

Laser- und Beamerprojektionen als Workerassistenzsysteme in der manuellen Montage

Projektionsbasierte Assistenz in der Montage

T. Pfeifroth, M. Dietsch, R. Mahlandt

Die manuelle Montage ist zunehmend mit einer hohen Variantenvielfalt und kleinen Losgrößen konfrontiert. Sie muss eine ausgeprägte Flexibilität aufbringen, um den hohen Qualitätsstandards und individuellen Kundenanforderungen zu genügen. Um die Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen bei den stetig komplexer werdenden Tätigkeiten zu unterstützen, kommen diverse Workerassistenzsysteme zum Einsatz. Projektionsbasierte Assistenzsysteme wie die Laser- oder Beamerprojektion erlauben eine kontextsensitive Informationsbereitstellung direkt auf dem Bauteil und dem Arbeitsplatz.

STICHWÖRTER

Industrie 4.0, Montage, Produktionstechnik

Projection-based assistance in manual assembly – Laser and Video projection as worker assistance systems in manual assembly

Increasingly, manual assembly is faced by a high number of product variants and small lot sizes. High flexibility is necessary to meet high quality standards and individual customer requirements. Various worker assistance systems are being used to support workers in their increasingly complex tasks. Projection-based assistance systems, such as laser or video projection, enable context-sensitive information to be provided directly on the component or workstation.

1 Herausforderungen in der manuellen Montage

Produzierende Unternehmen befinden sich derzeit im Spannungsfeld zwischen Produktindividualität und Wirtschaftlichkeit. Kunden auf dem globalen Markt fordern individuelle Produkte bei hoher Qualität und Termintreue. Zudem beeinflussen globale gesellschaftliche Faktoren, wie der demografische Wandel, die Globalisierung und die Digitalisierung, die Arbeitswelt. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, muss die Produktion flexibel aufgestellt sein. Verschiedene Assistenzsysteme können zur Unterstützung zum Einsatz kommen. Sie verfolgen das Ziel, die Fähigkeiten des Menschen mit denen neuer Technologien zu vereinen und so Synergieeffekte zu schaffen. Eine solche Art der Unterstützung bieten die projektionsbasierten Assistenzsysteme. Sie projizieren Informationen direkt in das Sichtfeld des Werkers. [1, 2]

Dieser Artikel befasst sich mit solchen Assistenzsystemen. Eine praktische Untersuchung erforscht das Potenzial von Laser- und Beamerprojektionen auf den manuellen Montageprozess. Im Vergleich zur konventionellen Montage wird der Einfluss der Systeme auf die Montagezeit, die Fehlerrate und die mentale Belastung untersucht.

2 Einsatz projektionsbasierter Assistenzsysteme

Die Art der Unterstützung der Assistenzsysteme reicht von der Darstellung von Arbeitsanweisungen bis hin zur aktiven

Kraft- und Bewegungsunterstützung. Es werden drei Ausprägungen unterschieden: physisch, kognitiv und informatorisch. [2]

Physische Assistenzsysteme sind darauf ausgelegt das Muskel-Skelett-System des Workers zu entlasten. Dabei wird die menschliche Muskelkraft mechanisch-motorisch unterstützt. Es können sowohl körperlich nachlassende Fähigkeiten ausgeglichen als auch ergonomische Aspekte verbessert werden, um einem vorzeitigen Verlust vorzubeugen [3]. Kognitive Assistenzsysteme sind adaptive Systeme. Durch diverse Sensoren und Aktuatoren werden Anlagen um kognitive Fähigkeiten wie Wahrnehmung, Planen, Schlussfolgern und Kreativität erweitert [4]. Informatorische Assistenzsysteme verfolgen dagegen das Ziel die richtige Information zur richtigen Zeit in der gewünschten Form bedarfsgerecht zur Verfügung zu stellen. Dabei kann das System visuell, auditiv oder taktil-kinästhetisch ausgelegt sein [5]. Die projektionsbasierten Assistenzsysteme sind innerhalb der informatorischen Assistenzsysteme der visuellen Informationsvermittlung zuzuordnen.

Zur Kategorie der projektionsbasierten Assistenzsysteme gehören Datenbrillen, Laser- und Beamerprojektoren. Sie ermöglichen die Darstellung von Informationen im direkten Sichtfeld des Anwenders, auf Bauteilen oder dem Arbeitsplatz. Datenbrillen werden auf dem Kopf getragen und die erzeugten Projektionen sind allein für den Nutzenden sichtbar. Durch eine Virtual-Reality (VR)-Brille kann ausschließlich ein virtuelles Bild betrachtet werden. Die Augmented-Reality (AR)-Brille dagegen gewährt die Sicht auf die Realität, ergänzt um virtuelle Inhalte. Studien weisen auf begrenzte Einsatzmöglichkeiten der AR-Brillen hin. Der eingeschränkte Tragekomfort und das begrenzte Sichtfeld erlauben bisher keinen dauerhaften Einsatz. Sie können jedoch gezielt in

Situationen mit besonders hohem Informationsbedarf, etwa beim Anlernen neuer Tätigkeiten, eingesetzt werden [6]. Laser- und Beamerprojektionen projizieren die Inhalte direkt auf die entsprechenden Oberflächen. Die Projektionen sind nicht nutzergebunden und Werker und Werkerinnen müssen kein weiteres Equipment tragen.

Laserprojektoren können anhand monochromatischer Linienzüge etwa alphanumerische Zeichen oder Konturen darstellen (**Bild 1**). Prinzipbedingt zeichnen sie sich durch eine hohe Präzision auch bei großen Projektionsabständen aus.

Beamerprojektoren können hingegen flächige Darstellungen in den Farben des sichtbaren Farbspektrums projizieren. Entsprechend ist eine vielfältige Darstellung etwa von Texten, Symbolen, Bildern und Videos möglich [6]. Die Projektionen beider Systeme können auf beliebig dreidimensional geformte Objekte geworfen werden. Dabei wird von der sogenannten Spatial Augmented Reality (SAR) gesprochen. Im Vergleich zur AR-Technologie wird der immersive Eindruck bei SAR-Darstellungen verstärkt [7]. Häufige Aufgaben der Projektionssysteme sind die Darstellung intuitiver Instruktionen, Positionierhilfen, Markierungen von Bohrungen sowie der Einsatz als Lackierschablone.

Studien von *Funk et al.* zeigen einen positiven Einfluss der Laser- und Beamerprojektionen auf den manuellen Montageprozess. Im Vergleich zu anderen Arten der Informationsbereitstellung, etwa über Papier, Tablet und Datenbrillen, konnte mit der Projektion die Produktivität gesteigert werden. Anlern- und Ausführungszeiten wurden verkürzt sowie die Fehlerquote und mentale Belastung der Versuchspersonen reduziert. [8–10]

3 Versuchsaufbau

Laser- und Beamersysteme erlauben unterschiedliche Projektionen und somit unterschiedliche Möglichkeiten der Informationsbereitstellung und -übermittlung. In einer vergleichenden Untersuchung werden die Potenziale der beiden Projektionssysteme in der manuellen Montage erforscht und denen der konventionellen Montage gegenübergestellt. Dabei stehen die Montagezeiten, die Fehlerquote und die mentale Belastung der Probanden im Fokus.

Für die Untersuchung wird eine Rohrleuchte als Beispielprodukt herangezogen. Die Montage der Leuchte deckt ein weites Spektrum an Montagetätigkeiten ab. So sind verschiedene Fügeverfahren wie Kleben, Zusammensetzen und Verschrauben, aber auch Kontrollvorgänge erforderlich. Insgesamt besteht das Produkt aus 23 Bauteilen und wird in 34 Arbeitsschritten montiert. Aufgrund seiner Komplexität und dem damit einhergehenden Fehlerpotenzial für ungeübte Versuchspersonen eignet sich das Produkt für die Untersuchung. Die Arbeitsstation ist in ihrer Grundausstattung mit allen benötigten Bauteilen, Werkzeugen sowie Hilfsmitteln ausgestattet und wird entsprechend der Versuchsreihe um das Assistenzsystem beziehungsweise die papierhafte Arbeitsanweisung ergänzt (**Bild 2**).

Tabelle. Überblick der Versuchsreihen.

	Versuchsreihe 1	Versuchsreihe 2	Versuchsreihe 3
Art der Informationsbereitstellung	Konventionelle, papierhafte Anweisung	Laserprojektion und Panel-PC	Beamerprojektion
Abkürzung	V1-Papier	V2-Laser	V3-Beamer

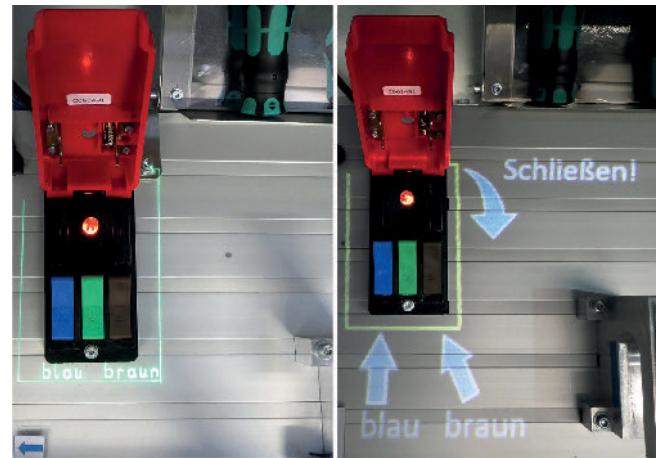


Bild 1. Beispielhafte Laser- und Beamerprojektion.

Foto: AG Montagetechnik, EAH Jena

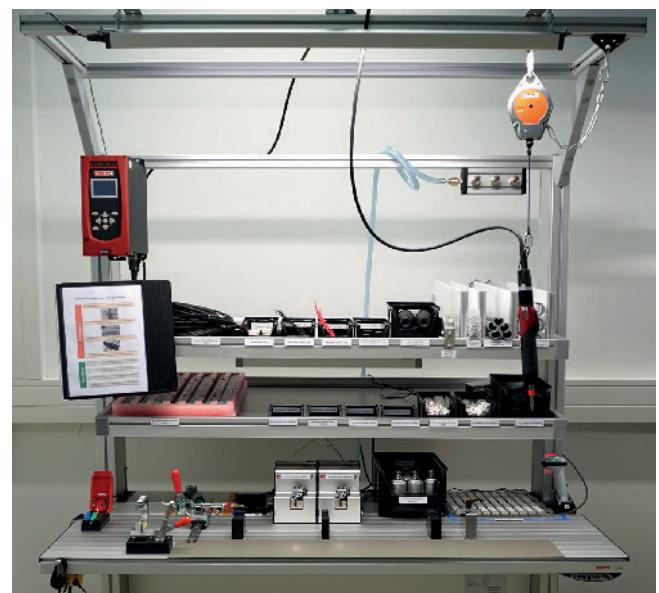


Bild 2. Aufbau des Montagearbeitsplatzes.

Foto: AG Montagetechnik, EAH Jena

Die Untersuchung ist in drei Versuchsreihen gegliedert. Sie unterscheiden sich jeweils durch die Art der Informationsbereitstellung, siehe **Tabelle**.

In allen drei Versuchsreihen werden inhaltlich einheitliche Anweisungen vermittelt. Dabei wird jeder Arbeitsschritt mit einer kurzen schriftlichen Erläuterung und Fotos erklärt. Je nach Möglichkeit des Darstellungsmediums kommen weitere erklärende Videos und projizierte Hinweise hinzu.

Die papierhafte Anweisung (V1-Papier) erstreckt sich über acht DIN-A4-Seiten, auf denen in einer Tabelle die einzelnen

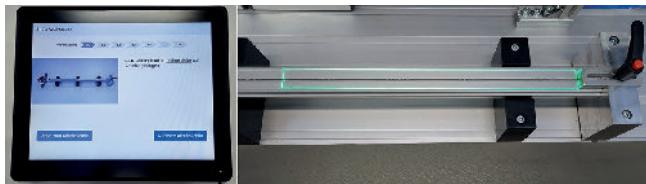


Bild 3. Montageanweisung per Panel-PC und Laserprojektion.
Foto: AG Montagetechnik, EAH Jena



Bild 4. Montageanweisung per Beamerprojektion.
Foto: AG Montagetechnik, EAH Jena

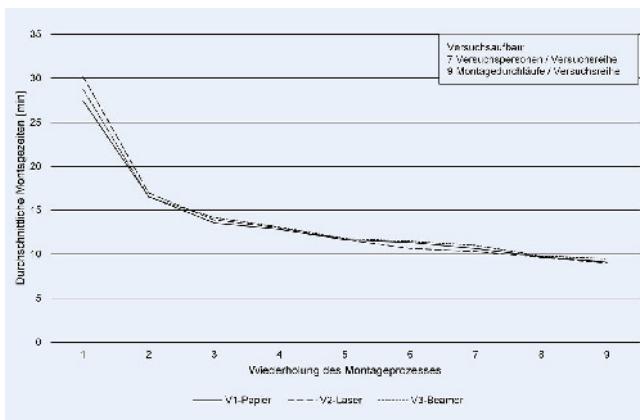


Bild 5. Durchschnittliche Montagezeiten im Vergleich.
Grafik: AG Montagetechnik, EAH Jena

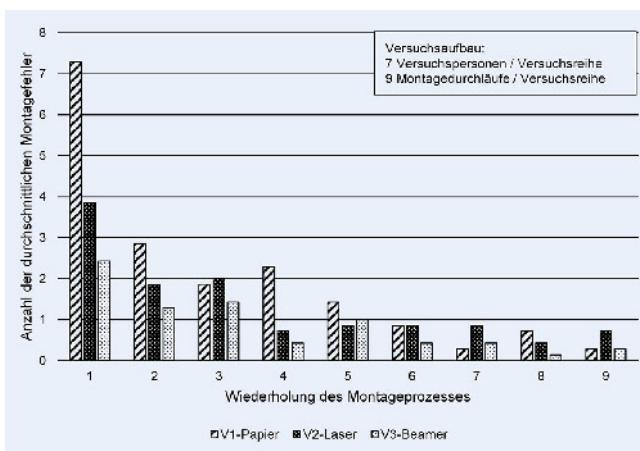


Bild 6. Durchschnittliche Anzahl Montagefehler je Montageprozess.
Grafik: AG Montagetechnik, EAH Jena

Arbeitsschritte dargestellt sind. Benötigte Materialien sind in der Anweisung hervorgehoben. Sie können anhand der Bezeichnungen an den Materialkisten wiedergefunden werden.

In der V2-Laserprojektion wird die Anweisung schrittweise auf einem Panel-PC wiedergegeben (**Bild 3**).

Die einzelnen Arbeitsschritte werden anhand schriftlicher Erläuterung und Fotos beschrieben. Über entsprechende Schaltflächen kann ein zusätzliches Erklärvideo geöffnet beziehungsweise der folgende Arbeitsschritt aufgerufen werden. Diese Anweisung wird durch Hinweise per Laserprojektion ergänzt. Überwiegend werden durch die Projektion mit Pfeilen, Rechtecken und Kreisen die Ablage- und Verbauorte der Bauteile markiert. Mit kurzen schriftlichen Hinweisen wird etwa auf die korrekte Verkabelung von Aderleitungen hingewiesen. Außerdem wird über die Laserprojektion ein Pick-by-Light-System dargestellt. Prinzipbedingt ist die Laserprojektion in der Anzahl der gleichzeitig dargestellten Elemente begrenzt, weshalb nicht der komplette Anweisungstext projiziert werden kann. Ab einer gewissen Komplexität der Projektion (abhängig vom eingesetzten Projektor) tritt ein Flimmern der Projektion auf, welche dadurch nicht mehr eindeutig zu erkennen ist.

In der V3-Beamerprojektion werden alle Anweisungen mit dem Beamer auf die Arbeitsfläche projiziert (**Bild 4**).

Jeder Arbeitsschritt wird einzeln durch Projektionen visualisiert. Die Anweisung umfasst die schriftlichen Erläuterungen, Fotos sowie Videos. Außerdem wird die Anweisung um weitere Montagehinweise, analog zur Laserprojektion, ergänzt. Ebenso wird ein Pick-by-Light-System über die Beamerprojektion bereitgestellt. Die Versuchsperson kann sich durch einen Taster auf der Arbeitsfläche schrittweise durch die Anweisung schalten.

Für die Untersuchung wurden jeweils sieben Personen je Versuchsreihe herangezogen. Keine der Versuchspersonen hatte vor Beginn der Untersuchung Kenntnisse über das zu montierende Produkt. Jede Testperson montierte neun identische Rohrleuchten mit jeweils einem der drei Systeme, es fand keine Mischuntersuchung statt. Vor Beginn der Untersuchung und nach jeweils drei Montagen füllte die Testperson einen Fragebogen aus.

4 Untersuchungsergebnisse

Alle drei Versuchsreihen zeigen über die neun Montagen hinweg einen Abfall der Montagezeiten (**Bild 5**).

Im Durchschnitt haben die 21 Versuchspersonen für die erste Montage knapp 29 Minuten und für die letzte Montage rund neun Minuten benötigt. Die zeitlich deutlichste Verbesserung fand innerhalb der ersten drei Montagen statt. Der Verlauf und die durchschnittlichen Montagezeiten der drei Versuchsreihen verhielten sich ähnlich, weshalb in diesem untersuchten Szenario kaum ein Einfluss der Assistenzsysteme auf die Montagezeiten festgestellt werden kann.

Bei der beobachteten Fehlerquote kann hingegen ein positiver Einfluss der Assistenzsysteme verzeichnet werden (**Bild 6**).

Mit durchschnittlich 18 Fehlern in allen neun Montagen traten die meisten Fehler in V1-Papier auf. V2-Laserprojektion weist durchschnittlich zwölf, V3-Beamerprojektion lediglich acht Fehler auf. Vor allem in der ersten Montage zeigen die projektionsbasierten Assistenzsysteme Potenzial zur Fehlervermeidung. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass durch die Projektion relevanter Hinweise direkt im Sichtfeld der Montierenden Fehler vermieden werden können. Besonders unter der Anleitung der Beamerprojektion kann die komplette Anweisung inklusive Bilder, Videos und Hinweisen jederzeit direkt im Sichtfeld wahrgenommen werden. Details der Montagetätigkeit sind so stetig präsent.

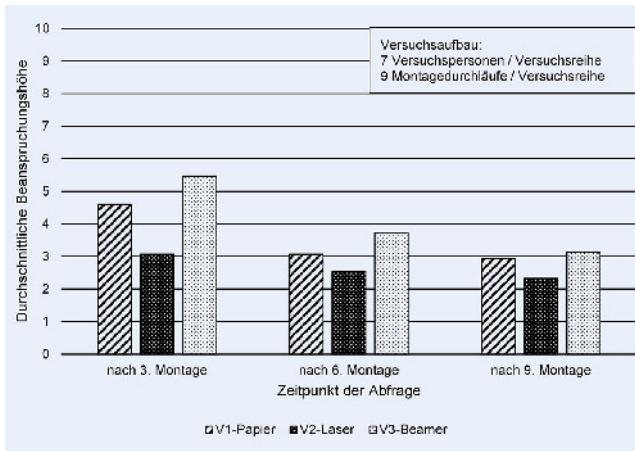


Bild 7. Geistige Anstrengung der Probanden nach NASA-TLX-Test.
Grafik: AG Montagetechnik, EAH Jena

Nach jeweils drei Montagen haben die Versuchspersonen ihre geistige Anstrengung anhand des NASA-TLX Tests [11] auf einer Skala von 0 „gering“ bis 10 „hoch“ eingeschätzt (**Bild 7**).

Während die V2-Laserprojektion im Vergleich zu V1-Papier eine niedrigere mentale Beanspruchung verzeichnet, weist die V3-Beamerprojektion eine erhöhte Beanspruchung auf. Alle drei Versuchsreihen zeigen über die Versuchsdauer hinweg einen konstanten Rückgang der mentalen Beanspruchung. Die vergleichsweise hohe Anstrengung durch die Beamerprojektion lässt sich auf die Vielzahl gleichzeitig projizierter Elemente zurückführen. Die Teilnehmenden mussten diese hohe Informationsdichte zunächst verarbeiten. Zudem wurden eine unzureichende Auflösung und eine regelmäßige Abschattung der Projektion durch den Oberkörper kritisiert. Nachdem sich eine Routine im Umgang mit dem System eingestellt hatte, verringerte sich die mentale Beanspruchung. Grundsätzlich wurde die Informationsaufnahme und -verarbeitung von den Versuchspersonen der beiden assistierten Versuchsreihen besser bewertet. Durch die Anweisungen und Hinweise direkt am Bauteil fällt es den Teilnehmenden leichter, gesehene Informationen auf die eigene Handlung zu übertragen. Analog verhalten sich die Einschätzungen zur wahrgenommenen Unterstützung des Systems. Diese schätzen die Teilnehmenden mithilfe der Laser- und der Beamerprojektion besser ein.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Aus der durchgeführten Untersuchung kann ein positiver Einfluss der Assistenzsysteme auf den manuellen Montageprozess abgeleitet werden. Besonders die Fehlerreduktion durch den Einsatz der Beamerprojektion sticht hervor. Die Betrachtung der mentalen Beanspruchung verdeutlicht den schmalen Grat zwischen effektiver Unterstützung und zusätzlicher Belastung durch die Systeme.

Nur eine sorgfältig gestaltete Projektion hat das Potenzial mental zu entlasten. So muss grundsätzlich die Lesbarkeit der Anweisung und Erkennbarkeit der Fotos und Videos gewährleistet sein. Dazu zählen eine ausreichende Auflösung und ein angemessener Kontrast der Projektion wie auch das Vermeiden von Abschattungen der Projektion. Außerdem empfiehlt es sich, die dargestellten Inhalte auf das Wesentliche zu reduzieren. Dabei sollten individuelle Präferenzen der Montierenden als auch der Leistungsstand berücksichtigt werden. Zudem verschiebt sich die

Aufmerksamkeit der Versuchspersonen im Verlauf der Untersuchung. Zu Beginn standen zumeist der Text, die Fotos sowie die Videos im Fokus, im weiteren Verlauf haben sich die Teilnehmenden zunehmend an den projizierten Hinweisen orientiert. Bei den Hinweisen am Bauteil ist darüber hinaus auf eine eindeutige Interpretation der Projektionen zu achten. Sofern keine feste Positionierung der Bauteile und keine adaptive Projektion gegeben ist, müssen Hinweise derart gestaltet werden, dass sie unabhängig der Bauteilposition eindeutig interpretiert werden können.

Ein Einfluss auf die Montagezeit konnte in dem untersuchten Szenario nicht festgestellt werden. Es ist denkbar, dass diese Vorteile bei einer variantenreichen Montage zum Tragen kommen, dem prädestinierten Einsatzgebiet digitaler Assistenzsysteme. Demnach werden weitere Untersuchungen empfohlen, um den Einfluss der Assistenzsysteme auf eine variierende Montagetätigkeit zu untersuchen.

DANKSAGUNG

Das Projekt wird durch die
Carl-Zeiss-Stiftung gefördert.



L iteratur

- [1] Reinhart, G.; Bengler, K.; Dollinger, C. et al.: Der Mensch in der Produktion von Morgen. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Carl Hanser Verlag 2017, S. 51–88
- [2] Apt, W.; Bovenschulte, M.; Priesack, K. et al.: Einsatz von digitalen Assistenzsystemen im Betrieb. Forschungsbericht 502. Stand: 2018. Internet: www.bmas.de/SharedDocs/Downloads/DE/Publikationen/Forschungsberichte/fb502-einsatz-von-digitalen-assistenzsystemen-im-betrieb.pdf;jsessionid=5B61461FFA6F46C61A2311566E7245B1.deli-very1-master?__blob=publicationFile&v=1. Zugriff am 03.03.2022
- [3] Apt, W.; Schubert, M.; Wischmann, S.: Digitale Assistenzsysteme. Perspektiven und Herausforderungen für den Einsatz in Industrie und Dienstleistungen. Stand: 2018. Internet: www.iit-berlin.de/iit-docs/fd2aa38ad4474e6cb53720e7878ffd4a_2018_02_01_Digitale_Assistenzsysteme_Perspektiven_und_Herausforderungen.pdf. Zugriff am 03.03.2022
- [4] Zäh, M.; Mathey, W.; Engster, F. et al.: Kognitive Assistenzsysteme in der manuellen Montage. Adaptive Montageführung mittels zustandsbasierter, umgebungsabhängiger Anweisungsgenerierung. wt Werkstatttechnik online 97 (2007) 9, S. 644–650. Internet: www.werkstatttechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag
- [5] Hinrichsen, S.: Informatorische Gestaltung der Montage mittels Assistenzsystemen. In: Bornewasser, M.; Hinrichsen, S. (Hrsg.): Informatorische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage. Heidelberg: Springer-Verlag 2020, S. 21–42
- [6] Antakli, A.; Moya, P. A.; Brüderlin, B. et al.: Virtuelle Techniken und Semantic-web. Stand der Wissenschaft und Technik. In: Schreiber, W.; Zürl, K.; Zimmermann, P. (Hrsg.): Web-basierte Anwendungen Virtueller Techniken. Das ARVIDA-Projekt – Dienste-basierte Software-Architektur und Anwendungsszenarien für die Industrie. Berlin: Springer Vieweg 2017, S. 117–116
- [7] Park, M. K.; Lim, K. J.; Seo, M. K. et al.: Spatial augmented reality for product appearance design evaluation. Journal of Computational Design and Engineering 2 (2015) 1, pp. 38–46
- [8] Büttner, S.; Funk, M.; Sand, O. et al.: Using Head-Mounted Displays and In-Situ Projection for Assistive Systems. PETRA ,16: Proceedings of the 9th ACM International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments, Corfu Island/Greece, 2016, # 44, pp. 1–8

- [9] Funk, M.; Kosch, T.; Schmidt, A.: Interactive Worker Assistance: Comparing the Effects of In-Situ Projection, Head-Mounted Displays, Tablet, and Paper Instructions. *UbiComp '16: Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, Heidelberg/Germany, 2016, pp. 934–939
- [10] Funk, M.; Bächler, A.; Bächler, L. et al.: Comparing projected in-situ feedback at the manual assembly workplace with impaired workers. *PETRA '15: Proceedings of the 8th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, Corfu-/Greece, 2015, pp. 1–8
- [11] Hart, S.: NASA-Task Load Index (NASA-TLX); 20 years later. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting HFES 50* (2006) 9, pp. 904–908



Prof. Dr.-Ing. **T o b i a s P f e i f r o t h**
Foto: Rainer Bez

M a x i m i l i a n D i e t s c h, M.Sc.

R e e n a M a h l a n d t, M.Sc.

Ernst-Abbe-Hochschule Jena
Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen
Carl-Zeiss-Promenade 2, 07754 Jena
Tel. +49 3641 / 205-948
tobias.pfeifroth@eah-jena.de
www.wi.eah-jena.de