungsabhängigen Ablauf- und Assistenzsteuerung, zur Realisierung einer Adaptivität an die Arbeitsperson)

Der Bereich Arbeitsmedizin entwickelte und implementierte Methoden und Strategien zur situations-, zustands- und belastungsabhängigen Steuerung der Assistenzbereitstellung. Ergebnisse der Vorstudie aus dem psychophysiologischen Labor des Bereichs Arbeitsmedizin wurden herangezogen, um darauf aufbauende User-Tests in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern LIVING SOLIDS und Fraunhofer IFF zu planen und durchzuführen. Die Realisierung einer Adaptivität an den zukünftigen Nutzer wurden beachtet.

Aus der Vorstudie ging die Herzfrequenzvariabilitätsmessung als geeigneter Beanspruchungsparameter für die objektive Beanspruchung in weitere User-Tests ein.

2.1.3 AP 5.6 Analyse Arbeitsperson, Optimierung Assistenzfunktionalität

Hinweis: Im nun folgenden Abschnitt werden nur die untergeordneten Arbeitsschritte zum AP 5.6 dargestellt, die die Erarbeitung durch das Institut für Arbeitsmedizin (IAM) erforderten.

AP 5.6.1 Adaption von Methoden zur Erfassung und Bewertung des Beanspruchungszustandes der Arbeitsperson

Bei der Planung der arbeitsmedizinischen Begleituntersuchung (Vorstudie, User-Tests) wurden geeignete Methoden zur Erfassung und Bewertung des Beanspruchungszustandes der Arbeitsperson ausgewählt und angepasst, z. B. geeignete HRV-Parameter, psychologische Fragebögen und soziodemografische Fragen.

Die eingesetzten Methoden in der Vorstudie und ihre weitere Verwendung in den User-Tests sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Methodenübersicht

Mehrebenenkonzept mod. nach Fahrenberg (1969)	Methode	Vorstudie	User-Test mit LIVING-SOLIDS	User-Test mit Fraunhofer IFF
Subjektives Erleben und Befinden	• Eigenzustandsskala (EZ-Skala) nach Nitsch (1976)	✓	✓	x
	• Fragebogen zur visuellen Ermüdung (VFQ) nach Bangor (2000)	✓	✓	x
	• NASA Task Load Index (NASA-TLX) nach Hart (1988, 2006)	✓	x	x
	• Rating Scale Mental Effort (RSME) nach Zijlstra (1985, 1993)	x	✓	✓
Physiologische Antwortreaktionen	• HRV	✓	✓	✓
	• Aktivitätssensor	x	x	x
Objektive Leistungen einer Person	• Fehler, Bearbeitungszeit	✓	✓	x
ergänzt: Usability & Nutzerakzeptanz	• System Usability Scale (SUS) nach Brooke (1996)	✓	✓	x
	• Technology Acceptance Model (TAM) nach Davis (1985, 1989)	x	✓	x
	• ISONORM Fragebogen nach Prümper & Anft (1993); Prümper (1997); Pataki, Sachse, Prümper & Thüring (2006)	x	✓	x
	• Kurzinterviews (qualitativ)	x	✓	✓
	• „Lautes Denken“ (qualitativ)	x	x	✓

AP 5.6.2 Analyse der Wechselwirkung zwischen Beanspruchung der Arbeitsperson und informationstechnischer Assistenz

Die bei den Versuchen erhobenen Daten wurden entsprechend der aktuellen Datenschutzbestimmungen verarbeitet und gespeichert. Das Datenschutzkonzept wurde ebenso wie das Studienkonzept im Rahmen des Verbundvorhabens „3D-Montageassistent“ der Ethik-Kommission der Medizinischen Fakultät der Otto-von-Guericke-Universität vorgelegt. Eine positive Rückmeldung erfolgte am 20.11.2017 (185/17).

Zur Analyse der Wechselwirkung zwischen der Beanspruchung der Arbeitsperson und dem Assistenzsystem verfügte der Bereich Arbeitsmedizin in ausreichendem Maße über die nötigen Langzeit-EKG-Geräte sowie psychologischer Fragebögen, die in den drei Studien eingesetzt wurden.

AP 5.6.3 Feedback für die Entwicklung belastungsoptimierter Assistenz

Feedback für die Entwicklung belastungsoptimierter Assistenz aufgrund der aktuellen Forschungsergebnisse wurde innerhalb des Verbundvorhabens im Rahmen von Projekttreffen und bilateraler Treffen an die Partner weitergegeben. Weiterhin wurden Erkenntnisse aus den Literaturrecherchen und ersten Studienergebnissen zur Entwicklung belastungsoptimaler Assistenz bei Tagungen (z. B. VDBW, DGAUM, GfA) präsentiert, in Weiterbildungsveranstaltungen (z. B. für Betriebsärzte in Sachsen-Anhalt) diskutiert und in geeigneten Fachzeitschriften platziert (z. B. Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie).

AP 5.6.4 Begleitung von User-Tests mit Verifizierung der Beanspruchung mit arbeitsphysiologischen/-wissenschaften Methoden und Abgleich mit subjektivem Empfinden der Testperson

Die Begleitung von User-Tests mit Verifizierung der Beanspruchung mit wissenschaftlichen arbeitsphysiologischen Methoden und dem Abgleich mit dem subjektiven Empfinden dieser Belastung durch den Probanden fand planmäßig statt. Ein User-Test wurde bei LIVINGSO-LIDS und ein weiterer beim Fraunhofer IFF durchgeführt.

AP 5.6.5 Unterstützung zur Optimierung der Assistenzfunktion in Bezug auf die Reduzierung der Belastungen und Minimierung negativer Beanspruchungsfolgen sowie die Optimierung der Nutzerakzeptanz

Während der gesamten Projektlaufzeit unterstützte der Bereich Arbeitsmedizin die Forschungspartner bei der Optimierung der Assistenzfunktion, um mögliche Belastungen und Beanspruchungsfolgen zu minimieren und die Systeme aus der Sicht der Ergonomie optimal zu gestalten. Auch Usability-Aspekte und die Nutzerakzeptanz wurden beachtet.

2.1.4 AP 5.8 Arbeitsmedizinische Evaluation des Gesamtsystems

AP 5.8.1 Auswahl, Definition und Bereitstellung repräsentativer Anwendungsszenarien bei den Projektpartnern (Parker, Piezo)

Repräsentative Anwendungsszenarien bei den Projektpartnern wurden im Konsortium ausgewählt und definiert.

AP 5.8.2 Planung und Definition von Versuchsreihen mit Probanden

Versuchsreihen mit Probanden wurden sowohl im eigenen psychophysiologischen Labor (Vorstudie) als auch bei den Projektpartnern geplant und durchgeführt (User-Tests).

Vorstudie² (02/2018 – 06/2018)

Das Ziel der Vorstudie war es, die kognitive Leistungsfähigkeit sowie die Belastbarkeit und resultierende Beanspruchungsfolgen von Arbeitspersonen unter Anwendung eines digitalen Assistenzsystems bei industriellen Montageprozessen zu erfassen sowie die eingesetzten Methoden für Folgeversuche zu testen. Zur Realisierung der Studie wurden vom 13.02.2018 bis 11.06.2018 24 Probanden (\bar{x} 25,2 \pm 5,65 Jahre) akquiriert, davon 13 Frauen und 11 Männer, deren Aufgabe darin bestand, aus einzelnen Bauteilen geometrische Figuren zusammenzubauen (Abbildung 9).

² Ausführlich können die Ergebnisse dieser Studie in der Publikation *Minow A, Böckelmann I (2020) Beanspruchung, objektive Leistung und Gebrauchstauglichkeit bei simulierten Montageprozessen mit digitalen Arbeitsanweisungen Zbl Arbeitsmed, 70(2), 47 - 56, DOI:10.1007/s40664-019-00372-8* eingesehen werden.

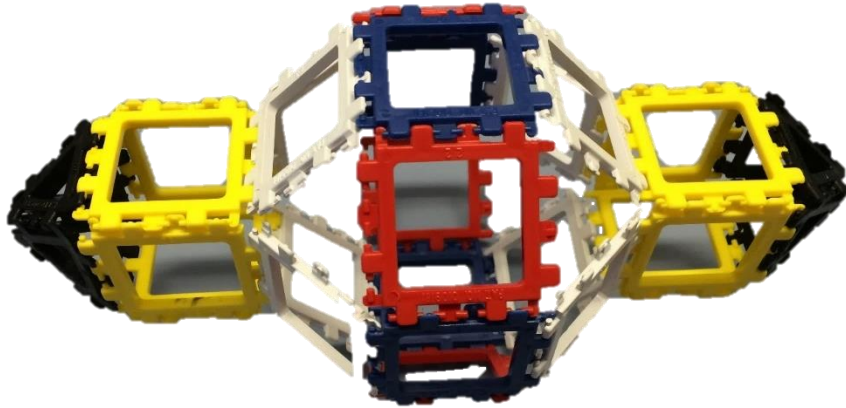


Abbildung 9: Beispiel für eine geometrische Figur (Vorstudie)

Dem Studienziel entsprechend und für einen späteren Datenvergleich wurde die Montage jeweils in Papierform sowie mithilfe einer wortgleichen digitalen Liste auf einem Laptop angewiesen. Beide Durchgänge wurden von den Probanden in randomisierter Reihenfolge durchgeführt.

Die eingesetzten Methoden finden sich in Tabelle 3.

Tabelle 3: Methodik Vorstudie

Mehrebenenkonzept nach Fahrenberg (1969)	Methoden und Parameter
Subjektives Erleben und Befinden	<ul style="list-style-type: none"> Eigenzustandsskala (EZ-Skala) Fragebogen zur visuellen Ermüdung (VFQ) NASA Task Load Index (NASA-TLX)
Physiologische Antwortreaktionen	<ul style="list-style-type: none"> Herzfrequenzvariabilität Aktivitätssensor
Objektive Leistungen einer Person	<ul style="list-style-type: none"> Bearbeitungszeit Fehler
ergänzt: Usability & Nutzerakzeptanz	<ul style="list-style-type: none"> System Usability Scale (SUS)

Die Ergebnisse zeigen, dass digitalisierte Arbeitsanweisungen im Vergleich zu herkömmlichen Papieranweisungen im kurzfristigen Einsatz nicht zu einer erhöhten subjektiven oder objektiven Beanspruchung beitragen. Auch die subjektive visuelle Beanspruchung ist nicht erhöht. Zudem zeigen sich keine signifikanten Unterschiede in den Leistungsparametern. Zur weiteren Analyse der Wechselwirkung zwischen der Beanspruchung der Arbeitsperson und der informationstechnischen Assistenz wurden zwei User-Tests in enger Abstimmung mit den Projektpartnern LIVING SOLIDS und Fraunhofer IFF geplant und durchgeführt (siehe AP 5.8.4).

AP 5.8.3 Einordnung der Probanden in Nutzerprofile (Erfahrungen, Qualifikation, Geschlecht, Alter, Belastbarkeit usw.)

Bei der Auswertung der Daten wurden verschiedene Erfahrungslevel mit digitalen Assistenzsystemen sowie soziodemografische Merkmale wie Alter und Geschlecht berücksichtigt.

AP 5.8.4 Begleitung von User-Tests mit dem Gesamtsystem

Es wurden zwei User-Tests mit Verbundpartnern durchgeführt:

1. User Test LIVING SOLIDS³ (03/2019 – 06/2019)

Der erste User-Test wurde vom Bereich Arbeitsmedizin in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner LIVING SOLIDS geplant und durchgeführt. Oberste Priorität hatte dabei die Weiterentwicklung des digitalen Assistenzsystems. Hierfür wurde mithilfe der Simulation einer Arbeitsbelastung unter Virtual Reality (VR) die Gebrauchstauglichkeit zweier digitaler Assistenzfunktionen basierend auf Augmented Reality (AR) und Pick-to-light (PtL) getestet. Zudem sollte, wie in der Vorstudie, die objektive und subjektive Beanspruchung sowie die objektive Leistung der Studienteilnehmer erfasst werden.

Der Studienaufbau erfolgte auf Grundlage des Mehrebenenkonzeptes nach Fahrenberg (1969), welches die simultane Erfassung des „subjektiven Erlebens und Befindens“, der „physiologischen Antwortreaktionen“ und der „objektiven Leistungen“ vorsieht. Die im User-Test eingesetzten Methoden sind Tabelle 4 zu entnehmen. Ergänzend wurden verschiedene quantitative Methoden (System Usability Scale, ISONORM 9241-Fragebogen, Teilskalen des Technology Acceptance Model, Kurzinterviews) verwendet, um zusätzlich die Benutzerfreundlichkeit und Akzeptanz der eingesetzten Technologie zu untersuchen.

Tabelle 4: Methodik User-Test (LIVING SOLIDS)

Mehrebenenkonzept nach Fahrenberg (1969)	Methoden und Parameter
Subjektives Erleben und Befinden	<ul style="list-style-type: none">• Eigenzustandsskala (EZ-Skala)• Fragebogen zur visuellen Ermüdung (VFQ)• Rating Scale Mental Effort (RSME)
Physiologische Antwortreaktionen	<ul style="list-style-type: none">• Herzfrequenzvariabilität
Objektive Leistungen einer Person	<ul style="list-style-type: none">• Bearbeitungszeit• Fehler
ergänzt: Usability & Nutzerakzeptanz	<ul style="list-style-type: none">• System Usability Scale (SUS)• ISONORM-Fragebogen• Technology Acceptance Model (TAM)• Kurzinterviews

³ Ausführlich können die Ergebnisse dieser Studie in der Publikation *Minow A, Stüring S, Böckelmann I (2019) VR-Simulation von Assistenzfunktionen in der manuellen Montage – ein Ansatz für arbeitsphysiologische Vergleiche nutzerbezogener Aspekte im Entwurfsprozess. Putz M, Klimant P, Klimant F (Hrsg.): Tagungsband VAR² 2019 – Realität erweitern. 5. Fachkonferenz zu VR/AR-Technologien in Anwendung und Forschung an der Professur Werkzeugmaschinenkonstruktion und Umformtechnik, Chemnitz, 139 – 149* eingesehen werden.

An dem User-Test nahmen 25 Probanden ($\bar{x} 26,8 \pm 8,93$ Jahre) beider Geschlechter teil, die für die Versuche in dem virtuell simulierten Montageszenario aufgefordert waren, Wegeventile und geometrische Figuren aus verschiedenen Teilen zusammenzubauen. Die Montage wurde von den Probanden in zwei randomisierten Durchgängen unter Nutzung der jeweiligen Assistentenfunktion (Augmented Reality und Pick-to-light) durchgeführt. Hierzu wurden im Montageszenario bei der AR-basierten Assistenz simulierte Konturen eingesetzt (Abbildung 10), um den Probanden den Verbauort der Einzelteile am Werkstück anzuzeigen. Bei dem Pick-to-Light-System (Abbildung 11) wiederum wurde den Probanden durch ein grün aufleuchtendes Lämpchen angezeigt, aus welcher Kiste das nächste zu verbauende Teil gegriffen werden muss. Bei beiden Durchgängen lief ein Display mit Animationen mit.

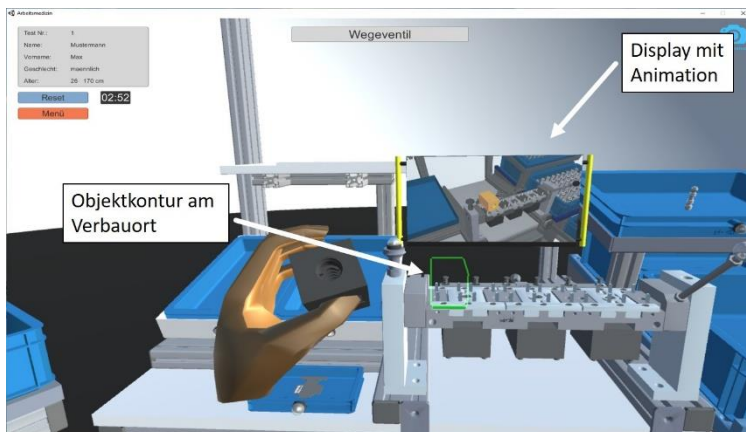


Abbildung 10: AR-Konturen und Display mit Animationen

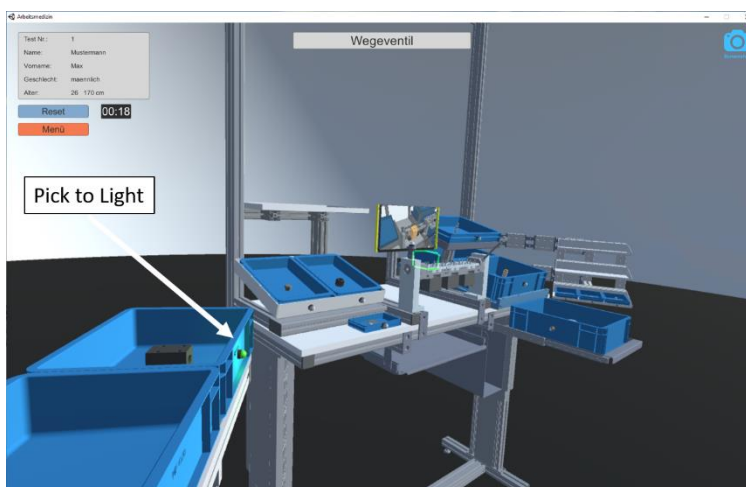


Abbildung 11: Pick-to-Light-System

Am Ende der Montageabläufe wurden die jeweiligen Assistentenfunktionen hinsichtlich ihrer Gebrauchstauglichkeit mittels der System-Usability-Scale, dem DIN EN ISO 9241-Fragebogen und den beiden Teilskalen des Technologieakzeptanzmodells durch die Probanden bewertet.

Die objektiven Leistungsdaten zeigten, dass die Probanden das Wegeventil mit den AR-Konturen am Verbauport bzw. dem Pick-to-Light-System ähnlich schnell und mit einer ähnlichen Fehlerquote zusammengebaut haben. Die Ergebnisse der HRV-Analyse zeigten auf, dass die benötigte kardiophysiologische Anstrengung, um das Ziel zu erreichen, bei beiden Assistentenfunktionen vergleichbar war. Die subjektiv erlebte Anstrengung, ermittelt durch die RSME, war bei dem PtL geringer als bei den AR-Konturen. Hier kann die Vermutung aufgestellt werden,

dass das Finden eines Bauteils größere Anstrengung erfordert als das Auffinden des Verbautes. Die Gebrauchstauglichkeit beider Varianten im Allgemeinen wird durch die Probanden als gut bewertet. Sowohl durch die SUS als auch durch die Favoritenabfrage ist eine Tendenz zum PtL jedoch erkennbar. Die Grundsätze der Dialoggestaltung sowie die wahrgenommene Nützlichkeit und Benutzerfreundlichkeit sind bei beiden Systemen ähnlich und als gut zu bewerten.

2. User-Test Fraunhofer IFF (12/2019 – 01/2020)

Der zweite User-Test erfolgte in enger Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und Automatisierung (IFF) Magdeburg. Das Ziel des User-Tests bestand in der Evaluierung der Gebrauchstauglichkeit des prototypischen Montageassistenten. Die für die Untersuchung notwendige Erprobung des Assistenzsystems fand an dem im IFF eingerichteten Demo-Arbeitsplatz statt.

An dem User-Test nahmen insgesamt 11 Probanden (\bar{x} 26,2 \pm 3,82 Jahre) teil, davon vier Frauen und sieben Männer. Für eine angemessene Erprobung des Montageassistenten war der Zusammenbau eines Wegeventils durch die Probanden vorgesehen. Übertragen auf einem Computerbildschirm wurden die Probanden dabei von AR-basierten Funktionen in Form von simulierten Konturen unterstützt, die zur Anzeige des Verbautes der einzelnen Bauteile dienten. Der Zusammenbau wurde von jedem Probanden einmal durchgeführt. Das methodische Kernstück der Untersuchung bildete das „Laute Denken“, welches es den Probanden ermöglichte, ihre Gedanken und Gefühle während der Bauteilmontage zu verbalisieren. Mithilfe dieser Methode können so Rückschlüsse zu verschiedenen Aspekten der Gebrauchstauglichkeit eines Systems gezogen werden (Frommann 2005). Methodisch ergänzend erfolgte die Beobachtung des Montagevorgangs und währenddessen die Protokollierung von Auffälligkeiten in der Benutzung des Assistenzsystems durch zwei Projektmitarbeiterinnen aus der Arbeitsmedizin. Abschließend wurde mit jedem Studienteilnehmer ein qualitatives Interview geführt, um nochmals detailliertere Hinweise zu den Stärken und Schwächen des Montageassistentensystems zu erhalten. Eine Gesamtübersicht der eingesetzten Methoden findet sich in Tabelle 5.

Tabelle 5: Methodik User-Test (Fraunhofer IFF)

Mehrebenenkonzept nach Fahrenberg (1969)	Methoden und Parameter
Subjektives Erleben und Befinden	<ul style="list-style-type: none"> Rating Scale for Mental Effort (RSME)
Physiologische Antwortreaktionen	<ul style="list-style-type: none"> Herzfrequenzvariabilität
Objektive Leistungen einer Person	<ul style="list-style-type: none"> nicht erfasst
ergänzt: Usability & Nutzerakzeptanz	<ul style="list-style-type: none"> Kurzinterviews Lautes Denken

Weitere erfasste Parameter waren u. a. die der objektiven Beanspruchung (die Herzfrequenzvariabilität) und die subjektive Anstrengung durch die Rating Scale Mental Effort (RSME). Auf Basis der gewonnenen qualitativen Daten erfolgte die Auswertung.

Aus den Ergebnissen des „Lauten Denkens“ und den qualitativen Interviews geht hervor, dass die Probanden das Montageassistenzsystem insgesamt als eine wesentliche Hilfestellung empfinden, insbesondere wenn der Zusammenbau eines Werkstücks zum ersten Mal erfolgt. Zu den Stärken des Systems zählen vor allem die Schritt-für-Schritt-Anleitung und die AR-Konturen. Beides dient den Probanden zur Orientierung und gibt ihnen die Sicherheit, die Montage korrekt auszuführen.

Bemängelt wird lediglich die unübersichtliche Gestaltung der Arbeitsschrittanweisungen. Da den Probanden dafür zwei unterschiedliche Anzeigen (Gesamtmontageschritt-/ Einzelschrittanleitung) auf einem Bildschirm zur Verfügung stehen, in denen zudem unterschiedliche, aber für die Montage wichtige Hinweise (Werkzeugangaben, Artikelnummern der Bauteile) aufgeführt werden, müssen die Probanden zwischen den Anzeigen hin und her springen, was zu Störungen im Ablauf führt.

Das auf dem rechten Bildschirm dargestellte CAD-Modell und die dafür hinterlegten Funktionen werden von den Probanden als zusätzliche Unterstützung gesehen. Insgesamt schätzen sie die Funktionen jedoch als nicht unbedingt notwendig ein. Grundsätzlich zeugen die Aussagen der Probanden aber von Zufriedenheit mit dem Montageassistenzsystem.

AP 5.8.5 Auswertung und Erarbeitung von Empfehlungen zur Optimierung der Funktionalitäten der Sensor- und Assistenzfunktionalitäten

Nach der erfolgreichen Durchführung der Vorstudie und beider User-Tests wurden die jeweiligen Ergebnisse der arbeitsmedizinischen Untersuchungen inhaltlich aufbereitet. Daraus ableitend wurden entsprechende Empfehlungen zur Softwaregestaltung insbesondere der Optimierung der Sensor- und Assistenzfunktionalitäten abgeleitet. Dabei galt es, eine humanzentrierte Sichtweise zu berücksichtigen, bei dem der zukünftige Nutzer der innovativen Technologien im Mittelpunkt steht.

Nach Festlegung der Empfehlungen wurden diese am Bereich Arbeitsmedizin den Projektpartnern vorgestellt und fachlich von beiden Seiten (Entwickler und Arbeitsmediziner) diskutiert. Durch das Einbringen der vielfältigen Expertise aller Projektpartner konnten die ausgearbeiteten Empfehlungen weiter optimiert werden und als wegweisend für die Weiterentwicklung der Sensor- und Assistenzfunktionalitäten angesehen werden.

AP 5.8.6 Vergleich der Systemvarianten aus AP6: assistiert vs. unassistiert

In dem zweiten User-Test am Fraunhofer-Institut Magdeburg wurde mithilfe des konstruierten Modellarbeitsplatzes und dem von den Probanden geforderten Zusammenbau eines Wegevventils versucht, realitätsnahe Arbeitsbedingungen für das Experiment zu schaffen, die einen Vergleich zwischen einer assistierten und unassistierten Montage zulassen. Da es sich in diesem User-Test jedoch ausschließlich um Probanden ohne Montageerfahrungen handelte, konnte der jeweilige Montagevorgang nur mithilfe von Assistenz durchgeführt werden. Das hat zur Folge, dass bis zur Abgabe des Abschlussberichtes keine Ergebnisse für einen Vergleich erzielt werden konnten. Im Rahmen einer beantragten Verlängerung des Projektes durch die Projektpartner sind jedoch Folgestudien bei dem Anwendungspartner Parker unter realen Arbeitsbedingungen im Unternehmen geplant, mit deren Hilfe entsprechende Ergebnisse generiert werden können.

AP 5.8.7 Weiterentwicklung und Evaluation des Gesamtsystems, Festlegung der erforderlichen Maßnahmen zur Gestaltung der Montageassistenz, Erarbeitung der Handlungsempfehlungen für gesundes Arbeiten mit 3D-basierten Montageassistenten

Insgesamt folgte die Erarbeitung von Handlungsempfehlungen zur Gestaltung und Weiterentwicklung der Montageassistenten in einem schrittweisen Vorgehen. Dafür wurden zunächst verschiedene Recherchen durchgeführt. Ziel dieser Recherchen war es, arbeitsmedizinische Erkenntnisse aus der Literatur und anderen Studien zur Softwareergonomie digitaler Montageassistenten zu erlangen. Die Rechercheergebnisse wurden zusammengetragen und anschließend genutzt, um die Versuchsabläufe der Vorstudie und User-Tests inhaltlich und methodisch zu planen. Vor allem die Vorstudie diente dabei der Testung der vorgesehenen Erhebungsinstrumente und somit dem Ableiten von Handlungsempfehlungen für das methodische Vorgehen in den User-Tests.

Wie bereits im Arbeitspaket 5.8.5 beschrieben, wurden die Ergebnisse der arbeitsmedizinischen Untersuchungen in den User-Tests genutzt, um entsprechende Handlungsempfehlungen und Erfolgsfaktoren für eine gute Montageassistenten auszuarbeiten. Diese wurden dann an die Projektpartner kommuniziert und von den Entwicklern bei der weiteren Gestaltung der Softwareergonomie eingebunden. Des Weiteren erfolgten die Präsentation und Veröffentlichung aller gewonnenen theoretischen sowie praktischen Erkenntnisse im Rahmen von diversen Tagungen und Publikationen.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Aufgaben des Bereichs Arbeitsmedizin der Medizinischen Fakultät der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg zur Anwendung 3D-basierter Assistentenfunktionalitäten im industriellen Umfeld wurden dem Arbeitsplan entsprechend ohne zeitliche Verzögerungen bearbeitet. Dementsprechend waren keine Änderungen im Ablauf des Arbeitsplans notwendig. Die formulierten Zielstellungen wurden unter Einhaltung der geplanten Meilensteine durchgängig erreicht.

Der zahlenmäßige Nachweis wurde separat übermittelt.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Mit dem Projekt „3D-Montageassistent“ wurde ein hochaktuelles und durch die Wissenschaft viel diskutiertes Thema aufgegriffen. Diesbezüglich ist es dem Bereich Arbeitsmedizin, durch die enge Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern und den interdisziplinären Austausch, gelungen die Forschung mit Blick auf eine ergonomie- und belastungsoptimierte Gestaltung zukünftiger Montagearbeitsplätze und unter Berücksichtigung der Nutzerakzeptanz von 3D-basierten Assistententechnologien voranzutreiben. Dies erforderte eine intensive und praxisnahe Bearbeitung der in der Projektplanung formulierten Arbeitspakete. Die so gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse wurden auf Fachveranstaltungen und in Fachzeitschriften publiziert, so dass diese für Wissenschaft und Praxis langfristig zur Verfügung stehen.

Erst die finanzielle Förderung des BMBF jedoch ermöglichten die Umsetzung des Teilvorhabens durch die Arbeitsmedizin. Neben den monetären Ressourcen konnten auch die zeitlichen und personellen zur Verfügung stehenden Ressourcen angemessen eingesetzt werden, so dass keine zusätzlichen Mittel erforderlich waren.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertung der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Ergebnisse des Projektes bilden die Basis für weiterführende wissenschaftliche Forschungsarbeiten im Bereich der Beanspruchungsanalyse. Weitere Forschungsaktivitäten - auch mit den Projektpartnern - sind vorgesehen.

Aus den im Projekt von verschiedenen Verbundpartnern und des Bereichs Arbeitsmedizin gewonnenen Erkenntnissen und Ergebnissen bzgl. arbeitsmedizinischer Fragestellungen im

Kontext nutzergerechter 3D-basierter Assistenztechnologien kann perspektivisch ein erweitertes wissenschaftliches Leistungsportfolio gebildet werden, welches Industrieunternehmen bei der Bewertung, Optimierung und Einführung dieser neuartigen Systeme unterstützt. Die Projektergebnisse wurden - teils gemeinsam mit den wissenschaftlichen Projektpartnern - auf internen Workshops des Forschungsverbundes präsentiert sowie national und international in SCI- bzw. AWMF-gelisteten Zeitschriften publiziert. Des Weiteren wurden die Projektergebnisse in die studentische Ausbildung der Humanmediziner der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg integriert. Der Bereich Arbeitsmedizin hat folgende wissenschaftliche Verwertungsziele im Projektzeitraum erreicht bzw. plant nach Projektabschluss die folgenden (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Wissenschaftliche Verwertungsziele

Wissenschaftliche Verwertungsziele	Im Projektzeitraum erreicht:	geplant:
Präsentation der Ergebnisse auf internen Workshops des Forschungsverbundes	1	-
Präsentation der Ergebnisse auf nationalen und internationalen Symposien, Tagungen, Konferenzen (z. B. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. (DGAUM), Nachwuchssymposium des Forums Arbeitsphysiologie (FAP))	8	2
Publikationen in nationalen und internationalen SCI-gelisteten bzw. AWMF-anerkannten Zeitschriften der Fachgesellschaft (z. B. Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie; Arbeitsmedizin, Sozialmedizin, Umweltmedizin; Arbeitswissenschaften; Industrial Health; Ergonomics)	3	1
Betreuung von Promotionen (Humanmedizin oder Naturwissenschaftler in der Medizin) an der Medizinischen Fakultät der Otto-von-Guericke-Universität (OVGU) im Kontext arbeitsmedizinischer Belastungs-Beanspruchungs-Analysen beim Nutzen 3D-basierter Assistenztechnologien für variantenreiche Montageprozesse	1	-
Integration der gewonnenen Erkenntnisse bzgl. arbeitsmedizinischer Fragestellungen in die studentische Ausbildung der Humanmediziner an der OVGU (Arbeitsmedizin und Wahlfach „Praktische Betriebsmedizin“)	fortlaufend	fortlaufend
Präsentation der gewonnenen Erkenntnisse bzgl. arbeitsmedizinischer Fragestellungen bei der Weiterbildungsveranstaltung der Betriebsärzte und Arbeitsmediziner	1	1

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Hinsichtlich der Auswirkungen digitaler Assistenzsysteme auf den Nutzer konnten seit 2017 bis heute verschiedene Erkenntnisse bei anderen Stellen gewonnen werden. Im Folgenden

wird die Ebene der subjektiven Beanspruchung, der objektiven Beanspruchung und objektive Leistungsdaten sowie die Usability und Nutzerakzeptanz beachtet.

Im Bereich der **subjektiv erlebten Anstrengung** konnten z. B. Pringle et al (2018) zeigen, dass diese im Vergleich eines AR-HMD und eines Tablets beim AR-HMD von den Probanden niedriger eingeschätzt wird. Die physische Beanspruchung wurde jedoch beim AR-HMD höher eingeschätzt. Als möglichen Grund nennen die Autoren das Gewicht des HMDs. Bei Montagetrainings zeigten Werrlich et al (2018), dass Probanden die zeitliche Beanspruchung und die Frustration bei einem papierbasierten Montagetraing höher einschätzten als bei einem HMD-basierten Montagetraing. Kretschmer & Terharen (2019) untersuchten in ihrer Studie die Verwendung von VR-Brillen zu Trainingszwecken in der Intralogistik. Die Ergebnisse zeigen, dass die mentale Arbeitsbeanspruchung der VR-Brillen als moderat wahrgenommen wurde (NASA-TLX von 30,1 Punkten). In einem Experiment von Kim et al. (2019), in dem u. a. verschiedene Informationsdarstellungen (text- vs. grafikbasiert) und Informationsverfügbarkeiten (immer vs. auf Abruf verfügbar) verglichen wurden, empfanden die Probanden subjektiv die graphische Darstellung sowie die immer verfügbare Information als weniger mental beanspruchend als die textbasierte bzw. die auf Abruf bereitgestellte Information. Auch eine qualitative Interviewstudie zum Nutzererleben in der Mensch-Computer-Interaktion zeigt auf, dass Assistenzsysteme berechenbar und vertraut sein müssen, um die menschlichen Bedürfnisse nach Zugehörigkeit und Sicherheit zu befriedigen (Krüger et al. 2018). In einem Vergleich der subjektiven visuellen Ermüdung bei der Betrachtung von virtuellen bzw. realen Objekten zeigten Gao et al. (2019), dass sich die Probanden nach der Betrachtung der virtuellen Elemente mit dem OST-HMD signifikant visuell ermüdeter fühlten als bei der Betrachtung realer Objekte.

Gao et al. (2019) untersuchten u. a. mittels EOG und EKG bei 18 Probanden, wie sich die visuelle Beanspruchung auf **objektiver physiologischer Ebene** bei der zehnmütigen Betrachtung virtueller Objekte mit einem OST (Optical-See-Through)-HMD im Vergleich zur Betrachtung realer Objekte verändert. Die Probanden sollten in sieben Durchgängen die verschiedenfarbigen Flächen eines Zauberwürfels zählen, wobei sie einmal reale Würfel betrachteten und das andere Mal virtuelle Würfel durch ein OST (Optical-See-Through)-HMD. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Teilnehmer bei der Betrachtung virtueller Objekte stärker visuell und psychophysiologisch beansprucht sind.

Bei der Betrachtung **objektiver Leistungsdaten** konnten Funk et al. (2018) in einer experimentellen Studie mit 49 Probanden keine negativen Leistungseffekte (Arbeitsgeschwindigkeit und -qualität) bei einer Smartwatch verglichen mit einem statischen 60-Zoll-Statusmonitor nachweisen. Pringle et al. (2018) stellten in ihrer Studie einer Gruppe von Probanden (n = 18) ein AR-HMD, wodurch diese dynamische 3D-Modelle und Textfelder sehen konnten und einer Gruppe (n = 18) eine Instruktion auf einem Tablet, um einen Motor ca. 20 Minuten zu warten. Diesen Vorgang teilten sie in elf Einzelschritte auf und verglichen die beiden Gruppen in jedem Teilschritt bezüglich der Aufgabengenauigkeit und der Geschwindigkeit. Die Ergebnisse zeigten, dass AR insgesamt die Genauigkeit verbesserte, aber nicht die Geschwindigkeit. Die Ergebnisse unterschieden sich jedoch zwischen den Einzelschritten und sprechen damit für die Bedeutung einer Analyse auf der Ebene der einzelnen Arbeitsschritte, um die AR-Anweisungen vollständig bewerten zu können. Werrlich et al. (2018) untersuchten mit 30 Probanden die Unterschiede eines HMD-basierten Montagetrainings (Gruppe 1) im Vergleich zu einem papierbasierten (Gruppe 2). Gruppe 2 absolvierte das Training signifikant schneller, machte jedoch auch mehr Fehler. Kim et al. (2019) verglichen in ihrer Studie mit 16 Probanden, die eine simulierte Kommissionierungsaufgabe ausführten, zwei HMD-Typen (monokular vs. binokular)

miteinander: die Benutzeroberflächen bezüglich der Informationsdarstellung (text- vs. grafikbasiert) und die Informationsverfügbarkeit (immer vs. auf Abruf verfügbar). Als Baseline absolvierten die Probanden die Aufgabe mit Hilfe einer Papierliste. Die Bearbeitungszeit war bei grafikbasierter Informationsdarstellung signifikant kürzer, wobei die Probanden bei ständig verfügbarer Information noch schneller waren, als bei nur auf Abruf gezeigter Information. Die Fehlerrate war bei grafikbasierter Darstellung signifikant kleiner als bei textbasierter. Der HMD-Typ (monokular vs. binokular) verursachte keinen objektiv gemessenen Unterschied.

Funk et al. (2018) konnten in ihrer experimentellen Studie für die Smartwatch verglichen mit dem festen Desktopmonitor keine negativen **Akzeptanzeffekte** nachweisen. Jedoch wurden die **Usability** durch eine Teilskala des UEQ und das Vertrauen in die Smartwatch durch die Probanden höher bewertet. Müller et al. (2018) haben eine Studie zur intuitiven Bedienung laserbasierter Montageassistenten durchgeführt und dabei eine Smartwatch, ein Armband mit Gestensteuerung und eine Sprachsteuerung mit einer Infrarot-Fernbedienung verglichen. Hinsichtlich der Usability und User-Experience bewerteten die Probanden hier die Sprachsteuerung am besten, am schlechtesten schnitt die Gestensteuerung ab. Im Vergleich eines AR-HMDs und eines Tablets schätzten Probanden die AR-Arbeitsanweisung als benutzerfreundlicher und lernförderlicher ein (Pringle et al. 2018). Im Vergleich eines HMD-basierten Montagetrainings mit einem papierbasierten Montagetraining empfanden die Probanden die Benutzerfreundlichkeit (ermittelt durch SUS) und die hedonische und pragmatische Qualität (ermittelt durch UEQ) bei dem HMD besser (Werrlich et al. 2018).

2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Erfolgte Veröffentlichungen

Originalarbeiten

- Minow A, Böckelmann I (2020)
Beanspruchung, objektive Leistung und Gebrauchstauglichkeit bei simulierten Montageprozessen mit digitalen Arbeitsanweisungen
Zbl Arbeitsmed, 70(2), 47 - 56, DOI:10.1007/s40664-019-00372-8
- Schmidt S, Minow A, Böckelmann I (2020)
Einsatz und Aussagekraft etablierter quantitativer Usability-Fragebögen in einem User-Test.
Zbl Arbeitsmed

Übersichtsarbeiten

- Böckelmann I, Minow A (2018)
Nutzung digitaler Assistenzsysteme. Sicherheits- und Gesundheitsaspekte beim Einsatz neuer Technologien.
Arbeitsmedizin-Sozialmedizin-Umweltmedizin 11, 702 – 707

Buch- und Kongressbeiträge

- Minow A, Stüring S, Böckelmann I (2019)
VR-Simulation von Assistenzfunktionen in der manuellen Montage – ein Ansatz für arbeitsphysiologische Vergleiche nutzerbezogener Aspekte im Entwurfspro-

zess. Putz M, Klimant P, Klimant F (Hrsg.): Tagungsband VAR² 2019 – Realität erweitern. 5. Fachkonferenz zu VR/AR-Technologien in Anwendung und Forschung an der Professur Werkzeugmaschinenkonstruktion und Umformtechnik, Chemnitz, 139 – 149

- Minow A, Böckelmann I (2019)
Nutzerzentrierung zur nachhaltigen Digitalisierung in der Produktion aus arbeitsmedizinischer Sicht.
In: Schenk M, Adler S (Hrsg.): Nachhaltigkeit bei der Nutzung digitaler Daten in der Produktion, 22 – 29, DOI: 10.24406/iff-n-581274
- Minow A, Böckelmann I (2019)
Visuelle Ermüdung, Motivations- und Beanspruchungslage sowie Usability bei modellierten Montageprozessen.
In: Tagungsband zur 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (DGAUM), 20. – 22. März 2019 in Erfurt, 124 – 126
- Minow A, Böckelmann I (2019)
Empfehlungen für Forschung und Praxis zur Nutzerakzeptanz, Usability und User Experience bei der Entwicklung und beim Einsatz digitaler Assistenzsysteme.
In: Tagungsband zur 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (DGAUM), 20. – 22. März 2019 in Erfurt, 50 – 51
- Minow A, Böckelmann I (2019)
Vergleich der Motivation und subjektiven Beanspruchung bei simulierten Montageprozessen mit herkömmlichen und digitalen Hilfestellungen.
In: Tagungsband zur 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (DGAUM), 20. – 22. März 2019 in Erfurt, 351 – 355
- Minow A, Böckelmann I (2019)
Bilanzierung zu Normen und Richtlinien zur ergonomischen Gestaltung digitaler Assistenzsysteme: Was haben wir und was fehlt uns?
In: Tagungsband zur 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (DGAUM), 20. – 22. März 2019 in Erfurt, 362 – 364
- Minow A, Böckelmann I (2019)
Motivation und subjektive Beanspruchung bei simulierten Montageprozessen mit herkömmlichen und digitalen Hilfestellungen – Ergebnisse einer Pilotstudie.
GfA Frühjahrskongress 2019, Dresden GfA, Dortmund (Hrsg.): Frühjahrskongress 2019, Dresden Beitrag E. 1.3 ARBEIT(s).WISSEN.SCHAF(f)T – Grundlage für Management & Kompetenzentwicklung. 1 – 5
- Minow A, Böckelmann I (2018)
Nutzerbezogene Aspekte beim Einsatz von digitalen Assistenztechnologien im Montagebereich – ein systematischer Review
In: Tagungsband zur 58. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (DGAUM), 07. – 09. März 2018 in München, ISBN: 978-3-9817007-6-3, 91 – 92

- Minow A, Böckelmann I (2018)
Beanspruchungsindikatoren mit neuen digitalen Assistenztechnologien – Wie smarte Arbeit 4.0 gelingt.
Kognitive Ergonomie: Der Mensch – eingebunden in die Logistik 4.0 – München: Huss-Verlag, ISBN: 978-3-946350-86-6, 106 – 113

Vorträge und Poster

- Minow A, Stüring S (2019)
VR-Simulation von Assistenzfunktionen in der manuellen Montage – ein Ansatz für arbeitsphysiologische Vergleiche nutzerbezogener Aspekte im Entwurfsprozess.
Vortrag VAR² 2019 – Realität erweitern. 5. Fachkonferenz zu VR/AR-Technologien in Anwendung und Forschung an der Professur Werkzeugmaschinenkonstruktion und Umformtechnik, 04 – 05. Dezember 2019 in Chemnitz
- Minow A (2019)
Ergonomische Gestaltung digitaler Assistenzsysteme. Ein entscheidender Punkt für die Nutzerakzeptanz?
Vortrag Weiterbildungsveranstaltung für Betriebsärzte, 03. April 2019 in Magdeburg
- Minow A (2019)
Normen und Richtlinien zur ergonomischen Gestaltung digitaler Assistenzsysteme und arbeitsmedizinischen Vorsorge: Alles geregelt? Wo stehen wir?
Vortrag Weiterbildungsveranstaltung für Betriebsärzte, 03. April 2019 in Magdeburg
- Minow A, Böckelmann I (2019)
Visuelle Ermüdung, Motivations- und Beanspruchungslage sowie Usability bei modellierten Montageprozessen.
Vortrag 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (DGAUM), 20. – 22. März 2019 in Erfurt
- Minow A, Böckelmann I (2019)
Empfehlungen für Forschung und Praxis zur Nutzerakzeptanz, Usability und User Experience bei der Entwicklung und beim Einsatz digitaler Assistenzsysteme.
Vortrag 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (DGAUM), 20. – 22. März 2019 in Erfurt
- Minow A, Böckelmann I (2019)
Vergleich der Motivation und subjektiven Beanspruchung bei simulierten Montageprozessen mit herkömmlichen und digitalen Hilfestellungen.
Poster 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (DGAUM), 20. – 22. März 2019 in Erfurt
- Böckelmann I, Minow A, Bergmüller A, Mewes E, Darius S, Mecke R (2019)
Die Rolle und Einordnung digitaler Assistenzsysteme in der Arbeit 4.0.
Vortrag 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. (DGAUM), 20. – 22. März 2019 in Erfurt

- Minow A, Böckelmann I (2019)
Bilanzierung zu Normen und Richtlinien zur ergonomischen Gestaltung digitaler Assistenzsysteme: Was haben wir und was fehlt uns?
Poster 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (DGAUM), 20. – 22. März 2019 in Erfurt
- Minow A, Böckelmann I (2018)
Pilotstudie zum Vergleich der Motivation und subjektiven Beanspruchung bei simulierten Montageprozessen mit herkömmlichen und digitalen Hilfestellungen.
Vortrag 22. Symposium Arbeitsmedizin und Arbeitswissenschaft für Nachwuchswissenschaftler vom 16. – 18.11.2018 in Tübingen
- Minow A, Böckelmann I (2018)
Aus der Forschung für die Praxis – Erkenntnisse humanzentrierter Studien beim Einsatz digitaler Assistenzsysteme.
Vortrag Deutscher Betriebsärzte-Kongress 17. – 20. Oktober in Lübeck
- Böckelmann I, Minow A, Darius S, Abele N D, Mecke R (2018)
Fragen der Gesundheit und Ergonomie bei der Nutzung digitaler Assistenzsysteme.
Vortrag Deutscher Betriebsärzte-Kongress 17. – 20. Oktober 2018 in Lübeck
- Minow A, Böckelmann I (2018)
Nutzerbezogene Aspekte beim Einsatz von digitalen Assistenztechnologien im Montagebereich – ein systematischer Review
Vortrag 58. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (DGAUM), 07. – 09. März 2018 in München, 54

geplante Veröffentlichungen

Originalarbeiten

- Minow A, Stüring S, Böckelmann I (2020)
Gebrauchstaugliche Assistenzsysteme in der manuellen Montage – ein Vergleich von Pick-to-Light und AR-Konturen mittels VR-Simulation.
Zeitschrift für Arbeitswissenschaft (eingereicht)

Übersichtsarbeiten

- van Schelve J, Minow A, Böckelmann I (2020)
Aktuelle Standards zur Gestaltung von Softwareergonomie visueller digitaler Assistenzsysteme: Ein systematischer Überblick.
Arbeitsmedizin-Sozialmedizin-Umweltmedizin (eingereicht)
- Böckelmann I, Minow A (2020)
Opportunities and Risks of Digital Assistance Systems from the Perspective of Occupational Medicine.
International Archives of Occupational and Environmental Health (eingereicht)

Buch- und Kongressbeiträge

- Minow A, Stüring S, Böckelmann I (2020)
Mental Effort and Usability of Assistance Systems in Manual Assembly – A Comparison of Pick-to-Light and AR Contours through VR Simulation.
In: 22. International Conference on Human-Computer Interaction (HCI), 19 – 24. Juli 2020 in Kopenhagen (angenommen)
- Minow A, Stüring S, Böckelmann I (2020) Manuelle Montage mit Pick-to-Light oder **Augmented-Reality-Konturen – Vergleich der Beanspruchung anhand einer experimentellen Untersuchung.**
60. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (DGAUM), 02. – 05. September 2020 in München (angenommen)

Vorträge und Poster

- Minow A, Stüring S, Böckelmann I (2020) Manuelle Montage mit Pick-to-Light oder **Augmented-Reality-Konturen – Vergleich der Beanspruchung anhand einer experimentellen Untersuchung.**
Vortrag 60. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (DGAUM), 02. – 05. September 2020 in München (angenommen)
- Minow A, Stüring S, Böckelmann I (2020)
Mental Effort and Usability of Assistance Systems in Manual Assembly – A Comparison of Pick-to-Light and AR Contours through VR Simulation.
Vortrag 22. International Conference on Human-Computer Interaction (HCI), 19 – 24. Juli 2020 in Kopenhagen (angenommen)

2.7 Literatur

Bangor AW (2000) Display Technology and Ambient Illumination Influences on Visual Fatigue at VDT Workstations. Dissertation, Blacksburg, Virginia.

Brooke J (1996) SUS – A quick and dirty usability scale. In: Jordan PW, Thomas B, Weerdmeester, Bernard A. & McClelland, Ian L. (Hrsg.) Usability Evaluation in Industry. Taylor & Francis, London.

Davis FD (1985) A technology acceptance model for empirically testing new end-user information systems: Theory and results. Institute of Technology, Massachusetts.

Davis FD (1989) Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. MIS Quarterly 13 (3): 319–340.

Encarnação JL, Felger W (1997) Internationale Aktivitäten und Zukunftsperspektiven der Virtuellen Realität. In: Encarnação JL, Pöppel E, Schipanski D et al. Wirklichkeit versus Virtuelle Realität; Strategische Optionen, Chancen und Diffusionspotentiale. [Hrsg.: Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie mit Unterstützung des VDI-Technologiezentrums, Abtlg. Zukünftige Technologien], Baden-Baden: Nomos Verl.-Ges.

Fahrenberg J (1969) Die Bedeutung individueller Unterschiede für die Methodik der Aktivierungsforschung. In: Schönplflug W (Hrsg.) Methoden der Aktivierungsforschung 95–122. Huber, Bern.

Frommann, U (2005) Die Methode „Lautes Denken“. Abgerufen von https://www.e-teaching.org/didaktik/qualitaet/usability/Lautes%20Denken_e-teaching_org.pdf, zuletzt aktualisiert am 05.08.2005, zuletzt geprüft am 27.01.2020.

Funk M, Hartwig M, Backhaus N, Knittel M, Deuse J (2018) Nutzerevaluation von Assistenzsystemen für die industrielle Montage. In: Weidner R, Karafillidis A (Hrsg.) Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen. Dritte trans-disziplinäre Konferenz 213–221. Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg, Deutschland.

Gao Y, Liu Y, Normand J-M, Moreau G, Gao X, Wang Y (2019) A study on differences in human perception between a real and an AR scene viewed in an OST-HMD. J Soc Inf Display 27 (3): 155–171.

- Hart SG, Staveland L (1988) Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In: Hancock P, Meshkati N (Hrsg.) *Human Mental Workload* 139–183. North Holland, Amsterdam.
- Hart SG (2006) NASA-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 50 (9): 904–908.
- Kim S, Nussbaum MA, Gabbard JL (2019) Influences of augmented reality head-worn display type and user interface design on performance and usability in simulated warehouse order picking. *Applied ergonomics* 74: 186–193.
- Kretschmer V, Terharen A (2019) Serious Games in Virtual Environments: Cognitive Ergonomic Trainings for Workplaces in Intralogistics. In: Ahram TZ (Hrsg.) *Advances in Human Factors in Wearable Technologies and Game Design* 266–274. Springer International Publishing, Cham.
- Krüger J, Wahl M, Frommer J (2018) „es is komisch es is keen mensch“ – Zuschreibungen gegenüber individualisierten technischen Assistenzsystemen. Eine Interviewstudie zum Nutzer/innenerleben in der Mensch-Computer-Interaktion. *ZQF* 19 (1-2): 253–270.
- Milgram P, Colquhoun H (1999) A Taxonomy of Real and Virtual World Display Integration. In: Ohta, Y. und Tamura, H. (Hrsg.): *Mixed Reality – Merging Real and Virtual Worlds*. Springer Verlag, Berlin.
- Minow A, Böckelmann I (2019) Bilanzierung zu Normen und Richtlinien zur ergonomischen Gestaltung digitaler Assistenzsysteme: Was haben wir und was fehlt uns? In: *Tagungsband zur 59. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (DGAUM)*, 20. – 22. März 2019 in Erfurt, 362 – 364.
- Müller R, Müller-Polyzou R, Hörauf L, Bashir A, Karkowski M, Vesper D, Gärtner S (2018) Intuitive Bedienung laserbasierter Montageassistenten. *ZWF* 113 (6): 363–368.
- Nitsch JR (1976) Die Eigenzustandsskala (EZ-Skala) - Ein Verfahren zur hierarchisch-mehrdimensionalen Befindlichkeitsskalierung. In: Nitsch JR, Udris I (Hrsg.) *Beanspruchung im Sport. Beiträge zur psychologischen Analyse sportlicher Leistungssituation* 81–102. 1. Aufl. Limpert-Verlag, Bad Homburg.
- Pataki K, Sachse K, Prümper J, Thüring M (2006) ISONORM 9241/110-Short: Kurzfragebogen zur Software-Evaluation. In: Lösel F (Hrsg.) *Berichte über den 45. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie*. 258–259. Pabst Science Publishers, Lengerich.
- Pringle A, Campbell AG, Hutka S, Torrasso A, Couper C, Strunden F, Bajana J, Jastzab K, Croly R, Quigley R, McKiernan R, Sweeney P, Keane MT (2018) Using an Industry-Ready AR HMD on a Real Maintenance Task: AR Benefits Performance on Certain Task Steps More Than Others. In: *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)* 236–241. IEEE.
- Prümper J, Anft M (1993) Die Evaluation von Software auf Grundlage des Entwurfs zur internationalen Ergonomie-Norm ISO 9241 Teil 10 als Beitrag zur partizipativen Systemgestaltung – ein Fallbeispiel. In: Rödiger K (Hrsg.) *Software-Ergonomie'93 – Von der Benutzungsoberfläche zur Arbeitsgestaltung* 145–156. Teubner, Stuttgart.
- Prümper J (1997) Der Benutzerfragebogen ISONORM 9241/10: Ergebnisse zur Reliabilität und Validität. In: Liskowsky R, Velichkovsky BM, Wüschmann W (Hrsg.) *Software-Ergonomie '97 - Usability Engineering: Interaktion von Mensch-Computer-Interaktion und Software-Entwicklung* 253–262. Teubner, Stuttgart.
- Schreiber W, Zimmermann P (2011) *Virtuelle Techniken im industriellen Umfeld. Das AVILUS-Projekt – Technologien und Anwendungen*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Stein St, Fedrowitz Ch, Herfs W, Höhne A, Heuschmann Ch, Bade Ch, Henze A, Mecke R, Böckelmann I, Schiller F, August W (2011) Nutzerbezogene Entwicklung und Untersuchung AR-basierter Werkerassistenzsysteme. In: W. Schreiber et al. (Hrsg.) *Virtuelle Techniken im industriellen Umfeld. Das AVILUS-Projekt - Technologien und Anwendungen* 213-374. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Tümler J (2010) *Mobile Augmented Reality im industriellen Langzeiteinsatz. Untersuchungen zu nutzerbezogenen und technischen Aspekten*. Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften Aktiengesellschaft & Co. KG, Saarbrücken.

Werrlich S, Daniel A, Ginger A, Nguyen P-A, Notni G (2018) Comparing HMD-Based and Paper-Based Training. In: IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR) 134–142. IEEE.

Zijlstra FRH, Doorn L, van (1985) The Construction of a Scale to Measure Perceived Effort. In: Technical Report. Delft University Press, Delft.

Zijlstra FRH (1993) Efficiency in work behaviour. A design approach for modern tools. Delft University Press, Delft.